

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

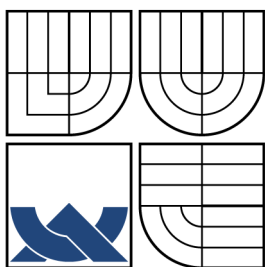
ŘÍZENÍ VÝKONOVÉ LED POMOCÍ ATTINY

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

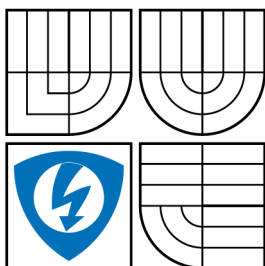
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

BC. JIŘÍ HOLUBČÍK

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND  
COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## ŘÍZENÍ VÝKONOVÉ LED POMOCÍ ATTINY THE CONTROLLING OF POWER LED USING ATTINY

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

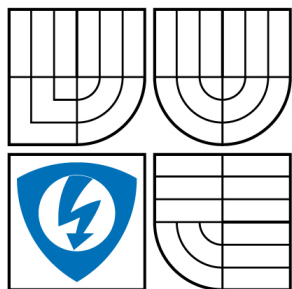
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

BC. JIŘÍ HOLUBČÍK

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

ING. DAVID KUBÁNEK, PH.D.

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

## Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
Telekomunikační a informační technika

**Student:** Holubčík Jiří Bc.  
**Ročník:** 2

**ID:** 47401  
**Akademický rok:** 2007/2008

### NÁZEV TÉMATU:

**Řízení výkonové LED pomocí ATtiny**

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhnete a realizujete DC měnič napětí pro napájení výkonové LED ovládaný mikrokontrolérem ATtiny. Vytvořte program pro tuto aplikaci. Účinnost měniče a výkonové poměry v zapojení ověřte měřením. Při návrhu je kritickou veličinou velikost měniče a vlastní spotřeba účinnost. Projekt řešte ve spolupráci s pracovníky vývojového centra Honeywell v Brně.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Matoušek, D.: Práce s mikrokontroléry ATMEL AVR - ATmega16, BEN, 2006.
- [2] Mann, B.: C pro mikrokontroléry, BEN, 2003.

**Termín zadání:** 11.2.2008

**Termín odevzdání:** 28.5.2008

**Vedoucí práce:** Ing. David Kubánek, Ph.D.

**prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.**  
*předseda oborové rady*

### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

# LICENČNÍ SMLOUVA

## POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

### 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Jiří Holubčík  
Bytem: Potoční 773/20, 74235, Odry  
Narozen/a (datum a místo): 4.3.1983, Vítkov

(dále jen "autor")

a

### 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
se sídlem Údolní 244/53, 60200 Brno 2  
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:  
prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

(dále jen "nabyvatel")

## Článek 1

### Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
- ☒ diplomová práce
- ☐ bakalářská práce

jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Řízení výkonové LED pomocí ATtiny

Vedoucí/školicitel VŠKP: Ing. David Kubánek, Ph.D.

Ústav: Ústav telekomunikací

Datum obhajoby VŠKP: .....

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

- ☒ tištěné formě - počet exemplářů 1
- ☒ elektronické formě - počet exemplářů 1

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

## Článek 2

### Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
  - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
  - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
  - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
  - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## Článek 3

### Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: .....

.....

Nabyvatel

.....

Autor

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá možnými typy DC/DC měničů napětí pro napájení výkonové LED. Věnuje se srovnání dostupných typů akumulátorů na našem trhu a typům DC/DC měničů použitelných při následné konstrukci vzorku. Výběr vhodného zdroje energie je podřízen výsledné váze a velikosti baterie. Stejně tak jsou na DC/DC měnič kladeny požadavky na co nejmenší velikost a co nejvyšší účinnost. Tudíž je výběr zúžen pouze na měniče s jednoduchou cívkou a minimem spínacích prvků, aby bylo možno měnič realizovat například i technologií SMT. Jedním z možných je obvod LTC3453 který je v práci popsán a podle doporučeného zapojení výrobce i sestaven a následně odměřen. Na jeho základě jsou poté sestaveny ještě dva vzorky ve kterých se snažím odstranit problémy z předchozích zapojení a rozšířit jej o řízení jasu LED diody za pomoci mikrokontroléru ATtiny. Je také uveden základní popis volně prodávané svítilny Petzl MYO XP.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Svítilna, LED, Akumulator, DC/DC měnič, LTC3453, ATtiny

## **ABSTRACT**

This master's thesis puts mind to choice and suggestion of suited type of DC/DC tension converter for power supply of power LED. It shows comparison of available types of accumulators in The Czech Republic and types of DC/DC converters used in construction of the sample. The choice of available source of energy is subordinated to final weight and size of a battery. There are also some explicit requirements for the smallest possible size and highest efficiency. So the choice is aimed only for converters with a simple coil and minimum numbers of switching elements to realize the converter, for example by SMT technology. One of many possibilities is LTC3453 circuit, which is described in this thesis, assembled and measured. On the basis of this circuit the next two samples are assembled. Here I try to suppress problems from previous circuit and expand its possibilities by adding the control of luminance via the microcontroller ATtiny. Then is introduced the basic description of flashlight Petzl MYO XP which is available in stores.

## **KEYWORDS**

Flashlight, LED, Accumulator, DC/DC converter, LTC3453, ATtiny

HOLUBČÍK J. *Řízení výkonové LED pomocí ATtiny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav Telekomunikací, 2008. 69 s., 12 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce byl Ing. David Kubánek, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Řízení výkonové LED pomocí AT-tiny“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Davidu Kubánkovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky, a členu vývojového centra společnosti Honeywell s.r.o. panu Ing. Ondřeji Pavelkovi za cenné rady a metodické vedení práce. V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# OBSAH

|                                                 |           |
|-------------------------------------------------|-----------|
| <b>Úvod</b>                                     | <b>13</b> |
| <b>1 Zdroje světla</b>                          | <b>14</b> |
| 1.1 Žárovka . . . . .                           | 14        |
| 1.2 Halogenová žárovka . . . . .                | 14        |
| 1.3 LED dioda . . . . .                         | 15        |
| <b>2 Napájení</b>                               | <b>16</b> |
| 2.1 Akumulátory . . . . .                       | 16        |
| 2.1.1 Nikl-kadmiový akumulátor . . . . .        | 18        |
| 2.1.2 Nikl-Metal Hydridový akumulátor . . . . . | 19        |
| 2.1.3 Řazení článků . . . . .                   | 20        |
| 2.1.4 Paměťový efekt . . . . .                  | 20        |
| 2.1.5 Vhodný akumulátor . . . . .               | 21        |
| 2.1.6 Metody nabíjení . . . . .                 | 24        |
| 2.2 Zhodnocení . . . . .                        | 25        |
| <b>3 DC/DC měniče</b>                           | <b>26</b> |
| 3.1 BUCK měnič . . . . .                        | 27        |
| 3.2 BOOST měnič . . . . .                       | 29        |
| 3.3 BUCK-BOOST měnič . . . . .                  | 30        |
| 3.4 CUK měnič . . . . .                         | 31        |
| 3.5 PWM řízení DC/DC měniče . . . . .           | 32        |
| <b>4 Svítidla Petzl</b>                         | <b>33</b> |
| <b>5 Prototyp s obvodem LTC3453EUF</b>          | <b>34</b> |
| 5.1 Simulace zapojení pro vzorek . . . . .      | 35        |
| 5.2 Vzorek číslo 1 . . . . .                    | 37        |
| 5.3 Vzorek číslo 2 . . . . .                    | 40        |
| 5.4 Vzorek číslo 3 . . . . .                    | 45        |
| 5.5 Program . . . . .                           | 51        |
| <b>6 Závěr</b>                                  | <b>53</b> |
| <b>Literatura</b>                               | <b>55</b> |
| <b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>         | <b>56</b> |

|                                               |           |
|-----------------------------------------------|-----------|
| <b>Seznam příloh</b>                          | <b>57</b> |
| <b>A Vnitřní struktura obvodu LTC3453</b>     | <b>58</b> |
| <b>B Naměřené hodnoty</b>                     | <b>59</b> |
| B.1 Tabulka hodnot pro první vzorek . . . . . | 59        |
| B.2 Tabulka hodnot pro druhý vzorek . . . . . | 61        |
| B.3 Tabulka hodnot pro třetí vzorek . . . . . | 63        |
| <b>C Podklady pro výrobu vzorku</b>           | <b>64</b> |
| C.1 Schéma zapojení . . . . .                 | 64        |
| C.2 Deska plošného spoje . . . . .            | 64        |
| C.3 Osazovací plánec . . . . .                | 65        |
| C.4 Seznam součástek . . . . .                | 66        |

# SEZNAM OBRÁZKŮ

|      |                                                                                         |    |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1  | Struktura Nikl-Metal hydridové baterie Panasonic . . . . .                              | 17 |
| 3.1  | Zapojení snižujícího měniče . . . . .                                                   | 28 |
| 3.2  | Zapojení zvyšujícího měniče . . . . .                                                   | 29 |
| 3.3  | Zapojení invertujícího měniče . . . . .                                                 | 30 |
| 3.4  | Zapojení cuk snižujícího-zvyšujícího invertujícího měniče . . . . .                     | 31 |
| 3.5  | Pracovní cyklus spínače . . . . .                                                       | 32 |
| 5.1  | Zapojení obvodu LTC3453 pro simulaci v obvodu SwitcherCAD III .                         | 35 |
| 5.2  | Graf ze simulace obvodu LTC3453 . . . . .                                               | 36 |
| 5.3  | Graf ze simulace obvodu LTC3453 . . . . .                                               | 37 |
| 5.4  | Návrh desky plošného spoje prvního vzorku . . . . .                                     | 38 |
| 5.5  | 3D návrh desky plošného spoje . . . . .                                                 | 38 |
| 5.6  | Průběhy vstupního a výstupního napětí vzorku . . . . .                                  | 39 |
| 5.7  | Průběhy vstupního a výstupního proudu vzorku . . . . .                                  | 39 |
| 5.8  | Schéma zapojení vzorku s ATtiny . . . . .                                               | 43 |
| 5.9  | Návrh desky plošného spoje druhého vzorku . . . . .                                     | 43 |
| 5.10 | 3D návrh desky plošného spoje . . . . .                                                 | 44 |
| 5.11 | Závislost výstupního proudu na napájecím napětí druhého vzorku . .                      | 44 |
| 5.12 | Schéma zapojení vzorku s ATtiny a rozšiřujícími obvody . . . . .                        | 46 |
| 5.13 | Návrh desky plošného spoje třetího vzorku . . . . .                                     | 47 |
| 5.14 | 3D návrh desky plošného spoje . . . . .                                                 | 47 |
| 5.15 | a)napájecí napětí vzorku b)napájecí napětí mikrokontroléru . . . . .                    | 48 |
| 5.16 | a)napětí na LED diodě b)napájecí napětí vzorku . . . . .                                | 48 |
| 5.17 | a)napájecí napětí mikrokontroléru b)napětí na LED diodě . . . . .                       | 48 |
| 5.18 | a)log1 na vývodu EN b)napájecí napětí mikrokontroléru z Dragonu .                       | 49 |
| 5.19 | a)log1 na vývodu EN napájení z Dragonu b)log1 na vývodu EN . . .                        | 49 |
| 5.20 | a)log1 na vývodu EN při svítící LED b)průběh na pinu GND mikro-<br>kontroléru . . . . . | 49 |
| 5.21 | Závislost výstupního proudu na napájecím napětí třetího vzorku . . .                    | 50 |
| 5.22 | Vývojový diagram programu užitého ve vzorku tři . . . . .                               | 52 |
| A.1  | Vnitřní struktura ovodu LTC3453 . . . . .                                               | 58 |
| C.1  | Schéma zapojení vzorku s ATTiny a rozšiřujícími obvody . . . . .                        | 64 |
| C.2  | Návrh desky plošného spoje třetího vzorku . . . . .                                     | 64 |
| C.3  | Plánek osazení součástek . . . . .                                                      | 65 |

# SEZNAM TABULEK

|     |                                                                  |    |
|-----|------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1 | Porovnání světelných toků několika zdrojů světla . . . . .       | 15 |
| 2.1 | Porovnání parametrů NiCD a NiMH akumulátorů [1] . . . . .        | 18 |
| 2.2 | Srovnávací test dobíjecích tužkových (AA) baterií [12] . . . . . | 23 |
| B.1 | Tabulka naměřených hodnot prvního vzorku . . . . .               | 59 |
| B.2 | Tabulka naměřených hodnot druhého vzorku . . . . .               | 61 |
| B.3 | Tabulka naměřených hodnot třetího vzorku . . . . .               | 63 |
| B.4 | Použité měřicí přístroje pro všechna měření . . . . .            | 63 |

# ÚVOD

Dnešní moderní svět si žádá i moderní technické inovace. Této modernizaci se nevyhnula ani klasická žárovka, a tak je snahou vývojových pracovníků a konstruktérů vyvíjet zdroje světla, které budou co nejefektivnější. Toto se týká téměř všech oborů, kde se se zdroji světla můžeme setkat. Ať už je to náhrada automobilových halogenových žárovek za xenonové výbojky a světlo-vyzařující dioda – Light-Emitting Diode (LED), nebo žárovek v domácnostech za úsporné zářivky. Technologie polovodičových LED diod začíná čím dál více pronikat do všech částí běžného života. Moderní přístroje si kladou požadavky na co nejmenší spotřebu, vysokou svítivost či dlouhou životnost. Podstatným hlediskem je rovněž vyzářené teplo a velikost zdroje světla.

Dlouhou dobu byly ruční svítilny vybaveny výhradně žárovkami. Ty modernější již měli kryptonovou, popřípadě halogenovou žárovku. Pro požadavky velké svítivosti a dlouhé výdrže bylo ale potřeba svítilny napájet několika články s velkou kapacitou, a tím i hmotností. V současnosti jsou již na trhu stále více zastoupeny svítilny používající moderní LED diody. Z důvodu menší energetické náročnosti těchto polovodičových zářičů jsou svítilny vybaveny některým z jednoduchých typů DC/DC měničů pro efektivnější dodávku potřebné energie. Užití měničů s vysokou účinností dovoluje u těchto svítilen dosáhnout relativně dlouhé výdrže při zachování kompaktních rozměrů.

Diplomová práce je zadávána a vytvářena ve spolupráci s pracovníky vývojového centra Honeywell v Brně. Práce se zabývá návrhem a volbou vhodného řešení pro konstrukci tzv. „čelovky“ svítilny, která se přichycuje na čelo a je používána například speleology. Porovnány jsou některé základní parametry akumulátorů dostupných na trhu. Podle zvoleného počtu článků a napětí, které bude schopna baterie dodat, je vybrán DC/DC měnič, případně jemu odpovídající integrovaný obvod. Dále jsou sestavena testovací zapojení měniče s možností regulace výstupního proudu a odměření jejich parametrů. Požadavkem je, aby byl obvodově co nejjednodušší a s co největší účinností. Návrh měniče je podřízen dodanému typu LED.

# 1 ZDROJE SVĚTLA

Světlo je ve své fyzikální podstatě elektromagnetické záření o vlnové délce, která je pro lidské oko viditelná. Tato viditelná část spektra má frekvence od  $3,8 \times 10^{14}$  Hz až po  $7,5 \times 10^{14}$  Hz. Těmito kmitočty není světelné spektrum omezeno, ale patří zde celé spektrum od ultrafialového až po infračervené záření. Každý světelný zdroj má proto jiné parametry a vyzařuje světlo o jiné vlnové délce, tedy i barvě (teplotě světla). Lze sem zařadit i zdroje infra záření, které se používají například pro systémy umožňující noční vidění apod.

## 1.1 Žárovka

Žárovka je skleněná baňka, ve které je umístěn tenký vodič, do něhož je pouštěn elektrický proud. Procházející proud tento vodič rozežhívá na vysokou teplotu a dochází k přeměně elektrické energie na světlo. Tímto způsobem přeměněné světlo obsahuje především infračervené záření a část viditelného spektra. Vodič je vyráběn například z wolframu a z důvodu vysoké teploty je baňka vyčerpána a plněna dusíkem, nebo jiným inertním plynem.

Pro svou dnes již nenáročnou výrobu, možnosti napojení přímo na rozvodnou síť a věrnému podání barev, jsou žárovky pravděpodobně nejvíce používané světelné zdroje. Nevýhodami pak jsou krátká životnost, závislost parametrů na parametrech rozvodné sítě, snižování světelného toku stárnutím a především nízká účinnost a měrný výkon (10-15 lm/W)[11].

## 1.2 Halogenová žárovka

Tato žárovka je ve své podstatě pouze upravenou klasickou žárovkou. Rovněž jako materiál vlákna je použit wolfram, ale problém krátké životnosti je zde omezen příměsí některého halogenového inertního plynu. Díky chemické reakci mezi wolframem a halogenem (např. methylenbromid), nedochází k tak rychlému odpařování vlákna, které je tak možné rozžhavit na vyšší teplotu. Tou je dosaženo jasnějšího a bělejšího světla. Je však nutno brát v úvahu značnou teplotu baňky. Aby ji baňka vydržela, je vyrobena z křemenného skla a tím se zároveň žárovka stává zdrojem nebezpečného UV záření. To je potřeba odstranit přísadami zabraňujícími pronikání UV záření baňkou. Pro halogenovu žárovku se udává měrný výkon okolo (19 lm/W)[11] a její životnost je oproti klasické žárovce zhruba dvojnásobná.

## 1.3 LED dioda

Světlo-vyzařující dioda, nebo také elektroluminiscenční dioda, je polovodičová součástka obsahující P-N přechod, který při procházejícím proudu vyzařuje určitou část světelného spektra. Toto spektrum, a tedy i viditelnost nebo barva záření, je závislé na chemickém složení polovodiče. Nejsložitější na výrobu jsou LED s modrou a bílou barvou. Bílé barvy nelze dosáhnout použitím pouze jednoho materiálu polovodiče, ale je použit i luminofor nebo použití tří materiálů vyzařujících takové barvy, že po jejich smíchání vznikne barva bílá. Při užití luminoforu je bílá LED v podstatě modrá LED, popřípadě ultrafialová, kde se přímo na čipu část tohoto záření luminoforem transformuje na žluté nebo přímo bílé světlo. Žlutá potom v kombinaci s modrou září jako bílé světlo [6].

Díky použitému P-N přechodu je tato součástka polarizovaná a záření emituje pouze při zapojení v *propustném směru*. Se zvyšující se frekvencí vyzařovaného světla roste i napětí na přechodu P-N. U klasické usměrňovací křemíkové diody je to napětí okolo 0,6 V, kdežto bílé svítící LED má již toto napětí okolo 3,5 V. Zde je patrné, že oproti ostatním klasickým světelným zdrojům pracují tyto polovodičové součástky s poměrně malými proudy a napětími.

LED použitá pro konstrukci bude z řady Power LED od výrobce SEOUL SEMICONDUCTOR. Konkrétně jde o typ Pure white Power LED, která bude podle katalogového listu [3] napájena 350 mA a 3,5 V. Při těchto velikostech proudu a napětí má podle katalogového listu světelný tok 52 lm. Z toho vychází následující:

$$U \times I = P \quad (1.1)$$

$$3,5 \text{ V} \times 0,35 \text{ A} = 1,225 \text{ W}$$

příkon LED je tedy 1,225 W, při udaném katalogovém světelném toku 52 lm je přepočet pro porovnání následující

$$52 \text{ lm} \div 1,225 \text{ W} = 42,4 \text{ lm/W}$$

Tab. 1.1: Porovnání světelných toků několika zdrojů světla

|                     |      |        |
|---------------------|------|--------|
| Běžná 100W žárovka  | 13,2 | [lm/W] |
| Halogen 300W        | 18,6 | [lm/W] |
| Výkonová LED 1,2W   | 42,4 | [lm/W] |
| Moderní zářivka 35W | 88,6 | [lm/W] |

## 2 NAPÁJENÍ

Každé elektronické zařízení potřebuje určitý zdroj elektrické energie. Většina elektronických součástek použitých v těchto zařízeních požaduje napětí a proud v určitém rozsahu. Při napájení z rozvodné sítě je potřebná energie transformována do daného rozsahu za pomoci transformátorů nebo užitím spínaných zdrojů. Tím se sice sníží nebo zvýší na potřebnou úroveň, ale pokud vyžaduje připojené zařízení stejnosměrné napájecí napětí, je potřeba použít další obvody, které toto napětí usměrní. Dále se již usměrněné napětí filtruje, aby se omezilo výstupní zvlnění tohoto napětí. V případě kolísání síťového napětí bude však docházet i ke kolísání výstupního napětí, a proto je potřeba jej nějakým způsobem eliminovat. Jako poslední část jsou tedy použity stabilizátory, které mají za úkol udržet výstupní napětí na požadované úrovni s co nejmenšími odchylkami od této hodnoty.

Každá část napájecího zdroje má však své ztráty, kdy se část energie přemění na teplo a je vyzařeno do okolí. Další podstatnou nevýhodou je váha transformátorového zdroje, neboť pro větší výkony je potřeba použít větší a těžší transformátory a chlazení výkonových prvků zdroje. Proto se jako výhodnější varianta jeví užití spínaných zdrojů. Odpadá tak nutnost velkých a těžkých transformátorů, které fungují na principu spínání a akumulování jen potřebné části energie. Spínání může být buďto na pracovním kmitočtu sítě (50 Hz), nebo na vyšším kmitočtu než je pracovní kmitočet sítě (v řádech kHz až MHz). Díky spínání nedochází k takovému zahřívání ani při velkých výstupních proudech a dosahuje se velké účinnosti. Tyto zdroje jsou ekonomičtější na výrobu a jsou menších rozměrů než lineární napájecí zdroje.

Pro potřeby konstrukce je ale nutnost mobilního zdroje napětí. Ten bude realizován za pomoci několika akumulátorů (článků). Při napájení z akumulátorů je možno použít oba typy napájecích zdrojů. Protože potřebujeme co nejdelší výdrž, je pro nás vhodnější užití spínaného zdroje, který je sice obvodově složitější, ale má vyšší účinnost. Typ spínaného zdroje bude určen podle počtu článků a tím tedy i výstupního napětí baterie.

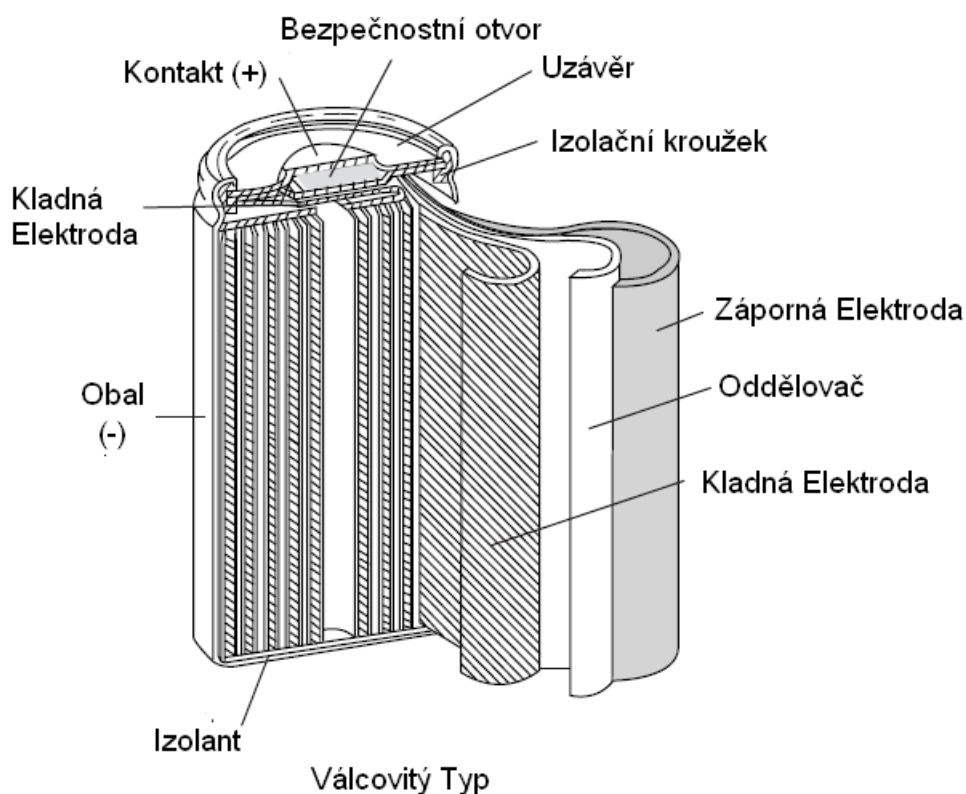
### 2.1 Akumulátory

V této práci se budu zabývat pouze akumulátory NiCd a NiMH, které jsou nejvhodnější pro užití v mobilním zařízení, z důvodů obnovitelnosti. Byl zadán požadavek, aby bylo možno kdekoli na světě články vyměnit. Volba se tedy zúžila pouze na dvě velikosti akumulátorů a to na AAA a AA.

Akumulátor je zařízení pro opakovatelné uchovávání elektrické energie a je založen na elektrochemickém procesu. Nabíjecí proud v nich vyvolává vratné chemické

změny, které způsobí rozdíl elektrochemických potenciálů na elektrodách akumulátoru. Rozdíl těchto potenciálů je potom v podobě proudu nebo napětí čerpán nazpět. Napětí těchto akumulátorů se pohybuje okolo 1,2 V. Rozdíly mezi akumulátory jsou potom v kapacitě a počtech nabíjecích cyklů. Působením chemických procesů na elektrodách dochází ke snižování kapacity. Tyto baterie mají typicky udávanou životnost okolo 1000 nabíjecích/vybíjecích cyklů.

Nikl-kadmiové akumulátory byly jedny z prvních, které umožnily poměrně velkou koncentraci energie v malém článku. Tyto články mají největší uplatnění tam, kde jsou požadavky na dlouhou životnost, větší rozsah pracovních teplot a výrobní rychlost. Nevýhodou je, že obsahují toxické kovy. Toto se podařilo odstranit v nikl-metalhydridových akumulátorech, viz obr. 2.1. Mají vyšší koncentraci energie v porovnání s nikl-kadmiovými články, avšak na úkor počtu nabíjecích/vybíjecích cyklů. Jsou vyráběny ve větších kapacitách oproti NiCd článkům. Srovnání těchto obou typů je převzato z [1] viz tab. 2.1



Obr. 2.1: Struktura Nikl-Metal hydridové baterie Panasonic

Tab. 2.1: Porovnání parametrů NiCD a NiMH akumulátorů [1]

| Parametr                             | Ni-Cd        | Ni-MH        |
|--------------------------------------|--------------|--------------|
| Hustota energie (Wh/kg)              | 45-80        | 60-120       |
| Cyklická životnost (do 80% kapacity) | 1500         | 300 až 500   |
| Doba rychlonabíjení                  | 1h           | 2 až 4h      |
| Tolerance přebíjení                  | střední      | nízká        |
| Samovybíjení/Měsíc                   | 20%          | 30%          |
| Nabíjecí proud (špičkový/optimální)  | 20C/1C       | 5C/0,5C      |
| Pracovní teplota (vybíjení)          | -40° +60°    | -20° +60°    |
| Potřeba údržby                       | 30 až 60 dnů | 60 až 90 dnů |

### 2.1.1 Nikl-kadmiový akumulátor

Jedná se o uzavřený typ akumulátoru, ve kterém nejsou plyny vznikající při nabíjení ventilovány ven, ale jsou rekombinovány uvnitř baterie. Pro tyto akumulátory je vhodnější rychlé nabíjení než pomalé, stejně jako pulzní než stejnosměrné. Je to typ baterie, který dobře zvládá i tvrdé pracovní podmínky. Pro dlouhou životnost není dobré jen občasné používání a přebíjení, ale potřebují periodické úplné vybíjení, aby se zamezilo růstu krystalů mezi elektrodami (často uváděné jako paměťový efekt), což má za příčinu ztrátu výkonu článku.

#### Klady[1]

- rychlé a snadné nabíjení, i po dlouhé době skladování
- velký počet nabíjecích/vybíjecích cyklů (okolo 1000 cyklů)
- umožňuje nabíjení při nízkých teplotách
- dlouhá skladovatelnost - až pět let
- jednoduché skladování a transport
- dobrý výkon při nízkých teplotách
- odolné proti nevhodnému zacházení
- dobrý poměr ceny a výkonu
- dostupné ve velké škále rozměrů a vlastností

## **Zápory**

- nízká energetická hustota
- paměťový efekt - musí být periodicky nabíjeny a vybíjeny, aby se předešlo paměťovému efektu
- obsahují toxické kovy
- samovybíjení

### **2.1.2 Nikl-Metal Hydridový akumulátor**

Vývoj tohoto typu baterie byl zpočátku dosti problematický, protože slitina metal-hydrid byla v akumulátoru značně nestabilní. Tento problém byl odstraněn a akumulátor je neustále zdokonalován. Většího rozšíření se dosáhlo vyšší energetickou hustotou až o 40% vyšší než u Ni-Cd článků a použití ekologicky šetrných materiálů. Články umožňují ještě vyšší kapacity. Toto zvyšování už ale doprovází vedlejší negativní jevy. Jsou méně trvanlivé než Ni-Cd články. Opakované těžké zatížení a skladování ve vysokých teplotách snižují jejich dobu použitelnosti. Posupně nahradily na trhu nikl-kadmiové články. Tato technologie značně pokročila, ale omezení niklového základu zůstávají stejně jako u Ni-Cd. Bere se spíše jako mezikrok k lithiovým článkům.

#### **Klady[1]**

- o 30-40% vyšší kapacita než Ni-Cd
- nižší pravděpodobnost paměťového efektu
- jednoduché skladování a transport
- šetrný k životnímu prostředí - obsahuje jen mírné toxiny

## **Zápory**

- menší životnost - okolo 500 cyklů
- krátká skladovací doba - okolo tří let
- omezený vybíjecí proud - je sice schopen dodat vysoké proudy, ale snižuje to životnost
- vyžaduje složitější postup nabíjení, protože produkuje více tepla a potřebuje delší nabíjecí čas než Ni-Cd
- není možné přebíjení
- vysoké samovybíjení
- potřeba úplného vybíjení, aby nedocházelo k růstu krystalů

### 2.1.3 Řazení článků

Sériovým a paralelním řazením článků se dají měnit parametry výsledné baterie. Samostatný článek niklového základu má nominální napětí 1,2 V a kapacitu. Jestliže použijeme sériové řazení článků, bude mít baterie napětí rovno součtu napětí všech článků a kapacitu jednoho článku. Tudíž máme-li 4 články s napětím 1,2 V o kapacitě 1000 mAh, bude mít baterie napětí 4,8 V a kapacitu 1000 mAh. V důsledku špatného článku je dříve vyhodnocen bod vybití baterie a výdrž je tím výrazně zkrácena. Problémy může způsobit i vysoká impedance poškozeného článku nebo zkrat, který způsobí pokles napětí baterie. Přerušení poškozeného článku pak způsobí úplnou nefunkčnost. Baterie je tedy tak kvalitní jako jeho nejslabší článek. Druhou možností je paralelní řazení. V případě stejných článků jako v předešlém, bude mít baterie napětí 1,2 V a kapacitu 4000 mAh. Tyto typy řazení je možno kombinovat a dostat tak požadované parametry baterie. I zde je možnost, že se některý článek poškodí. Zde již přerušený článek nebo článek s vysokou impedancí, nezpůsobí takové problémy, ale pouze zkrátí výdrž baterie a dodávaný proud. Závažnějším problémem je zkratovaný článek. Ten začne odebírat energii z „dobrých“ článků a může dojít až ke vzplanutí. Problémy přicházejí v momentě, kdy se některý článek poškodí. Baterie jsou většinou zatavené v obalu, popřípadě zalité v plastovém pouzdře, a proto bývá výměna poškozeného článku takřka nemožná. Aby byly tyto baterie co nejbezpečnější, jsou doplňovány jednoduchými součástkami pro jejich ochranu, např. teplotními čidly.

### 2.1.4 Paměťový efekt

Je potřeba se obávat tohoto často zmiňovaného jevu? A co to doopravdy „paměťový efekt“ vůbec je? Pod pojmem „paměťový efekt“ si často lidé představují úplně jinou vlastnost akumulátorů. Při běžném použití je téměř nedosažitelný a dochází k němu, když se akumulátor nabíjí dříve než je úplně vybit a to po více takovýchto cyklech. Článek si „zapamatuje“, jak moc byl vybit a dojde k poklesu potenciálu článku o několik desetin voltu pod normální hodnotu [2]. V případě, kdy je potom takovýto akumulátor zcela vybit, dojde ke konci vybíjení k většímu poklesu napětí akumulátoru oproti normální vybíjecí křivce. Tento jev ale nijak podstatně neovlivní reálnou kapacitu akumulátoru. Je to jev vratný, stačí několik cyklů úplného vybití a nabití.

Daleko závažnější a za „paměťový efekt“ vydávaný, je růst krystalů kadmia. Aktivní kadmium je obsaženo ve formě jemných krystalů. V dobrém článku tyto krystaly zůstávají malé a mají tak velkou plochu. U špatného článku krystaly rostou a oddělují aktivní materiál od elektrolytu. V pokročilém stavu ostré hrany krystalů

proniknou izolátorem, což způsobí velké samovybíjení nebo elektrický zkrat. Nikl-Metal hydrid měla být technologie tomuto jevu odolná. Teď už je ale známo, že je také ovlivněna, i když méně než Ni-Cd. To má za vinu zřejmě niklový plát, který je společný pro obě technologie. Tento jev také nastává při přebíjení a nabíjení nedostatečně vybitých článků. Tomu se dá předcházet pravidelným vybíjením alespoň na 1 V na článek. Obnova článku je pomalá a spočívá ve vybití článku pod 1 V při malém proudu, aby nedošlo k přepolarizování. Testy provedené americkou armádou ukázaly, že aby byly efektivně rozbity i více odolné krystaly, je potřeba články vybit nejméně na 0,6 V. Jako obnovení článku se proto provádí druhotné pomalé vybití na 0,4 V na článek.

### 2.1.5 Vhodný akumulátor

Na trhu je dnes poměrně velké množství akumulátorů nejrůznějších typů, velikostí, napětí a kapacit. Jako nejvhodnější vychází použití Ni-MH článků s dostatečně velkou kapacitou o velikosti AA. Velikost AAA by byla také použitelná, ale v této velikosti mají články méně jak poloviční kapacitu a nezaručily by dostatečně dlouhou dobu použitelnosti svítilny. I přes toto zúžení možných typů článků nám zůstává poměrně dost dalších článků s různými kapacitami od různých výrobců. Samozřejmě nejlepší bude článek s co nejvyšší kapacitou a také i výdrží. Stále je ale několik různých výrobců. Na to, jak objektivně posoudit, který článek je ten nejlepší, by bylo potřeba mít zařízení, které bude články vybíjet, měřit čas a to pro všechny za úplně stejných podmínek. Toto měření provést na několika stejných člancích od jednoho výrobce několikrát a výsledky zprůměrovat. To by však bylo celkem finančně náročné kvůli zakoupení vybíjecího zařízení a rovněž dostatečného počtu článků. Při větším počtu článků a opakování měření by to zabralo hodně času. Proto jsem si dovolil převzít hodnoty ze serveru FotonMag [12], kde právě toto měření a porovnání dostupných akumulátorů provedli. Tabulku jsem omezil jen na články s největší kapacitou. Tento praktický test je nezbytný, protože jednotliví výrobci specifikují kapacitu a dobu vybíjení za úplně odlišných podmínek. Vyjímkou nejsou i absolutně nesmyslné hodnoty v datasheetech k bateriím jako třeba u PANASONICu.

Každý výrobce pro svou potřebu uvádí parametry článků jinak a tím znemožňuje uživateli objektivní způsob porovnání. Stejně tak jako některé parametry úmyslně nadhodnocují. Vybral jsem si několik, podle mne, vhodných článků pro výslednou konstrukci a pokusil se o nich co nejvíce zjistit, abych mohl vybrat ten nejvhodnější. Následující popis článků vychází z katalogových údajů výrobců.

Jako první jsem zvolil článek velikosti AA výrobce GP Batteries s modelovým označením GP270AAHC [4] a výrobcem udanou typickou kapacitou 2500 mAh. Jde o článek Ni-MH s nominálním napětím 1,2 V. Doporučený vybíjecí proud je v roz-

mezí 250 až 7500 mA a nabíjecí 250 mA při 1,5 V. Výdrž je dána při vybíjení konstantním proudem 250 mA až do poklesu napětí na 0,9 V, a to dobou 11 h. Při vybíjecím proudu 500 mA je to 5 h .

SANYO typ HR-3U. Typická kapacita 2500 mAh, článek typu Ni-MH s nominálním napětím 1,2 V. Doporučený vybíjecí proud není udán. Nabíjení 16 h proudem 250 mA nebo 1,1 h proudem 2500 mA. Výdrž při konstantním vybíjecím proudu 500 mA do poklesu napětí na 1,0 V je vybíjecí kapacita 2300 mAh. To by mělo odpovídat době 4,6 h.

ENERGIZER typ NH15-2650. Typická kapacita 2650 mAh, článek typu Ni-MH s nominálním napětím 1,2 V. Doporučený vybíjecí proud není udán. Nabíjení není specifikováno. Výdrž při vybíjení konstantním proudem 265 mA a do poklesu napětí na 0,9 V je 10 h. Při vybíjecím proudu 530 mA je to 5 h .

VARTA typ VH2700A. Typická kapacita 2700 mAh, článek typu Ni-MH s nominálním napětím 1,2 V. Doporučený vybíjecí proud max 8100 mA. Nabíjení 16 h proudem 270 mA nebo řízené proudem 2700 mA. Výdrž při vybíjení konstantním proudem 540 mA a do poklesu napětí na 1,0 V je vybíjecí kapacita 2700 mAh. To by mělo odpovídat době 5,4 h při proudu 500 mA.

PANASONIC typ P6P 2600. Na pouzdře je udána typická kapacita 2600 mAh, článek typu Ni-MH s nominálním napětím 1,2 V. O tomto článku se mi nepodařilo zjistit žádné použitelné informace.

Následující článek nepatří přímo do této kategorie, i když je také typu Ni-MH, ale jedná se o nový typ tohoto článku vyvinutý společností SANYO pod označením TWICELL a obchodním názvem ENELOOP. Jedná se o články, které se prodávají již přednabitě a mají velmi nízké samovybíjení, takže jsou prakticky kdykoliv k použití a jsou náhradou k alkalickým článkům. Výrobce udává, že tyto články jsou schopny udržet 70% až 80% energie až po jednom roce, což je u klasickým Ni-CD Ni-MH článků prakticky nedosažitelná doba. K článku GP ReCyko nebylo možno zjistit bližší informace, a proto jsou uvedeny k článku SANYO. Ty by měly být až na několik odchylek téměř identické. Tyto dva články jsou přidány do srovnání.

SANYO Eneloop typ HR-3UTG4BP. Typická kapacita 2000 mAh, článek typu Ni-MH s nominálním napětím 1,2 V. Nabíjecí proud pro rychlonabíjení 2000 mA po dobu 1,1 h. Vnitřní odpor článku při napětí 1 V a frekvenci 1000 Hz je 25  $m\Omega$ .

Metodologie:

U každého článku je testován jeden celý blistr (4 články), aby se pokud možno objevil článek, který by byl vadný či měl horší parametry než ostatní kusy. Články jsou nabíjeny v nabíječce Accu Trainer 3 od Voltcraftu (I.V.T. Hirschau). Vybíjecí měřicí cyklus je realizován proprietárním zařízením vyrobeným na zakázku a vybíjecí proud je nastaven na 0,5 A. Každý článek projde 5 nabíjecími a vybíjecími cykly. V případě odchylky o více jak 10% od průměru všech měření přes všechny články z daného blistru se článek považuje za vadný a vyřazuje se z měření. Hodnota nejlepšího měření kapacity na daném článku se zprůměruje s ostatními články v testovaném blistru. Výsledná čísla jsou uvedena v tabulce.[12]

Vysvětlení k tabulce:

$C_T$  Typická kapacita - kapacita dobíjecího článku v [mAh] udávaná výrobcem.

$C_N$  Náboj - Ah - v testu naměřené ampérhodiny. Jinými slovy, jaký proud je schopný článek dodat pod dobu jedné hodiny. Například 2500 mAh baterka je teoreticky schopna dodávat 1 A (tj. 1000 mAh) po dobu 2,5 h či 100 mA po dobu 25 h.

W Energie - Wh - watthodiny. Udává celkovou energii jakou je článek schopen v čase dodat. Výkon závisí na proudu a napětí (ampéry krát volty) a je měřen v čase. 1000 mWh = 1 Wh.

t Čas - minuty, doba trvání testu, tj. jak dlouho baterie vydržela dodávat proud 0,5 A.

Tab. 2.2: Srovnávací test dobíjecích tužkových (AA) baterií [12]

| Baterie            | Typická kapacita $C_T$ [mAh] | $C_N$ [Ah] | W [Wh] | t [min] |
|--------------------|------------------------------|------------|--------|---------|
| Sanyo 2700         | 2700                         | 2,750      | 3,340  | 330     |
| Konnoc             | 2700                         | 2,708      | 3,250  | 325     |
| Duracell           | 2650                         | 2,703      | 3,244  | 324     |
| Varta Professional | 2700                         | 2,695      | 3,234  | 323     |
| Ansmann Digital    | 2700                         | 2,688      | 3,226  | 323     |
| GP 2700            | 2600                         | 2,660      | 3,192  | 319     |
| Energizer          | 2650                         | 2,650      | 3,180  | 318     |
| Uniross 2700       | 2700                         | 2,623      | 3,148  | 315     |
| Extreme Energy     | 2700                         | 2,533      | 3,040  | 304     |
| GP ReCyko          | 2050                         | 2,105      | 2,526  | 253     |
| Sanyo Eneloop      | 2000                         | 1,948      | 2,337  | 234     |

### 2.1.6 Metody nabíjení

Článek má sice nominální napětí 1,2 V, ale pro jeho nabíjení je potřeba mu dodat vyšší napětí a sledovat průběh jeho nabíjecí křivky. Ta pro různé teploty a nabíjecí proudy může zasahovat až k 1,7 V na článek. Pro nabíjení těchto článků se používá několik metod. Pro většinu jednoduchých a levných nabíječek je použita metoda s časovačem. Do nabíječky je vložen vybitý článek, který je nabíjen doporučeným proudem, který je desetina udané kapacity článku po dobu okolo 14ti hodin. Je možno také nabíjet jiným proudem a potřebná doba je pak dána jako

$$t = \frac{\textit{kapacitabaterie}}{\textit{nabjecproud}} * 1,2[h] \quad (2.1)$$

konstanta 1,2 je kompenzace ztrát při nabíjení. Tento způsob může článkům ublížit, pokud není článek před nabíjením dostatečně vybit, protože nabíječka nevyhodnocuje stav článku při nabíjení a docházelo by k přebíjení. Proto je daleko vhodnější použití některé metody, která snímá stav článku a podle toho řídí proces nabíjení. Jako nejvíce používaná a k článkům nejšetrnější je metoda detekce  $-\Delta U$ . Tento způsob kontroluje průběh nabíjecí křivky a když se článek blíží k plné kapacitě, začne křivka stoupat a z důvodů chemických procesů v článku při plném napětí začne klesat. U článků Ni-CD je to pokles přibližně 10 mV a u Ni-MH je to okolo 4 mV. To řídící obvod vyhodnotí a ukončí nabíjení nebo se přepne do režimu udržovacího nabíjení, aby zamezil samovybití. Další možností detekce je metoda  $\Delta U/\Delta t$ , která na rozdíl od metody  $-\Delta U$  zjišťuje pouze strmost stoupání nabíjecí křivky. Další možné jsou například sledování, jestli článek dosáhl napětí nabitého článku nebo maximální povolené teploty. Metoda  $\Delta T/\Delta t$  zjišťuje strmost nárůstu teploty za čas.

Pro řízení nabíjení se také používají speciální mikroprocesory, které zjišťují mnoho parametrů článku při jeho nabíjení a těmto stavům přizpůsobují nabíjení a i jeho ukončení.

Za nejmodernější metodu nabíjení lze považovat reflexní nabíjení. Narozdíl od předchozích mohou nabíjet články v téměř jakémkoliv stavu vybití. Tyto nabíječky nabíjí pulsujícím proudem a to tak, že po určitou dobu nabíjí konstantním proudem, následuje krátká pauza a potom je akumulátor krátce vybíjen troj- až pětinasobkem nabíjecího proudu. V dalším okamžiku je nabíjení i vybíjení vypnuto a obvod měří stav článku některou z výše uvedených metod. Pokud není nabíjení ukončeno, se celý cyklus opakuje [5].

## 2.2 Zhodnocení

Z testu vyšla jako nejlepší baterie Sanyo 2700 s kapacitou 2700 mAh. Ty jsou u nás běžně dostupné, ale kvůli velkému samovybíjení jsem zvolil články GP ReCyko, které najdou uplatnění nejen v této aplikaci, ale i v mnoha jiných mobilních zařízeních, které nejsou v denním používání. Pro použití výkonové LED výrobce doporučuje napájecí napětí v rozsahu 3-4 V. Při použití zvolených nabíjecích baterií a k požadavkům na miniaturnost a váhu výsledné svítilny, bude optimální použít dva nebo spíše tři články. Výsledné napětí nabitých článků potom bude 2,4 V, popřípadě 3,6 V. LED dioda při odběru 350 mA bude potřebovat nějaký obvod pro udržení těchto hodnot i při postupném vybíjení článků. Tomuto by jako obvodově nejjednodušší, a tím i velikostně nejmenší, odpovídalo použití zvyšujícího zapojení DC/DC měniče. Při dvou článcích je jeho užití podmínkou. Další vhodnou variantou, avšak na úkor váhy, je použití 4 dobíjecích článků, které by měly výsledné napětí 4,8 V, při vybití 3,6 V. Což by bylo doplněno snižujícím měničem, který by zaručil na výstupu požadovaných 3,5 V. V případě potřeby by bylo možno dobíjecí články nahradit třemi alkalickými články o celkovém napětí 4,5 V. Pokud by obvod měniče umožňoval, tak i čtyřmi kusy alkalických článků.

Při uvažované účinnosti měniče 95% je potřebný výkon odebraný z baterie 1,289 W. Z provedených měření lze teoreticky při použití jediného článku SANYO dosáhnout výdrže:

$$3,340[Wh] \div 1,289[W] = 2,6[h]$$

při použití dvou těchto článků:

$$6,680[Wh] \div 1,289[W] = 5,2[h]$$

při třech článcích:

$$10,020[Wh] \div 1,289[W] = 7,77[h]$$

a při čtyřech:

$$13,360[Wh] \div 1,289[W] = 10,36[h]$$

Je to jenom „hrubý“ odhad. V reálné konstrukci bude odlišný z důvodu pulzního režimu odběru proudu. Pokoušel jsem se sestavit model článku z udaných charakteristik výrobce, ale i při zanedbání pulzního provozu měniče se mi model nepodařilo realizovat, protože zde figurují tři proměnné. Při poklesu napětí na článku musí ekvivalentně stoupnout odebíraný proud. Tím se změní i doba výdrže. Kdežto křivky udané výrobcem uvažují konstantní odebíraný proud a pouze závislost poklesu napětí článku a dobu, po kterou je schopen dodávat proud do poklesu na 0,9 V.

### 3 DC/DC MĚNIČE

DC/DC měnič je jeden z typů napájecích zdrojů. Ty se dají rozdělit do dvou skupin, lineární nebo spínané. Měniče patří do skupiny spínaných.

Lineární AC/DC měniče jsou vlastně klasické transformátorové napájecí zdroje. Do sítě se připojuje primární vynutí transformátoru a na sekundárním dostáváme požadované výstupní střídavé napětí, které je galvanicky oddělené od sítě. I spínané zdroje mají galvanické oddělení od sítě za pomoci transformátoru. Ty už ale nejsou tak rozměrné, protože jsou navrženy na vysoké pracovní kmitočty. Následuje některý ze způsobů usměrnění s filtrací. Lineární měniče mají však nízkou účinnost, většinou pod 50%, takže polovina energie se přemění na ztrátové teplo. Kdežto u spínaných zdrojů se dosahuje účinnosti až 98%. Lineární měnič musí být navrhnut na dané parametry rozvodné sítě a v porovnání se spínanými zdroji má až dvounásobnou velikost. U těchto zdrojů dochází ke kolísání výstupního napětí v závislosti na kolísání napětí sítě a použitém transformátoru. Vlivem jeho vnitřní impedance dojde ke snížení výstupního napětí při zvýšení odebíraného proudu. Spínaný zdroj je schopen pracovat s velkým rozmezím vstupního napětí a dodávat konstantní napětí. Někdy takto upravené napětí stačí, většinou je však potřeba použít lineárních stabilizátorů pro potřeby různých napětí a kvůli náročným obvodům. V obvodech napájených bateriemi jsou tyto zdroje nepoužitelné, takže nelze realizovat DC/DC lineární zdroj. U spínaných zdrojů je realizace více výstupních napětí sice složitější, ale je možno také na výstupu použít lineární stabilizátor. DC/DC spínané měniče jsou běžně používány v obvodech napájených bateriemi.

V dnešní době se od lineárních AC/DC zdrojů začíná ustupovat a přecházet ke spínaným, i když jsou poměrně složité na návrh. Avšak hodně výrobců již velkou část součástek integruje do jednoho pouzdra a pro správnou funkci se doplní pouze několika externími součástkami.

Spínané zdroje se dají rozdělit do dvou větších skupin. Spínané zdroje pracující s kmitočtem sítě a pracující s kmitočtem vyšším než je síťový. Zdroje nebo stabilizátory pracující na síťovém kmitočtu většinou používají tyristory nebo triaky. Mají však malou přesnost stabilizace, jsou poměrně těžké a rozměrné z důvodů nutnosti chladičů výkonových polovodičových prvků. Jsou ale levnější než lineární zdroje a jejich užití není omezeno přenášeným výkonem. Spínání výkonových prvků je zdrojem rušení, proto je potřeba zdroje doplnit dobrou filtrací.

Více využívané jsou spínané zdroje pracující s vyšším kmitočtem než je síťový. Díky rychlému spínání výkonového prvku nedochází k tak výraznému zahřívání a není potřeba tak rozměrných chladičů. Výstupní napětí zdroje je snímáno a zásahy regulačního prvku jsou pouze v určitých časových intervalech a po dobu, která je potřebná. Regulační prvek, v tomto případě převážně tranzistor, pracuje jako ří-

zený spínač a dochází jen k jeho plnému otevírání a zavírání, tudíž u něj nedochází k takovým výkonovým ztrátám. Pro řízení se používají kmitočty nad pásmem slyšitelnosti, řádově desítky až stovky kHz. Ke spínání je potřeba ostrých hran impulsů a ty jsou zdrojem značného rušení. Proto je potřeba spínané zdroje doplnit o vhodné filtry, které toto rušení omezí. I přes tyto nevýhody se čím dál více prosazují i ve spotřební elektronice a umožňují tak použití jednoho přístroje v zemích, jež mají rozdílné parametry rozvodné sítě.

Regulace spočívá v časech sepnutí a rozepnutí spínače. Pro regulaci se používají tři varianty těchto časů. Doba sepnutí je konstantní a doba rozepnutí je proměnná. V druhém případě je doba rozepnutí konstantní a doba sepnutí proměnná. U těchto dvou způsobů je frekvence regulace proměnlivá. Daleko vhodnější je konstantní frekvence spínání a proměnlivá střída. V tomto případě se jedná o modulaci a je asi nejvyužívanější ve spínaných zdrojích.

Tyto spínané zdroje lze rozdělit do tří základních skupin podle pracovních režimů. Všechny ostatní už jsou víceméně jen jejich kombinací.

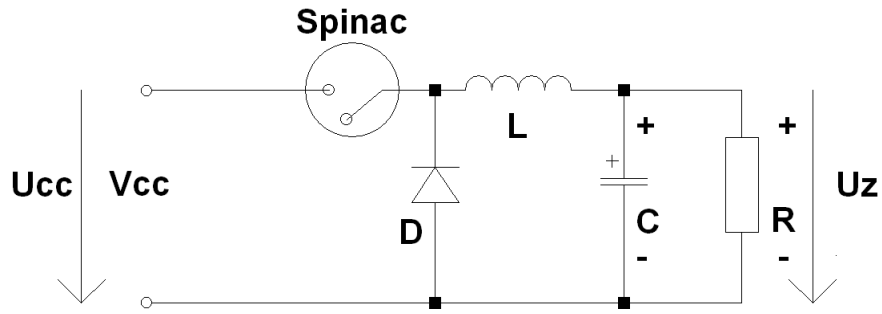
- **BUCK Step - down** (snižující), měnič snižující vysoké vstupní napětí na nízké požadované výstupní napětí
- **BOOST Step - up** (zvyšující), měnič zvyšující nízké vstupní napětí na požadované vyšší výstupní napětí
- **BUCK-BOOST** (invertující), výstupní napětí je opačné polarity oproti vstupnímu
- **CUK** Druh BUCK-BOOST měniče, měnič snižující i zvyšující vstupní napětí na požadované výstupní napětí

Následující popis měničů je v režimu spojitých proudů. To znamená, že proud cívkou  $L$  nikdy neklesne na nulu, takže se cívka buď jen nabíjí, nebo jen vybíjí. Stejně tak jsou uvažovány dokonalé součástky bez parazitních parametrů.

### 3.1 BUCK měnič

Snižující propustný měnič už podle názvu snižuje vstupní napětí na požadované nižší výstupní. Výstupní napětí může být maximálně rovno vstupnímu, nikoliv však vyšší. Jedná se zřejmě o nejpoužívanější typ měniče ve spotřební elektronice. Pro zjednodušení uvažujeme použití ideálních součástek. Spínač, který reguluje výstupní napětí, je zapojen mezi cívku, jež slouží k ukládání energie a napájecí napětí.

Zjednodušené zapojení měniče BUCK viz obr. 3.1 . Potřebné výstupní napětí se reguluje za pomoci spínání spínače. Když je spínač sepnut po dobu  $t_{on}$ , prochází cívkou s indukčností  $L$  proud ze zdroje napětí  $U_{cc}$  do zátěže s odporem  $R$ .



Obr. 3.1: Zapojení snižujícího měniče

Dioda D je polarizována v závěrném směru. Cívka se chová jako spotřebič a nabíjí se energií ze zdroje. Roste napětí na cívce

$$U_L = L \frac{dI}{dt} \quad (3.1)$$

a proud cívkou,

$$\frac{(U_{cc} - U_z)t_{on}}{L} = dI_1 \quad (3.2)$$

tím roste i napětí  $U_z$  na zátěži a filtračním kondenzátoru C. Při rozepnutí spínače doba  $t_{off}$  cívka převezme funkci zdroje se stejnou polaritou napětí jako má zdroj. Na začátku tohoto intervalu proud cívkou zachovává směr a velikost  $dI_1 = dI_2$ , ale bude klesat podle

$$U_L = L \frac{dI}{dt} \quad (3.3)$$

z toho dostaneme

$$\frac{(-U_z)t_{off}}{L} = -dI_2 \quad (3.4)$$

Když pro okamžik rozepnutí spínače tato rovnost platí, můžeme vyjádřit výstupní napětí jako

$$U_z = U_{cc} \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \quad (3.5)$$

Směr napětí na cívce se otočí. Obvod se uzavře přes diodu D. Cívka se tak vybíjí do zátěže a napětí na zátěži a kondenzátoru klesá. Střední hodnota napětí na zátěži

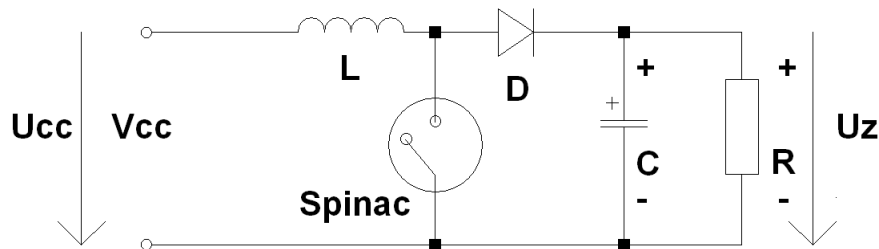
se tak rovná poměru časů (střídě), kdy je spínač sepnut a rozepnut. Zvlnění napětí a proudové zatížení je pak závislé na frekvenci spínání  $F_s$ . Z popisu funkce je zřejmé že měnič musí být pro svou funkci zatížen a že napětí na zátěži je vlivem nabíjení a vybíjení cívky zvlněné. Hodnotu indukčnosti lze potom spočítat podle vzorce (3.6). Pro minimalizaci zvlnění je připojen paralelně k zátěži filtrační kondenzátor C, jehož minimální velikost lze spočítat podle vzorce (3.7). Kmitočet zvlnění výstupního napětí  $U_z$  je roven kmitočtu spínání a vypínání spínače. Při dostatečně vysokém kmitočtu jde toto zvlnění dobře vyfiltrovat.

$$L = \frac{\left(1 - \frac{U_z}{U_{cc}}\right)}{F_s \Delta I} U_z = \frac{(U_{cc} - U_z) U_z}{U_{cc} F_s \Delta I}, \text{ kde } \Delta I = \frac{(1 - d)}{L F} U_z \text{ a } d = \frac{U_z}{U_{cc}} \quad (3.6)$$

$$C = \frac{\Delta I_L \Delta T}{\Delta U_z} = \frac{\Delta I_L}{8 F_s \Delta U_z} \quad (3.7)$$

## 3.2 BOOST měnič

Tento měnič dodává na výstup vyšší napětí než je vstupní. Zjednodušené zapojení měniče BOOST viz obr. 3.2 . Ve své podstatě je to měnič snižující, pouze jsou zaměněny vstup s výstupem. Při sepnutí spínače po dobu  $t_{on}$  prochází cívku proud a v ní jako spotřebiči se akumuluje energie. Proud do zátěže je dodáván z kondenzátoru, který je oddělen diodou v závěrném směru, aby nedocházelo k jeho vybíjení přes sepnutý spínač. V okamžiku rozepnutí spínače  $t_{off}$  přejde cívka do režimu zdroje. Zachovává směr svého proudu, ale změní se polarita jejího napětí, to se přičte k napětí zdroje.



Obr. 3.2: Zapojení zvyšujícího měniče

Toto vyšší napětí se potom přes diodu v propustném směru objeví na zátěži a začne se jím nabíjet kondenzátor. Výstupní napětí je potom dáno jako:

$$U_z = U_{cc} \frac{t_{on} + t_{off}}{t_{off}} \quad (3.8)$$

Jelikož se jedná o identický měnič pouze v jiném zapojení, platí pro výpočet i stejné vztahy (3.6) (3.7).

### 3.3 BUCK-BOOST měnič

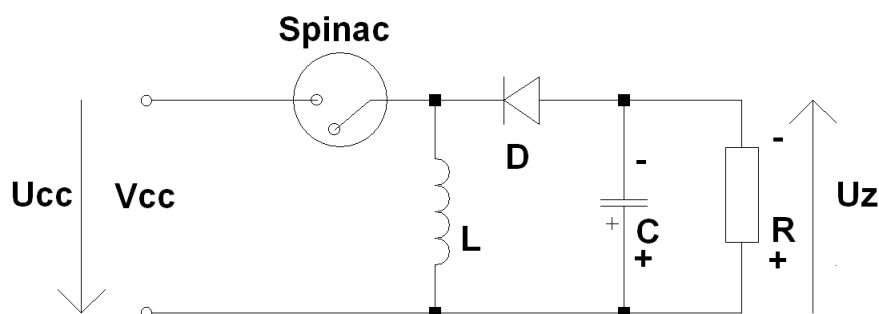
Invertující zapojení měniče. Na výstupu je tedy napětí opačné polarity oproti vstupnímu.

V době  $t_{on}$  (tranzistor sepnut) je na cívce napětí zdroje a ta se nabíjí proudem  $I_L$ , který prochází přes sepnutý tranzistor a cívku zpět do zdroje, dioda je polarizovaná v závěrném směru. V momentě vypnutí tranzistoru  $t_{off}$  si cívka zachovává směr procházejícího proudu a otočí se na ní napětí. Proud z cívky začne protékat do kondenzátoru a zátěže a uzavírá se přes propustně polarizovanou diodu. Kondenzátor se tedy nabíjí na napětí opačné polarity než má zdroj  $U_{cc}$ . Zjednodušené schéma je na obrázku 3.3. Střední hodnota napětí na cívce musí být nulová.

$$0 = \frac{U_{cc}t_{on} + U_z t_{off}}{t_{on} + t_{off}} \quad (3.9)$$

Z čehož dostáváme výstupní napětí:

$$U_z = -\frac{t_{on}}{t_{off}} U_{cc} \quad (3.10)$$



Obr. 3.3: Zapojení invertujícího měniče

### 3.4 CUK měnič

Jedná se o jiný druh BUCK-BOOST měniče, který je schopen snižovat i zvyšovat vstupní napětí na požadované výstupní napětí. Tento typ je vhodný například v konstrukcích napájených bateriemi. Když je článek plně nabit, tak měnič snižuje jeho napětí, a když napětí baterie klesne pod požadované výstupní napětí, tak měnič začne zvyšovat na požadovanou velikost výstupního napětí. Výstupní napětí tohoto měniče je také opačné oproti napětí vstupnímu. Zjednodušené zapojení viz obr. 3.4.

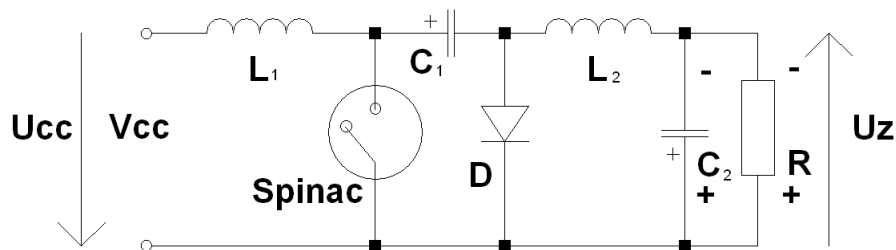
Po připojení vstupního napětí  $U_{cc}$  a rozepnutém spínači  $t_{off}$  teče proud cívku  $L_1$  jako zdrojem přes kondenzátor  $C_1$  a uzavírá se přes propustně polarizovanou diodu  $D$ . Kondenzátor  $C_1$  se nabíjí na napětí zdroje  $U_{cc}$  plus napětí na cívce  $L_1$ . Po sepnutí spínače  $t_{on}$  začne protékat proud přes cívku  $L_1$  jako spotřebičem zpět do zdroje přes sepnutý spínač. Současně se uzemní kladný pól kondenzátoru  $C_1$ , který se začne vybíjet do zátěže  $R$  paralelně s kondenzátorem  $C_2$  jenž se nabíjí a cívku  $L_2$ , která se také nabíjí. Následuje opět vypnutí spínače  $t_{off}$  a nabíjení kondenzátoru  $C_1$  s tím rozdílem, že cívka  $L_2$  již je nabita. Proud z cívky  $L_2$  pokračuje ve svém směru, napětí na cívce změní svou polaritu. Proud tedy protéká z cívky  $L_2$  jako zdroje přes propustně polarizovanou diodu  $D$  do zátěže  $R$  s paralelním kondenzátorem  $C_2$ , který se nabíjí. Střední hodnota napětí  $u_{L_1}$  musí být nulová.

$$U_{L_{1st}} = U_{cc}t_{on} - U_zt_{off} = 0 \quad (3.11)$$

Výstupní napětí tedy lze definovat jako:

$$U_z = U_{cc} \frac{t_{on}}{t_{off}} \quad (3.12)$$

Směr napětí odpovídá obrázku 3.4.



Obr. 3.4: Zapojení cuk snižujícího-zvyšujícího invertujícího měniče

### 3.5 PWM řízení DC/DC měniče

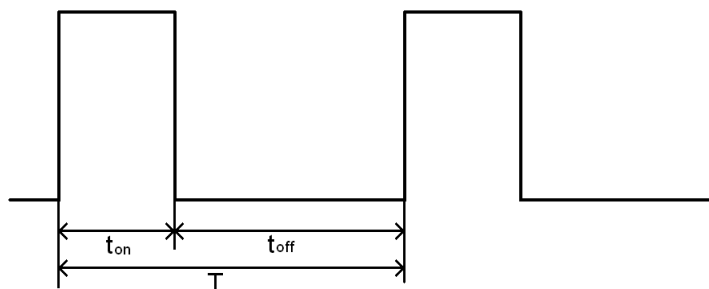
V předchozím textu zmiňované doby  $t_{on}$  a  $t_{off}$  jsou časy, po které je spínač buď sepnut nebo rozepnut. To je základní řízení spínaného DC/DC měniče. Tyto časy nejsou úplně libovolné, ale periodicky se opakují, takže mají nějakou frekvenci. Zobrazení těchto dob viz obr. 3.5. Jak řídit DC/DC měnič je možné třemi základními způsoby.

- První možností je pevná doba sepnutí spínače  $t_{on}$  a proměnlivá doba vypnutí  $t_{off}$ , tím se ale mění kmitočet řídicího signálu, ale může zde být problém s rušením jiných zařízení a i pronikání do slyšitelného pásma. Jedná se o PFM modulaci.
- Druhou možností je proměnlivá doba sepnutí  $t_{on}$  a konstantní doba vypnutí  $t_{off}$ . Kmitočet je ale taktéž proměnný jako v předchozím případě. Také PFM.
- Jako třetí je možné mít proměnlivé obě doby a konstantní dobu periody, tedy kmitočet. Tento řídicí signál je PWM regulace spínaného zdroje. Předchozí dva signály nebyly PWM.

Střidu lze potom definovat jako:

$$s = \frac{t_{on}}{T} \quad s \in (0, 1) \quad (3.13)$$

Když výstup měniče zatížíme větším proudem poklesne výstupní napětí, dojde ke změně střidy tak, aby se výstupní napětí opět zvýšilo. Zdroj tak reaguje na okamžitou velikost výstupního napětí.



Obr. 3.5: Pracovní cyklus spínače

## 4 SVÍTILNA PETZL

Petzl je jeden asi z nejznámějších výrobců těchto svítilen takzvaných „čelovek“. Jako variantu běžně vyráběné svítilny uvádím typ Petzl MYO XP, kterou dodává a prodává firma Vertical Sport [9] za cenu 1940 Kč.

Na serveru [www.svetoutdooru.cz](http://www.svetoutdooru.cz) ji rozebrali a provedli několik měření. Pro svítilnu je použita jedna výkonnová LED Luxeon o výkonu 3 W. Ta je s elektronikou umístěna v pouzdře na čele a za pomoci vodiče spojena s pouzdem baterie na temeni. Napájena je třemi kusy AA článků, ty už jsou však zřejmě dost těžké a výrobce vybavuje svítilnu horním páskem, aby zabránil sklouzávání při náročnějších pohybech. Svítilna je vybavena dvěma tlačítky a jednou indikační LED diodou. První tlačítko slouží jako vypínač a volič režimů, druhé pro aktivaci „BOOST“ režimu. Indikační LED dioda signalizuje míru vybití baterie. Voličem režimu lze svítilnu přepnout do tří režimů výkonu světla, vysoký výkon, nejlepší poměr mezi výkonem a výdrží a úsporný režim. Doplnkem je blikání. Režim „BOOST“ potom přepne na výkon o 50% vyšší než maximální a trvá po dobu stisku tlačítka, maximálně však 20 s. Doba je omezena z důvodu hlídání přehřátí. Elektronika hlídá teplotu Luxeonu a v případě nadměrného zahřátí sama ubírá dodávaný proud. Indikační LED dioda signalizuje stav nabití baterie blikáním, zeleně plné nabití, oranžově ze 70% vybité, červeně z 90% vybité a potřeba vyměnit baterie. Při napájení třemi alkalickými články s celkovým napětím 4,8 V je odběr vypnuté svítilny je cca 1 uA. U režimu maximálního výkonu je spotřeba 375 mA příkon 1,6 W, optimální výkon 195 mA, příkon 0,9 W, úsporný 65 mA 0,3 W a BOOST režim 780 mA, příkon 3,1 W. Výdrž při režimu *maximum* udává Petzl 70 h, což je doba určena podle jeho metody pro stanovení vzdálenosti a doby osvětlení. To ovšem neodpovídá reálnému použití svítilny a doba výdrže je podstatně nižší. Podle provedého měření je to přibližně okolo 7 h. Celá svítilna je klasifikovaná jako vodotěsná, podle konstrukce je však pouze vlhkou odolná [8].

## 5 PROTOTYP S OBVODEM LTC3453EUF

Pro výrobu prvního funkčního vzorku byl vedoucím diplomové práce panem Pavlou vybrán obvod LTC3453 od výrobce LINEAR TECHNOLOGY.

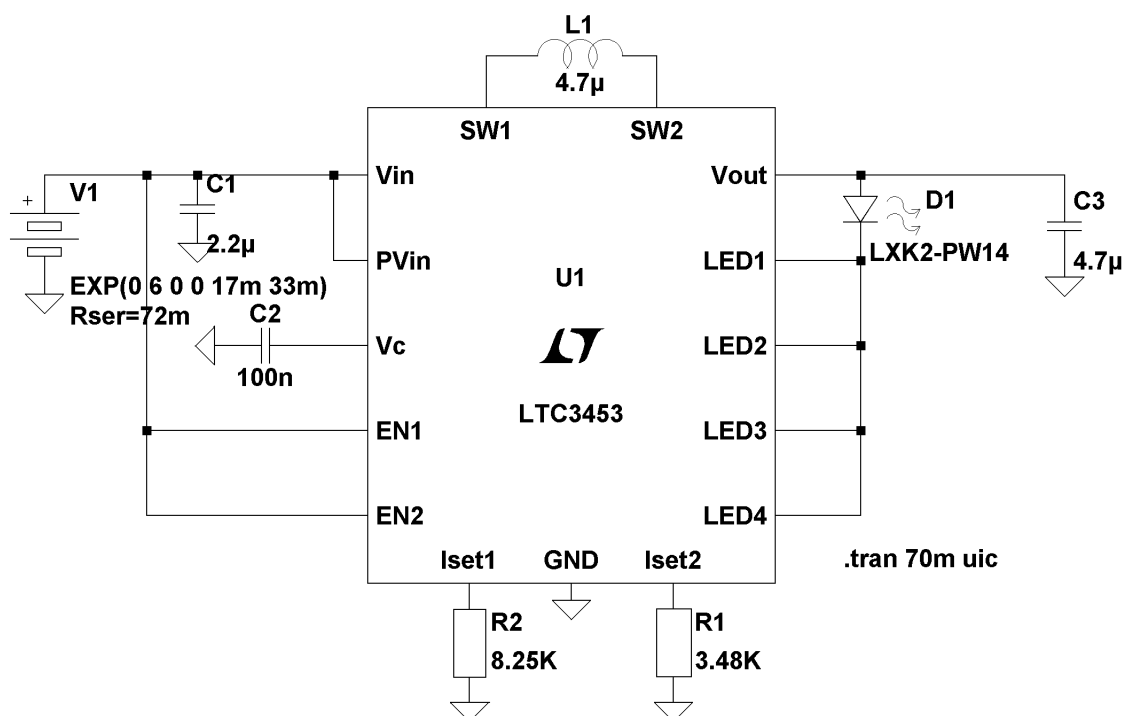
Tento obvod je primárně určen pro řízení vysoce svítivých LED, použitých jako blesk u fotoaparátů v mobilních zařízeních. Oproti technologii Xenonových výbojek má tu výhodu, že se díky své jednoduchosti a velikosti vejde i do míst, kam i ta nejmenší Xenonová výbojka s elektronikou nikoliv. Zápolem tohoto řešení je, že se nemůže svým světelným výkonem a vyzářeném spektru rovnat Xenonové výbojce, a proto se toto řešení doporučuje použít spíše u přístrojů se snímači obrazu s rozlišením do jednoho megapixelu.

LTC3453 je zkonstruován jako DC/DC měnič pracující na konstantní frekvenci 1 MHz. Běžné DC/DC měniče jsou konstruovány pro konstantní výstupní napětí při různém proudovém zatížení. Pro zajištění konstantního světelného výstupu je potřeba LED napájet měničem s konstantním výstupním proudem. Tohoto způsobu využívá právě obvod LTC3453.

Pro správnou funkci obvodu je zapotřebí pouze šesti externích součástek a podle katalogového listu je schopen pracovat s účinností až 90%, v rozpětí vstupního napětí 2,7 V až 5,5 V, při konstantním výstupním proudu až 500 mA. Obvod je v pouzdře QFN o velikosti 4x4x0,75 mm se sedmnácti vývody. Umožňuje řídit jednu až čtyři LED diody a podle velikosti vstupního napětí je schopen pracovat ve třech režimech a to jako synchronní BUCK, synchronní BOOST a BUCK-BOOST DC/DC měnič. Výstupní proud je možno nastavit za pomoci dvou vstupů Iset1 a Iset2, které jsou aktivovány piny EN1 a EN2. Tudíž je možno uvést obvod do čtyřech možných režimů, včetně režimu SHUTDOWN. V tomto režimu je odběr obvodu pouze 6 uA. Proti přetížení je vybaven tepelnou pojistkou, která vypíná obvod při 130°C s hysterezí 11°C. Dále je vybaven interním SOFT STARTem, kdy při připojení vstupního napětí zajišťuje pozvolný náběh napětí od 0,9 V do 2,1 V, což mu trvá 0,65 ms. Po jeho doběhnutí je vypnut a je možné jej resetovat pouze přechodem do režimu SHUTDOWN nebo podpětím, případně aktivací tepelné ochrany. Obvod je také vybaven ochranou proti přepólování nebo zkratu vývodů pro LED. Teplotní rozsah pro použití obvodu je -40°C až +85°C. Vnitřní zapojení obvodu pro snadnější pochopení jeho funkce viz obr. A.1 .

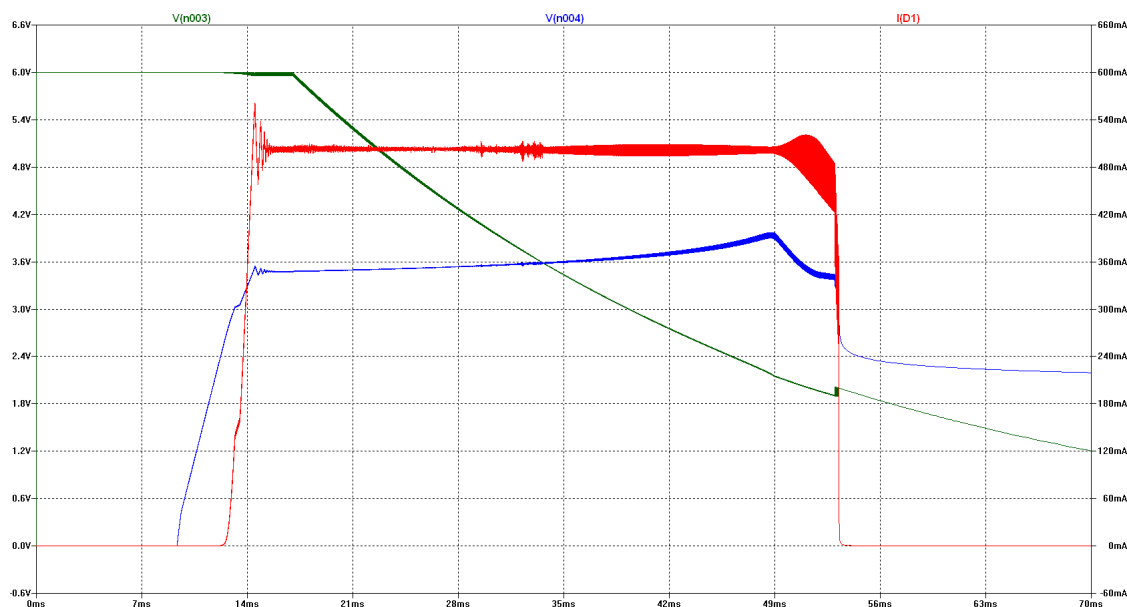
## 5.1 Simulace zapojení pro vzorek

Návrh vzorku začal simulací chování obvodu v programu pro návrh spínaných zdrojů od společnosti Linear Technology pod názvem LTspice/SwitcherCAD III a to ve verzi 2.21w. Jak bylo zmíněno v části 2.2 o akumulátorech, tak jsem se pokoušel sestavit model baterie, který by se v této simulaci právě využil pro získání co nejrealističtějších výsledků. Tento model se však kvůli složitosti nepodařilo sestavit. Obdobný model napájecího článku byl součástí SwitcherCADu ve verzi I. Ve verzi III již bohužel není a starší verze nejsou dostupné. I přes prostudování manuálu k tomu programu jsem obdobný model nenalezl, i když zdroj pojmenovaný jako battery obsažený je, chová se bohužel stejně jako klasický lineární zdroj. Proto jsem se alespoň pokusil nastavením tohoto zdroje přibližně simulovat provozní stav článků a jejich pozvolné vybíjení. Charakteristika tohoto zdroje je výrazně časově zkrácena, protože simulace je dosti náročná na výpočetní techniku, a na poměrně výkonném notebooku jedna simulace trvala okolo 10ti minut, v závislosti na nastavení simulace a napájecího zdroje. Obvodové zapojení užitá v programu SwitcherCAD viz obr. 5.1. Pro zapojení jsou ponechány i přesné hodnoty součástek udané výrobcem, i když jsou mimo řadu hodnot běžně vyráběných součástek. V nastavení aktivovaných obou vstupů EN1 a EN2, je výstupní proud nastaven hodnotami rezistorů  $R1$  a  $R2$ , jejich podrobný výpočet je uveden v následujícím kroku praktické realizace.

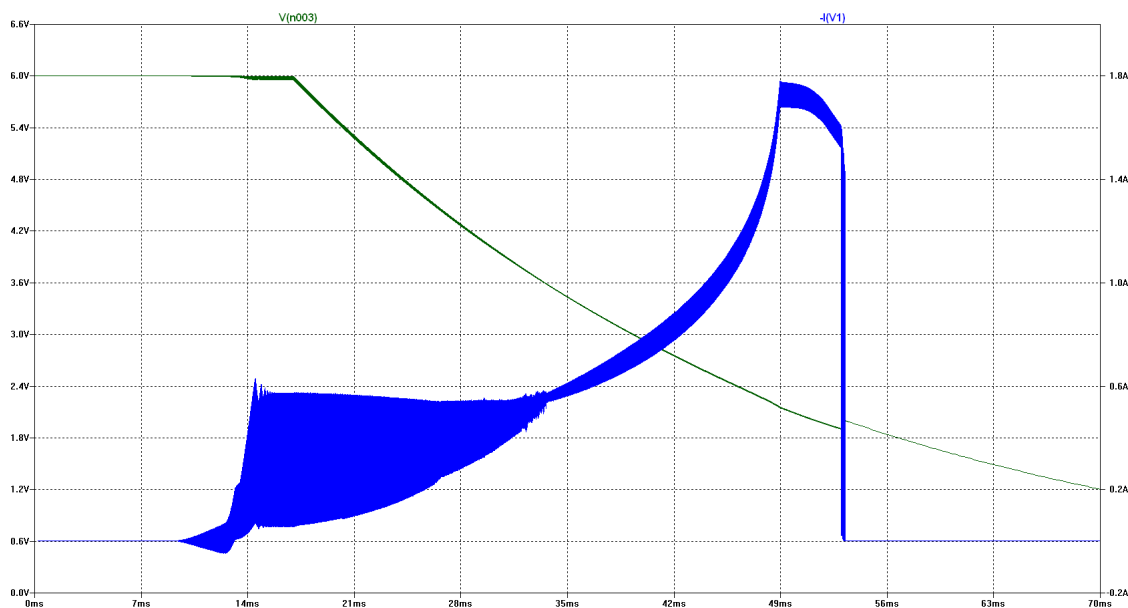


Obr. 5.1: Zapojení obvodu LTC3453 pro simulaci v obvodu SwitcherCAD III

Při aktivaci obou vstupů EN je proud nastaven na  $I = 500 \text{ mA}$ . Simulace, jak již bylo zmíněno, je zkrácena na pouhých 70 ms z důvodu délky simulování. V programu se mi nepodařilo nalézt žádnou volbu pro simulaci dlouhých časových úseků, jako je možné u jiných simulačních programů, proto je potřeba představit si tento úsek nikoliv jako milisekundy, ale jako hodiny, s pominutím faktu že konstantní napětí zdroje až do času přibližně 17 ms je z důvodu inicializace a soft startu obvodu LTC. Po ustálení vstupních parametrů je již simulace obdobná jako při pozvolném vybíjení akumulátoru viz graf. 5.2. Průběh označený jako V[n003] je průběh vstupního napětí na svorkách akumulátoru, popřípadě vstupního kondenzátoru  $C1$ . Průběh s označením V[n004] je výstupní napětí na vývodu Vout a také na LED. Průběh I[D1] je proud protékající LED diodou. V bodě, kde se křivka vstupního a výstupního napětí protnou, by mělo dojít uvnitř obvodu ke změně topologie ze snižujícího na zvyšující měnič, čemuž odpovídá i rozkmitaný průběh výstupního proudu, a za průsečíkem jeho částečné ustálení. Na druhém grafu 5.3 je potom zobrazen průběh vstupního proudu I[V1] a vstupního napětí V[n003]. Z tohoto grafu je patrné, že si obvod pro dodání proudu  $I = 500 \text{ mA}$  je schopen z akumulátoru odebrat až  $I = 1,8 \text{ A}$ , i když při poměrně malém napětí. Při průchodu takovýchto proudů obvodem v takto malém pouzdře je zřejmé, že se bude obvod dosti zahřívat a bude potřeba nějakého způsobu chlazení. Tím, že je určen do mobilních aplikací jako mobilní telefon a podobně, asi nebude vhodný pro kontinuální dodávání takto vysokých proudů.



Obr. 5.2: Graf ze simulace obvodu LTC3453

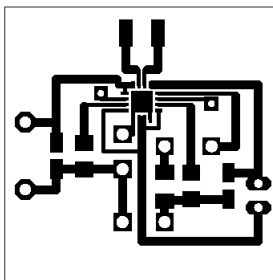


Obr. 5.3: Graf ze simulace obvodu LTC3453

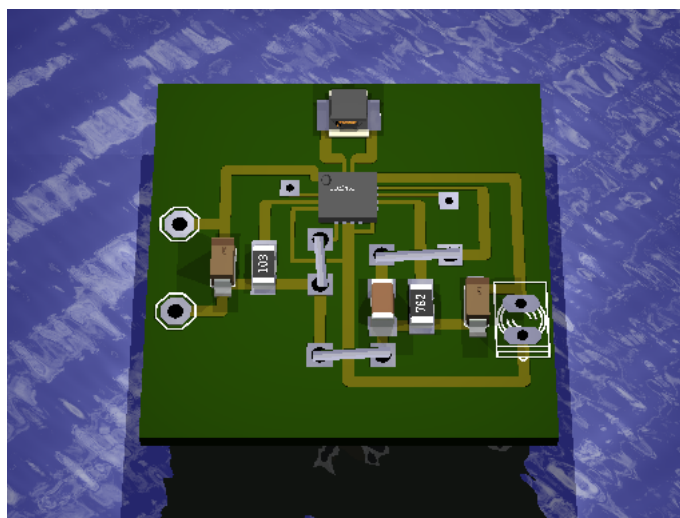
Tyto grafy jsou opravdu jenom simulací a nedá se moc předpokládat, že by se reálný obvod choval identicky. Průběhy, které mají větší šířku než ostatní, znamenají, že je hodnota velmi rozkmitaná. Stejně jako je rozkmitaný vstupní proud se dá předpokládat, že vstupní napětí nebude mít takto ideální průběh jako na grafu 5.3, i když je pro simulaci nastaven vnitřní odpor zdroje podle datasheetu k akumulátoru.

## 5.2 Vzorek číslo 1

První vzorek byl sestaven přesně dle doporučeného zapojení výrobce získaného z datasheetu k obvodu LTC3453UEF [7] s jedinou modifikací a to, že je místo čtyř LED použita jedna výkonová LED a všechny řídicí výstupy spojeny pro dosažení potřebného proudu LED diodou. Vzorek byl navrhnut jako co nejjednodušší s použitím co nejméně externích součástek, takže je naprosto identický s doporučeným zapojením výrobce. Deska plošného spoje byla navrhnutá na rozměry umožňující její zabudování do již zakoupené čelové svítilny Conrad, která byla původně osazena kryptonovou žárovkou bez jakékoliv řídicí elektroniky. Jelikož součástky navrhnuté výrobcem jsou pouze vypočtené, použil jsem pro konstrukci nejbližší hodnoty v řadě. V hodnotách nejsou velké rozdíly, takže by neměly znatelně ovlivnit chování obvodu oproti simulaci. Schéma pro návrh zůstává totožné jako pro simulaci, viz obr. 5.1. Navržená deska plošného spoje je na obrázku obr. 5.4. 3D návrh desky potom na obr. 5.5. Rozměr desky na obrázku 5.4 není 1:1, ale reálný rozměr je 30x30 mm. Deska byla osazena jako na 3D návrhu.

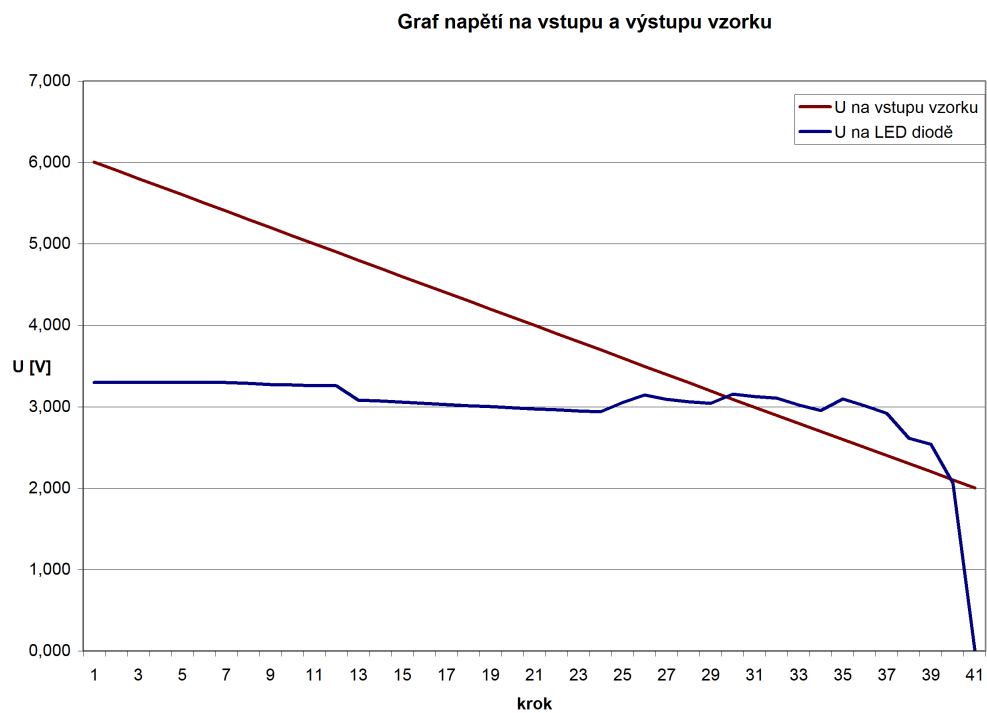


Obr. 5.4: Návrh desky plošného spoje prvního vzorku

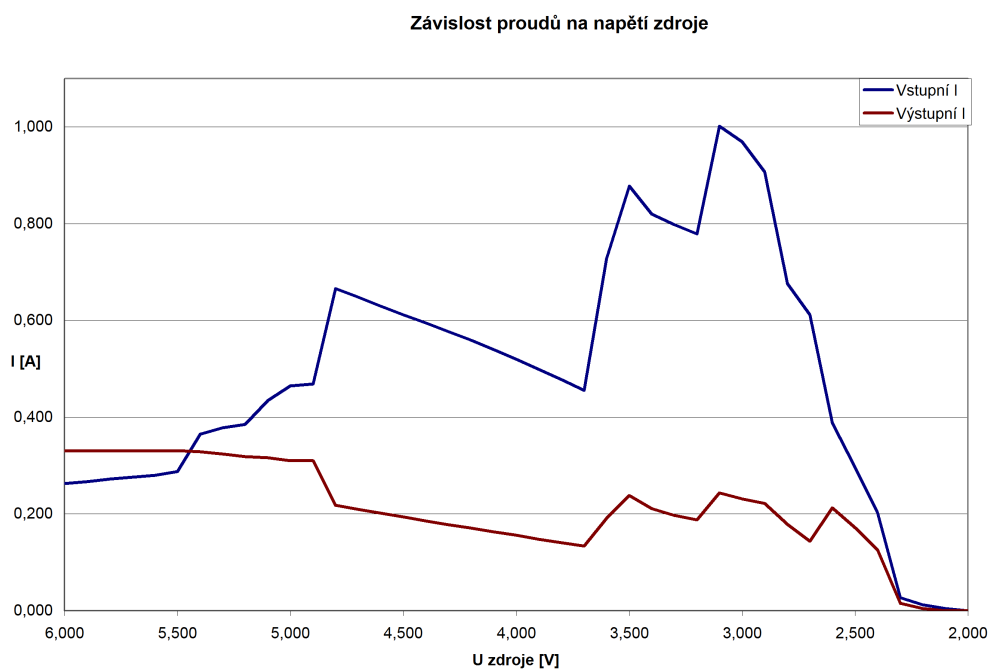


Obr. 5.5: 3D návrh desky plošného spoje

Po prvním zapnutí ale začala LED po pár sekundách v pravidelném rytmu blikat, což bylo způsobeno přehříváním obvodu a vypínáním tepelnou pojistkou. Deska byla bohužel navrhnutá tak, že nešlo přichytit žádný použitelný chladič a chlazení přes měděnou plošku pod obvodem bylo nedostatečné. Proto musel být jeden vývod EN uzemněn a obvod tak nastaven na proud  $I = 350 \text{ mA}$ , při kterém byl již schopen pracovat při napájení z baterie bez značného přehřátí. Následně byl pro tento proud odměřen, hodnoty viz tab. 2.2. Hodnoty v této tabulce jsou naměřeny metodou voltmetr před ampérmetrem na vstupu a ampérmetr před voltmetrem na výstupu. Takže vstupní ampérmetr měří skutečný proud odebíraný vzorkem, vstupní voltmetr potom napětí na sériové kombinaci ampérmetr a vzorek. Výstupní ampérmetr potom měří proud odebíraný ze vzorku paralelní kombinací LED a voltmetru. Použité přístroje viz tabulka B.4. Z tabulky jsou sestaveny grafy, v prvním je to závislost vstupního a výstupního napětí  $U$  na kroku, jako hodnoty osy  $x$  jsou zvoleny kroky, protože není možné udělat časovou závislost. Krok je tedy zvolen proto, aby bylo možno graf alespoň přirovnat ke grafu ze simulace.



Obr. 5.6: Průběhy vstupního a výstupního napětí vzorku



Obr. 5.7: Průběhy vstupního a výstupního proudu vzorku

Z grafů je viditelné že obvod se nechová podle předpokladů a není schopen udržet na výstupu konstantní proud ani napětí. Podle průběhu výstupního napětí je vidět, že změny průběhu odpovídají změnám průběhu výstupního proudu. Přesnou příčinu tohoto chování se mi nepodařilo určit, jako jednou z možných je opět přehřívání obvodu, které již ale nebylo jak určit, protože na LED nebyl patrný pokles jasu. Jako další možná je nevhodná cívka. Podle katalogových údajů je určena pro maximální proud  $I_{max} = 1,65$  A s vnitřním odporem  $R = 0,105 \Omega$ . S cívkou by tedy problém být neměl, ale nebylo jak to ověřit, protože jiná dostupná nebyla. Dále již tento vzorek nebyl upravován, s tím že v následujícím bude použit jiný kus tohoto obvodu s novými součástkami a pozměněným zapojením.

## 5.3 Vzorek číslo 2

Konstrukce dalšího vzorku navazuje na zapojení předchozího, ale je rozšířen o řídicí mikrokontrolér ATtiny 44, který se bude starat o řízení jasu LED. U obvodu LTC3453 je hned několik možností jak řídit jas připojené LED diody. První možností, která by přišla v úvahu, je rychlé přepínání řídicích vstupů EN a proměnnými délkami stavů zapnuto-vypnuto, a tak řídit výsledný jas LED. Tento způsob je přímo výrobcem udán jako velice nevhodný, protože by mohlo díky vnitřní logice docházet k nepředvídatelné činnosti obvodu a obvod na tento způsob není navrhnut, ani přizpůsoben. U vývodů EN jsou předpokládány pouze stavy vypnuto (log 0) a zapnuto (log 1). Na řízení výrobce pamatoval a tato schopnost je umožněna přes vstupy nastavení výstupního proudu ISET. U tohoto vstupu jsou čtyři možnosti jak řídit jas. První z nich je připojení regulovatelného napěťového zdroje, připojeného přes rezistor na jeden nebo oba vstupy Iset, rezistor zde slouží jako převodník napětí na proud. Obdobně je řešen druhý způsob, kdy je připojen přímo regulovatelný zdroj proudu. Jako třetí varianta je potenciometr zapojený do série s rezistorem. Tento způsob je za pomoci mikrokontroléru jen obtížně realizovatelný a vyžadoval by použití digitálního potenciometru. Proto je jako nejvhodnější, a zároveň i použitá, varianta s řízením za pomoci PWM. Signál PWM z mikrokontroléru je přiveden na integrační článek, na který je následně připojen rezistor na vstup nastavení proudu Iset. Jedná se v podstatě o stejný způsob jako při použití regulovatelného napěťového zdroje. S tímto způsobem řízení je ale potřeba upravit i zapojení pro obvod LTC.

První úprava je, že aktivační vstupy EN nejsou nastaveny napevno, ale jsou ovládány mikrokontrolérem. Podle vnitřní struktury, viz obr. A.1, je zřejmé, že na řízení není již potřeba druhého nastavovacího vstupu Iset. Přesto jsem tento vstup použil pro nezávislou možnost odměření obvodu bez vlivu mikrokontroléru, kde se

aktivuje pouze vstup, na kterém je použito nastavení proudu za pomoci rezistoru a vstup, který aktivuje řízení za pomoci PWM, se deaktivuje. Další úprava spočívá v přidání integračního článku na řídicí vstup Iset1 a přepočet rezistoru na vstupu Iset2. Výrobce je pro řízení za pomoci PWM doporučena frekvence vyšší než 5 kHz. Proto bylo zapotřebí zjistit, jaké možnosti PWM signálu poskytuje mikrokontrolér ATtiny 44. Protože se jedná pouze o převod PWM signálu na napěťovou úroveň, není potřeba velká přesnost tohoto signálu, ale spíše je vhodná vyšší frekvence. Tomu odpovídá u čítače-časovače 0 režim rychlé PWM. Rozdíl oproti normálnímu režimu je ten, že po dosažení vrcholu čítačem začíná od nuly a nečítá opačně zpět jak by tomu bylo u normálního režimu PWM. Tím je dosaženo až dvojnásobné frekvence oproti normálnímu režimu. Režim rychlé PWM se zvoleným, podle mne, nejvhodnějším nastavením pracuje tak, že začíná s vynulovaným čítačem 0 a zároveň nastaveným výstupem OCn do log 1. Jako vrchol čítače je automaticky nastavena hodnota 255. Za pomoci registru OCR0n potom nastavuji porovnávací práh pro PWM. Když čítač načítá hodnotu shodnou s prahem, nastaví se výstup OCn do log 0 a čítač čítá dál, až do dosažení hodnoty 255. Při překročení se jeho obsah vynuluje a OCR0n se nastaví do log 1, celý cyklus se opakuje. Při použití interního oscilátoru, který pracuje na kmitočtu 8 MHz a nastavené předděliče na nulu, je výpočet frekvence PWM následující:

$$F_{PWM} = \frac{F_{osc}}{255} = \frac{8000000}{255} \doteq 31373[Hz] \quad (5.1)$$

Podmínka  $F_{PWM} \geq 5 kHz$  je tedy splněna. Jako další je potřeba spočítat hodnotu rezistoru na vstupu Iset1. Z vnitřní struktury, viz obr. A.1, je vidět, že proud tekoucí LED diodou je nastaven čtyřmi vstupy LED1-4, takže výsledný proud je rozdělen na čtyři. Proud, který řídí tyto vstupy, je 384 krát menší. Z čehož vychází následující vztah na výpočet proudu LED diodou:

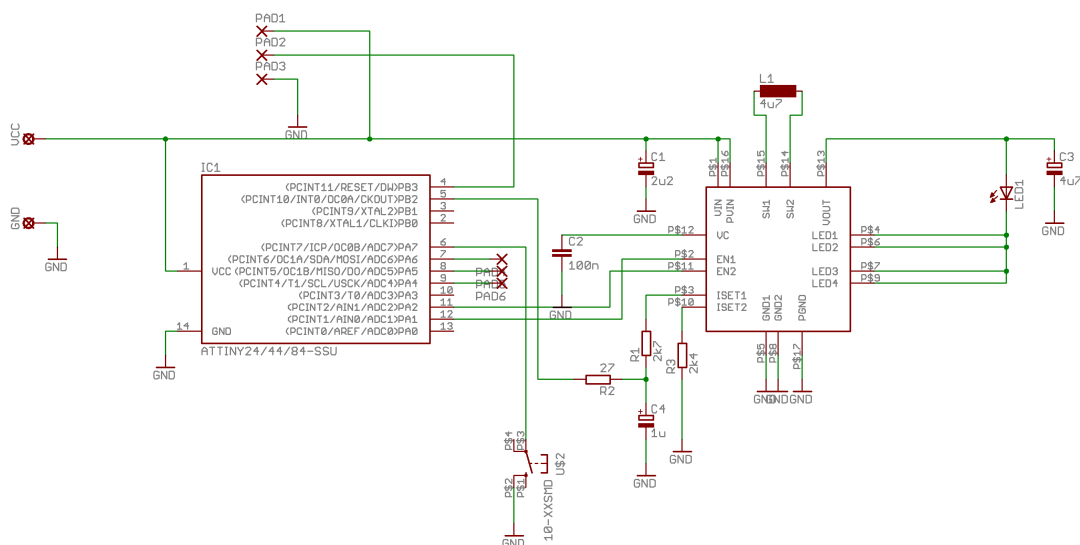
$$I_{LED} = 4 * 384 \frac{0,8}{R_{min}} [A] \quad (5.2)$$

$$R_{min} = 4 * 384 \frac{0,8}{I_{LED}} = 4 * 384 \frac{0,8}{0,5} = 2458[\Omega] \quad (5.3)$$

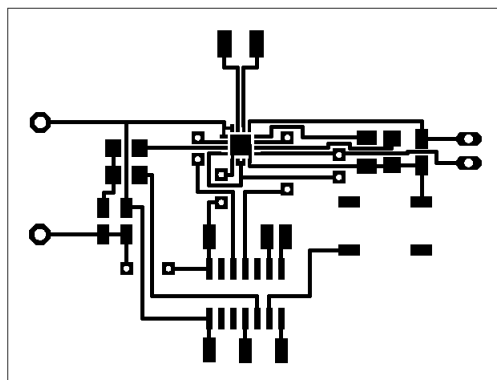
Rezistor na vstupu Iset by tedy měl být zvolen jako  $R_{SET} \geq 2458 \Omega$ , na tuto hodnotu je také zvolen rezistor na vstupu Iset2, pro pevné nastavení proudu LED diodou na 500 mA, rezistor v integračním článku jako  $\frac{R_{SET}}{100}$ . Proud LED diodou při řízení za pomoci PWM lze určit podle vztahu:

$$I_{LED} = 4 * 384 \frac{0,8 - (DC\% * V_{DVCC})}{R_{SET}} [A] \quad (5.4)$$

Schéma výsledného zapojení viz obr. 5.8. Vzorek byl taktéž sestaven jako na obr. 5.10, ale byl doplněn o pasivní chladič který odpovídá bílému čtverci na DPS obr. 5.9. Jelikož mikrokontrolér obsahuje rozhraní debugwire, které umožňuje ladění softwaru přímo v aplikaci, rozhodl jsem se jej použít. Pro odladění a programování přímo v aplikaci je použit vývojový kit AVR Dragon od Atmel Corporation. Ale již při připojení tohoto rozhraní nastaly problémy, Dragon nebyl schopen načíst korektní signaturu čipu. S počítačem komunikoval korektně, a proto jsem měnil nejrůznější nastavení, ale bez výsledku. Proto jsem si začal myslet, že jde o vadný obvod ATtiny, a ten byl tedy nahrazen zcela novým kusem. Signaturu se podařilo načíst a obvod uvést do režimu debugwire. Řídící program se pro ověření správného propojení s obvodem LTC3453 skládal pouze z inicializace ATtiny a zacyklení v nekonečné smyčce aktivující vývod EN2, který by měl uvést LTC3453 do režimu neřízeného výstupního proudu  $I = 500 \text{ mA}$ . Ladění se ale chovalo nekorektně, při vykonávání kódu programu docházelo k samovolným skokům a mikrokontrolér se náhodně restartoval. Proto byl režim debugwire deaktivován a program nahrán přímo do mikrokontroléru, Dragon ale nebyl schopen provést ověření zapsaného kódu. Začal jsem tedy hledat chyby mimo obvod ATtiny a rozhraní Dragonu, protože Dragon s pouze připojeným ATtiny fungoval správně. Tyto problémy způsobovaly hned dvě chyby, kterých jsem se dopustil při návrhu zapojení tohoto vzorku. První příčina je, že výrobce pro korektní funkčnost ATtiny doporučuje rozsah napájecího napětí 2,7 V až 5,5 V, kdežto napětí nabitě baterie je  $4 \times 1,5 = 6 \text{ V}$ , takže je potřeba napájecí napětí omezit na hodnotu 5,5 V. Druhý problém byl zjištěn při hledání příčiny velmi přehřívajícího se kondenzátoru v napájecí větvi pro LTC3453, když jsem si napájecí napětí zobrazil na osciloskopu. Díky pulsnímu režimu tohoto obvodu je napájecí napětí rozkmitané a pro pulsní aplikace je doporučeno užití LOW ESR kondenzátorů, což jsou kondenzátory s nízkým vnitřním odporem. Toto zvlnění mohlo mít za příčinu náhodné přeskokování v kódu mikrokontroléru, protože jsem opomenul blokování napájecího napětí přímo u nožiček mikrokontroléru. Tato deska bohužel kvůli svým rozměrům a použitým SMD součástkám neumožňovala tyto nedostatky odstranit a jelikož je osazení obvodu LTC3453 velice problematické a v domácích podmínkách nerealizovatelné, bylo potřeba oddělit napájení obou obvodů. Obvod LTC3453 byl tedy napájen z akumulátoru a mikrokontrolér přímo z desky Dragonu. V tomto zapojení již byla komunikace s Dragonem a nastavování vstupů LTC3453 korektní. Proto byl jednoduchým programem za pomoci tlačítka ovládan vstup EN2 pro možnost odměření obvodu v režimu bez řízení a s nastaveným výstupním proudem  $I = 500 \text{ mA}$ . Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce B.2. Použité přístroje viz tabulka B.4.

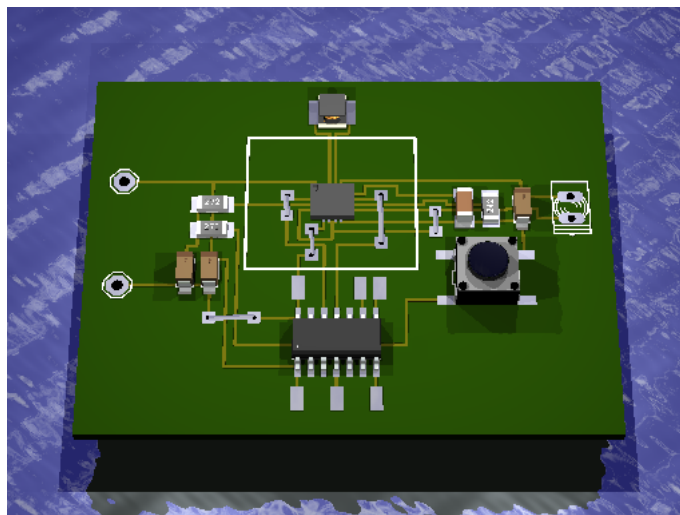


Obr. 5.8: Schéma zapojení vzorku s ATtiny



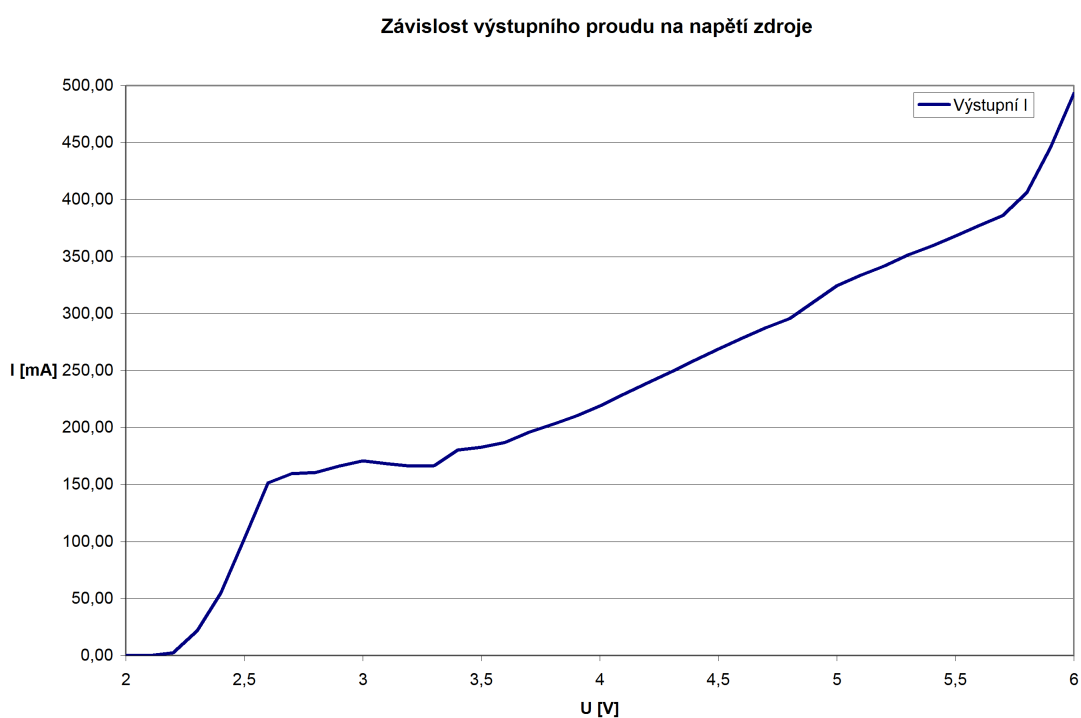
Obr. 5.9: Návrh desky plošného spoje druhého vzorku

Tento vorek již byl schopen pracovat i při nastavení výstupního proudu  $I = 500 \text{ mA}$ , avšak při nastavení vyššího napětí zdroje se obvod LTC opět začal přehřívat, i přesto, že již byl opatřen chladičem, který má několikrát větší plochu než pouzdro obvodu. Pro dokončení měření bylo potřeba na chladič pouštět intenzivní proud vzduchu pro ochlazení, jinak tepelná ochrana obvod vypínala. Nuceným chlazením se také začaly měnit parametry obvodu, a čím lépe byl chlazen, tím dodával větší výstupní proud. Chlazení se ale nedalo zajistit na konstantní teplotu, a tak nebylo měření přesné a objektivní. Přehřívání obvodu ale nebyl jediný problém a dost výrazně se začal přehřívat i kondenzátor v napájecí větvi pro LTC. Výrobce doporučuje tento kondenzátor keramický a s nízkým vnitřním odporem. Ty se mi ale v SMD pouzdře pro povrchovou montáž nepodařilo zakoupit, a proto byl nahrazen tantalovým typem, který by měl mít také nízký vnitřní odpor. Bohužel tato záměna nestačila a kondenzátor se přehříval dále, tento problém se mi nepodařilo odstra-



Obr. 5.10: 3D návrh desky plošného spoje

nit. Při hledání problému byly vyzkoušeny tři úplně nové obvody LTC a nahrazeny všechny součástky za nové, ale beze změny. Z naměřených hodnot byl sestaven graf 5.11, který se nedá ale považovat za přesný a je spíše na ukázkou nesprávného chování obvodu.



Obr. 5.11: Závislost výstupního proudu na napájecím napětí druhého vzorku

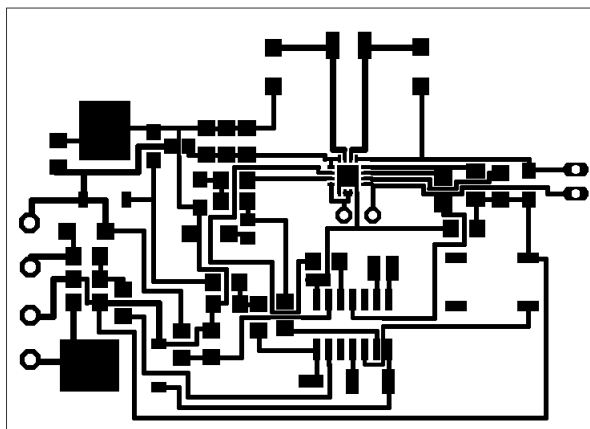
Z grafu je viditelné, že obvod i přesto že LED svítí dostatečným jasnem, tak se nechová podle předpokladů a není schopen na výstupu dodat konstantní proud. Na tomto vzorku je tato skutečnost výrazně zřetelnější než v předchozím případě. Proto jsem se pokusil zprovoznit druhý vstup řízený za pomoci PWM, zda se při nižším proudu nebude obvod chovat již správně, ale po naprogramování mikrokontroléru a zprovoznění PWM jsem zjistil, že regulace funguje pouze do střidy PWM signálu 16%. Problém byl v tom, že obvod LTC neumí pracovat přímo s PWM signálem, ale pouze za pomoci externích součástek jej převádí na konstantní napětí, za pomoci kterého se nastavuje vstup Iset. Ten reguluje pouze v rozmezí 0 V až 0,8 V, což odpovídá přibližně střídě 16% při výstupu 5 V z mikrokontroléru. Kvůli nemožnosti oprav chyb na desce plošného spoje bylo potřeba navrhnout další desku, která by tyto problémy opravila.

## 5.4 Vzorek číslo 3

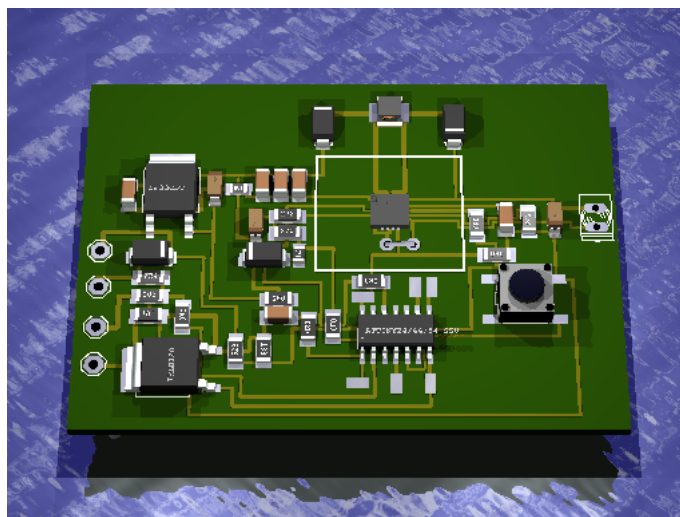
Poslední vzorek vychází ze schématu na obr. 5.8, které je ale upraveno pro odstranění chyb v předchozím vzorku a doplněno o dva obvody pro rozšíření vzorku, v případě že se podaří odstranit problémy s obvodem LTC3453. Přehřívající se kondenzátor v napájecí větvi obvodu LTC je nahrazen paralelní kombinací třech menších. Toto zapojení by mělo snížit vnitřní odpor této kombinace a nepatrně zvýšit výslednou kapacitu. K cívce jsou doplněny Shottkyho diody pro zvýšení účinnosti, jak uvádí datasheet. Doplněn je blokovací kondenzátor v napájení ATtiny a ten je napájen stabilizátorem 3,3 V, který by měl odstranit problémy s funkčností mikrokontroléru při napájení ze stejného zdroje jako obvod LTC. Protože i stabilizátor potřebuje vyšší napájecí napětí než má na výstupu, je zvolen typ s nízkým úbytkem. Takže proto, aby byl schopen dodávat stabilizované výstupní napětí 3,3 V, potřebuje napájecí napětí nejméně 3,5 V. Pod toto napětí by se články neměly vybit, protože jako maximální mez vybití Ni-MH článku je doporučené napětí 0,9 V na článek, což je 3,6 V na baterii. Pro možnost této detekce je doplněn odporový dělič, složený z rezistorů R4 a R5, které převádí napětí z baterie tak, aby maximální napětí baterie při nabíjení což je  $4 * 1,7 = 6,8$  V, bylo možné převést A/D převodníkem s interní referencí 1,1 V. Zároveň tento dělič slouží i pro případné nabíjení k možnosti detekce  $-\Delta U$ . Do napájecí cesty pro LTC je zapojena dioda, která má za účel snížit maximální napětí baterie přibližně z 6 V na 5,3 V, protože u předchozího vzorku byl pozorovatelný pokles jasu při překročení 5,5 V. V případě že dioda nebude zapotřebí, je možno ji nahradit propojkou. Také byl problém s velkým napětím, které dával výstup PWM, a nebylo možno využít celý rozsah změny střidy signálu. Proto jsou

Obr. 5.12: Schéma zapojení vzorku s ATtiny a rozšiřujícími obvody

46

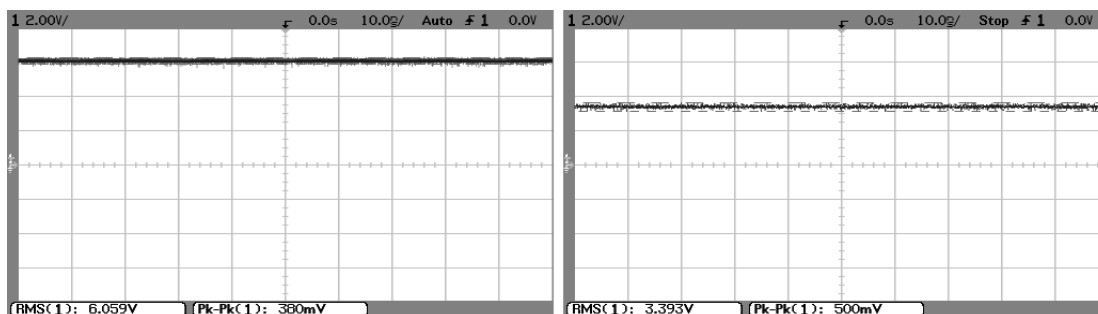


Obr. 5.13: Návrh desky plošného spoje třetího vzorku



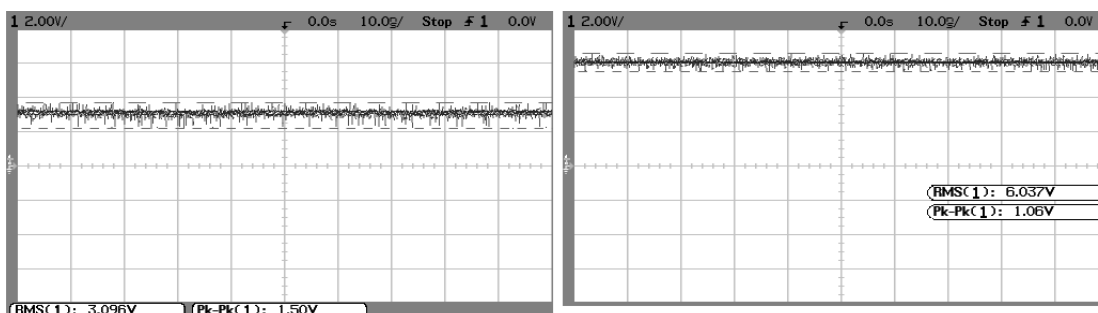
Obr. 5.14: 3D návrh desky plošného spoje

Při odpojení vzorku od napájení a připojení napájení pouze na mikrokontrolér, byla opět komunikace bezchybná. Za problémy tedy mohl aktivní obvod LTC, přerušil jsem tedy cestu napájení mikrokontroléru a oba obvody napájel samostatně jako v případě vzorku dva. Po aktivaci LTC se problém opět opakoval narozdíl od vzorku dva a nebylo tedy možno použít rozhraní debugwire. Proto jsem přistoupil k hledání příčiny za pomoci digitálního osciloskopu. Po aktivaci obvodu LTC a rozsvícení LED diody byly zobrazeny průběhy napájecího napětí na vstupu vzorku obr. 5.15a), napájecího napětí přímo na pinu mikrokontroléru obr. 5.15b) a výstupní napětí na LED diodě obr. 5.16a). Napájecí napětí byly mírně rozkmitané, ale to by nemělo způsobovat problémy v běhu mikrokontroléru. Po připojení sondy osciloskopu na vývod EN došlo ke zvýšení jasu LED, takže při aktivaci pouze mikrokontrolérem, díky jeho nesprávné funkčnosti, došlo k aktivaci LTC v neurčitým stavu. Následně



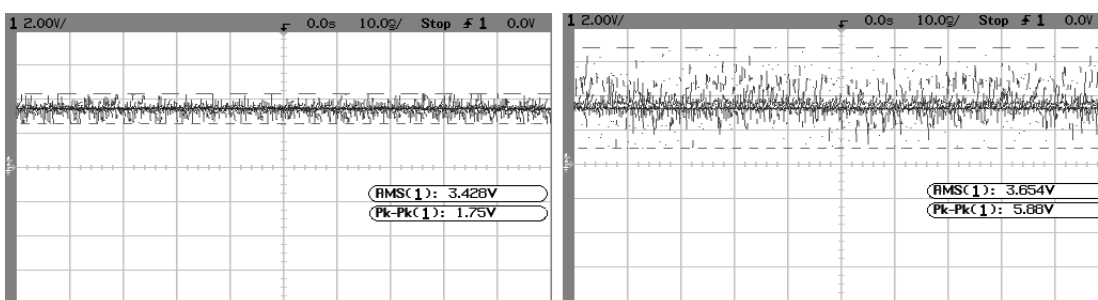
Obr. 5.15: a) napájecí napětí vzorku b) napájecí napětí mikrokontroléru

byly tyto napětí opět zobrazeny na 5.16 a 5.17. Při vyšším výstupním výkonu je zřetelné daleko větší rozkmitání vstupního i výstupního napětí, které by již mohlo způsobovat problémy, ale pro napájení mikrokontroléru by mělo být pořád dostačující.

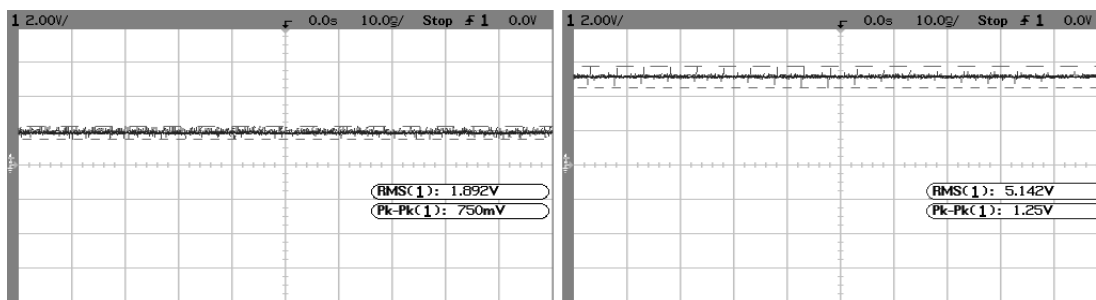


Obr. 5.16: a) napětí na LED diodě b) napájecí napětí vzorku

Průběh na vstupu EN při deaktivovaném obvodu LTC je zobrazen na obr. 5.18a) a na obr. 5.19a) je porovnání při napájení mikrokontroléru z Dragonu a odpojeném obvodu LTC od napájení. Z těchto průběhů je viditelné, že by napětí pro log1 na tomto vývodu mělo odpovídat zhruba napájecímu napětí mikrokontroléru, stejně jako tomu je na obr. 5.18b) a c).

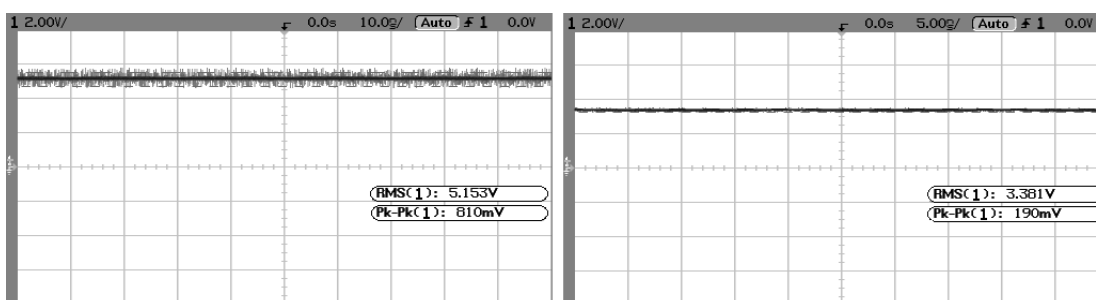


Obr. 5.17: a) napájecí napětí mikrokontroléru b) napětí na LED diodě



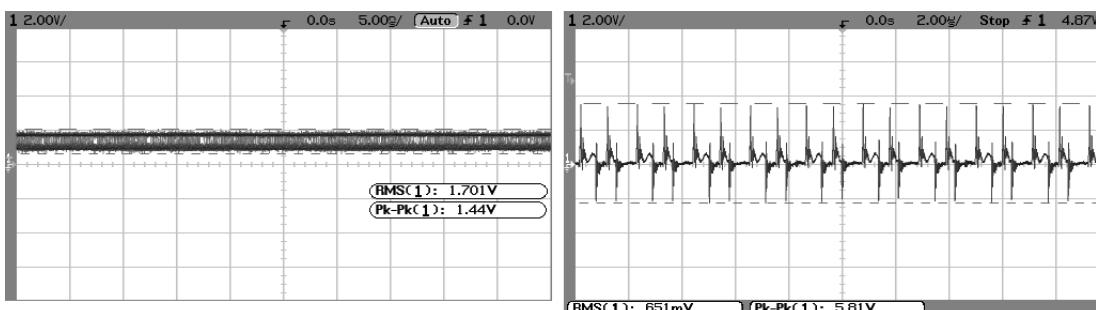
Obr. 5.18: a)log1 na vývodu EN b)napájecí napětí mikrokontroléru z Dragonu

Z toho lze vyvodit, že problém je v napájení mikrokontroléru, když je připojen na stejný zdroj jako obvod LTC. Z desky plošného spoje jsem tedy odpájel všechny součástky propojující mikrokontrolér a obvod LTC. Průběh na obr. 5.19b) je úroveň log1 při napájení mikrokontroléru ze stabilizátoru na desce vzorku.



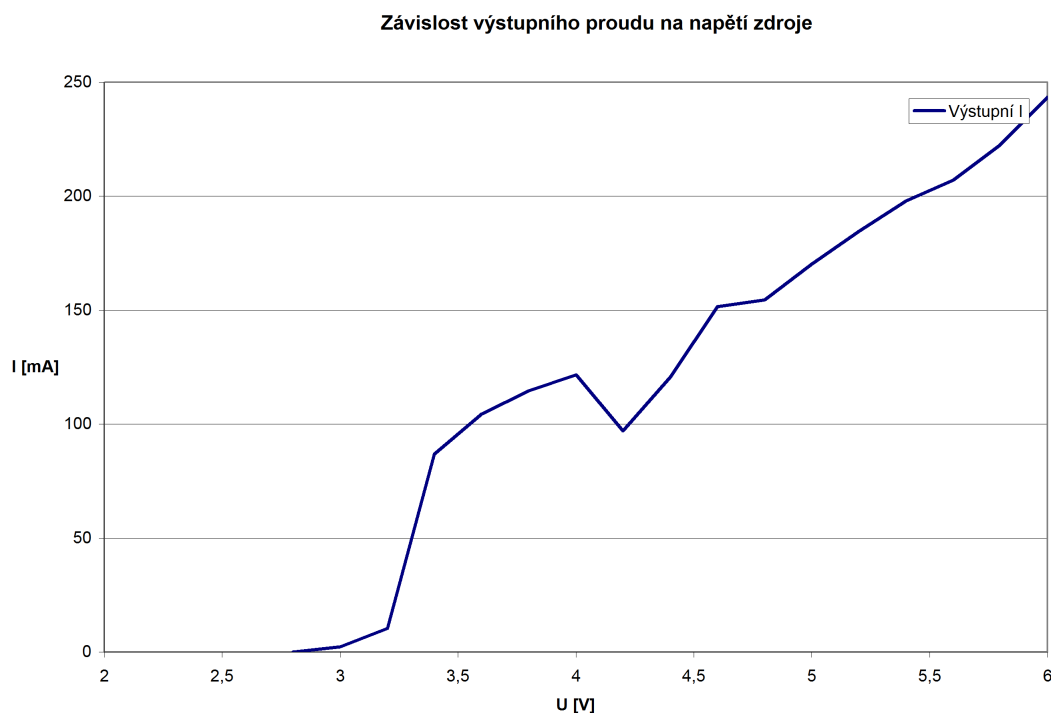
Obr. 5.19: a)log1 na vývodu EN napájení z Dragonu b)log1 na vývodu EN

Na obr. 5.20a) je tentýž výstup po připojení k obvodu LTC a svítící LED diodě a zobrazuje nefunkčnost mikrokontroléru. Z toho, že je mikrokontrolér schopen pracovat pouze v případě, že je obvod LTC odpojen od napájení a není mezi nimi žádná vazba, nemůže být příčinou rušení v napájecím napětí,



Obr. 5.20: a)log1 na vývodu EN při svítící LED b)průběh na pinu GND mikrokontroléru

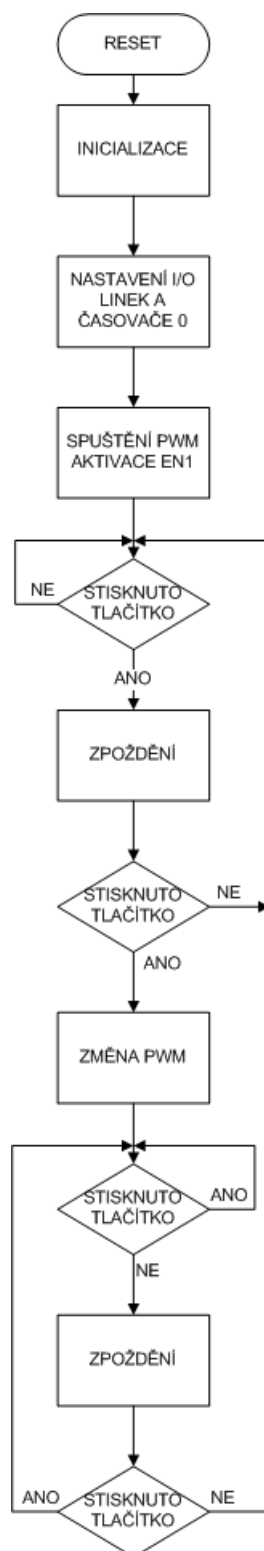
protože nefunguje ani při odděleném napájení obou obvodů. Příčina může být jediné v přenosu rušení vyzářeném obvodem LTC a okolními součástkami nebo přenosem přes zemní vodiče, což se potvrdilo po připojení osciloskopu na pin GND mikrokontroléru. Jak je vidět na obr. 5.20b), je na tomto vývodu rušení s amplitudou špička-špička téměř 6 V a to je zřejmě příčina všech potíží na tomto vzorku. Na řešení jak toto rušení odstranit při použití této desky plošného spoje jsem nepřišel, a proto již nemělo dále smysl tento vzorek vyvíjet. Na vzorku byl tedy alespoň odpojen obvod mikrokontroléru a výstup EN2 aktivován. Obvod byl poté odměřen pro nastavení výstupního proudu na 500 mA. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce B.3. Výsledný graf je na obr. 5.21. Použité přístroje viz tabulka B.4. Z grafu je vidět, že obvod nedodával potřebný výstupní proud 500 mA a průběh křivky je dosti strmý. Ani na tomto vzorku tedy nebyly odstraněny chyby způsobující přehřívání obvodu, ani problém s velikostí výstupního proudu.



Obr. 5.21: Závislost výstupního proudu na napájecím napětí třetího vzorku

## 5.5 Program

Pro možnost ověření funkčnosti obvodu LTC jsem napsal jednoduchý program, který za pomoci jednoho tlačítka aktivuje nebo deaktivuje řídicí vstupy EN. U vzorku tři je pozměněn a aktivuje vstup EN určený pro PWM řízení a tlačítkem se mění PWM v pěti krocích. Program je velice jednoduchý a proto jsem zvolil softwarové ošetření zákmitů tlačítka. Jiná možnost by byla použití vnějšího přerušení generovaného tlačítkem. Funkce programu je znázorněna ve vývojovém diagramu viz obr. 5.18. Program měl být dále upravován a rozšiřován, například o měření napájecího napětí a zabránění vybití pod 0,9 V na článek či nabíjení baterie. To ale nebylo možno kvůli nefunkčnosti celého zapojení provést, protože by nebylo na čem program prakticky otestovat a upravit jej podle požadavků zapojení.



Obr. 5.22: Vývojový diagram programu užitého ve vzorku tři

## 6 ZÁVĚR

V první části jsem se obeznámil s částí dostupných zdrojů světla a srovnáním jejich parametrů oproti polovodičovému zdroji světla LED diodou, s kterou pracuji v této diplomové práci. Jelikož se jedná o mobilní zařízení, bylo také potřeba zjistit, jaké jsou možnosti napájecích zdrojů pro takováto zařízení, a to hlavně běžně dostupné dobíjecí akumulátory. Podle provedeného porovnání potom byl vybrán jeden konkrétní typ. I když se nejedná o parametricky nejlepší typ akumulátoru, dal jsem přednost nové technologii ve výrobě dobíjecích článků, která zajišťuje dostatek energie i při dlouhé době skladování. Domnívám se, že články podobného typu jako je SANYO eneloop a GP ReCyko, budou ještě nějakou dobu v určitých zařízeních bezkonkurenční. V další části práce jsem uvedl přehled možných zapojení spínaných DC/DC měničů a jejich základní vlastnosti. Jedná se o základní zapojení, ze kterých poté vycházejí i další složitější měniče, ale základní princip zůstává stejný. Vedoucím práce panem Pavelkou byly zajištěny obvody LTC3453 pro testování. Tyto obvody nejsou běžně dostupné na našem trhu, a proto bylo možno vycházet pouze z technických listů přímo od výrobce. Jedná se o obvod, který je schopen pracovat ve všech třech režimech spínaného zdroje a pracuje na frekvenci 1 MHz, což umožňuje použití miniaturních externích součástek. Na tomto obvodu byly následně založeny tři zapojení, ve kterých se měly ověřit parametry udané výrobcem. První zapojení vycházelo přesně z doporučeného zapojení výrobce, a proto se předpokládalo, že se parametry zkonstruovaného vzorku nebudou výrazně lišit od provedené softwarové simulace obvodu. Pro nastavení výstupního proudu na 350 mA byly naměřené parametry obdobné jako u simulace, i když obvod nedržel konstantní úroveň výstupního proudu a napětí. Pro požadované nastavení výstupního proudu 500 mA, potom obvod nebyl schopen pracovat téměř vůbec, protože docházelo k výraznému přehřívání obvodu a jeho vypínání tepelnou ochranou. I přes jednoduchost tohoto zapojení se mi nepodařilo dosáhnout správné funkčnosti a předpokládaných výsledků. Nefunkčnost toho vzorku mohla být způsobena užitím nevhodných součástek nebo nesprávným návrhem desky plošného spoje. Při konstrukci dalšího vzorku jsem se některé domnělé problémy pokusil odstranit a doplnil zapojení o mikroprocesor, který měl regulovat jas LED diody. Tento vzorek již byl navržen pro použití pasivního chlazení obvodu LTC. Při prvním měření jsem ale zjistil neurčité chování mikrokontroléru. Po oddělení napájení obou obvodů již mikrokontrolér fungoval správně, a proto jsem předpokládal problém v napájecí větvi, která byla společná pro oba obvody. I když jsem vyřešil problém s nefunkčností mikrokontroléru, tak se obvod LTC opět nechoval podle předpokladů, což je vidět z naměřeného grafu u daného vzorku. Na tomto vzorku byl použit hliníkový chladič, který byl několikanásobně větší než samostatný obvod LTC, a i přesto docházelo k jeho přehřívání a vypínání. U tohoto vzorku se

přehřívaly i některé externí součástky. Při návrhu posledního vzorku jsem se pokusil minimalizovat možný vliv nesprávných součástek a vyřešit problém s napájením obvodů. Předpokládal jsem, že tímto by měly být odstraněny závažné problémy, které způsobovali nefunkčnost předchozího vzorku, a doplnil jsem jej o některé rozšiřující obvody. Po zkonstruování posledního vzorku a jeho měření, jsem ale zjistil ještě horší chování než u předchozího vzorku. Při hledání problému jsem zjistil, že nebyl problém v napájení obvodů, jak jsem se domníval, ale že na vzorku je dost výrazné rušení, které se přenáší zemním vodičem. Toto rušení způsobovalo úplnou nefunkčnost mikrokontroléru a zřejmě i nízký výstupní proud obvodu LTC. Protože jsem nepřišel na způsob, jak tento problém odstranit na již hotovém vzorku, tak jsem nebyl schopen doplnit program o rozšiřující možnosti měření napětí baterie a její nabíjení. Kvůli nefunkčnosti mikrokontroléru by nebylo kde tato rozšíření odzkoušet a odladit. Nefunkčnost posledního vzorku byla s největší pravděpodobností způsobena nesprávným návrhem desky plošného spoje. Pro odstranění tohoto problému by zřejmě bylo potřeba navrhnout dvoustranou desku plošného spoje, čímž by se dosáhlo i potřebné miniaturizace. Tuto desku by, již vzhledem k velikosti obvodu LTC a jeho pinů, bylo potřeba zadat ke strojové výrobě. Bohužel se mi nepodařilo sestavit funkční zapojení tohoto obvodu a odměřit parametry udané výrobcem.

## LITERATURA

- [1] *BatteryUniversity* [online]. 2003, poslední aktualizace 11.2006 . Dostupné z URL: <<http://www.batteryuniversity.com>>.
- [2] *Bateria Slaný* [online]. 2007 Dostupné z URL: <<http://www.bateria.cz>>.
- [3] Datasheet k obvodu firmy SEOUL SEMICONDUCTOR. *PowerLed x11191-2.pdf*. 2005, poslední aktualizace 9. 2005 .
- [4] *Datasheet k obvodu firmy GP Batteries GP270AAHC-f1.pdf* [online]. CRS3868, rev0.1. Dostupné z URL: <<http://www.gpbatteries.com.hk>>.
- [5] *Jak fungují nabíječky* [online]. 2004, 7. 2004 . Dostupné z URL: <<http://www.cettra.cz>>.
- [6] *LED* [online]. 2007, poslední aktualizace 2.11.2007 . Dostupné z URL: <<http://cs.wikipedia.org>>.
- [7] LINEAR TECHNOLOGY CORPORATION *LTC3453 - Synchronous Buck-Boost High Power White LED Driver* [online]. 2006, 17. 2. 2006 . Dostupné z URL: <<http://www.linear.com>>.
- [8] MACHÁČEK, P. *Čelovka Petzl MYO XP* [online]. 2005, poslední aktualizace 20. 11. 2005 . Dostupné z URL: <<http://www.svetoutdooru.cz>>.
- [9] *Myo XP* [online]. 2007. Dostupné z URL: <<http://www.vertical.cz>>.
- [10] NOVOTNÝ, V., VOREL, P., PATOČKA, M. *Napájení elektronických zařízení* [online]. 2002, poslední aktualizace 15. 11. 2002 . Dostupné z URL: <<http://www.feec.vutbr.cz>>.
- [11] PIHAN, R. *Umělé světlo - 3. Horké zdroje* [online]. 2007, poslední aktualizace 17. 8. 2007 . Dostupné z URL: <<http://www.fotografovani.cz>>.
- [12] *Srovnávací test dobíjecích tužkových (AA) baterií* [online]. 2007, poslední aktualizace 16. 7. 2007 . Dostupné z URL: <<http://www.fotonmag.cz>>.
- [13] VOJÁČEK, A. *Spínané zdroje s integrovanými obvody Freescale* [online]. 2007, poslední aktualizace 19. 9. 2007 . Dostupné z URL: <<http://hw.cz/novinky/freescale/>>.

## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

LED světlo-vyzařující dioda – Light-Emitting Diode

NiCd nickel cadmium – nickel oxihydroxid a metallic cadmium použité jako elektrody

NiMH nickel metal hydride – nickel oxihydroxid a hydrogen-absorbující slitina použité jako elektrody

PWM Pulse Width Modulation – pulsně šířková modulace, konstantní perioda ale proměnná střída

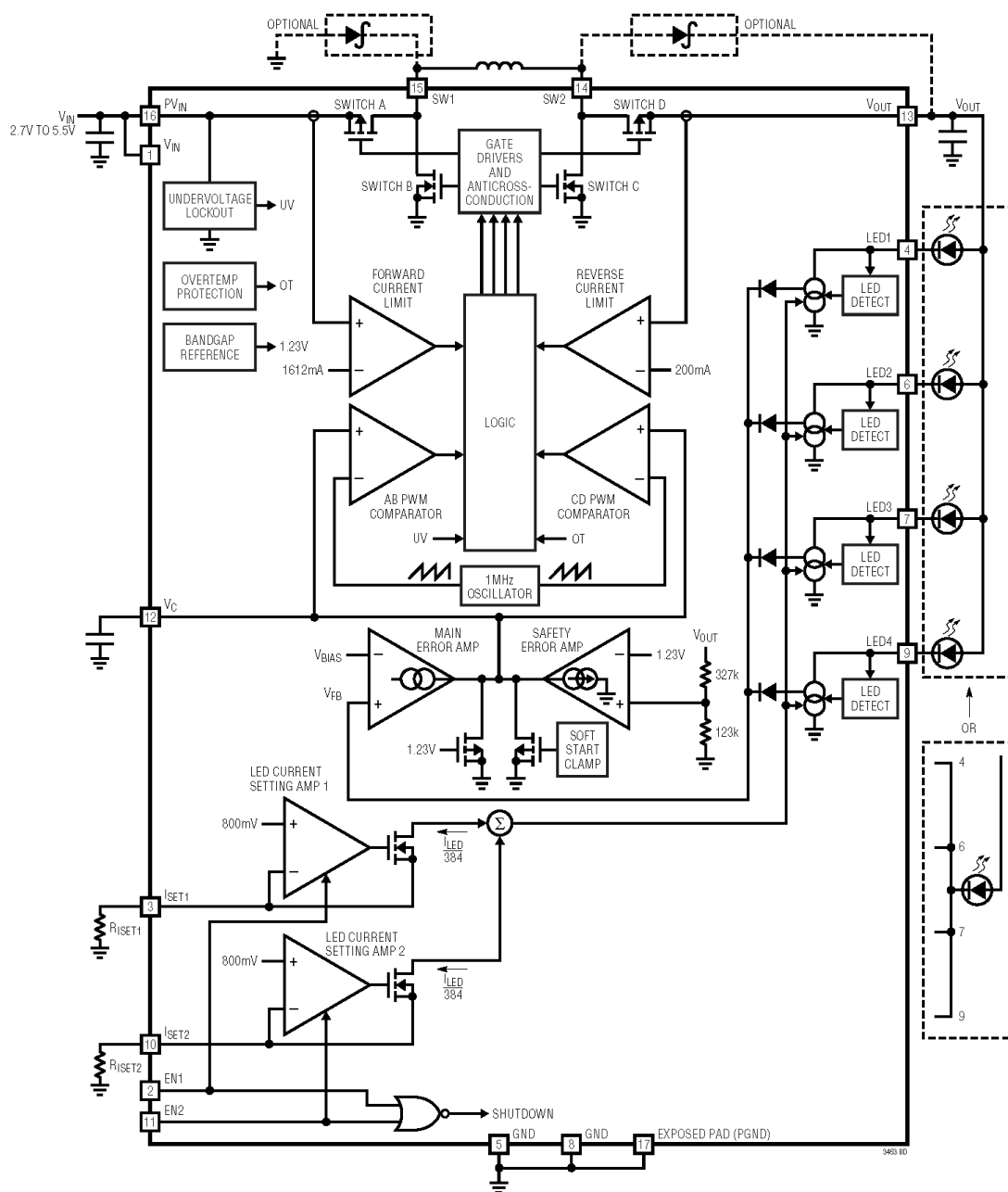
PFM Pulse Frequency Modulation – pulsně kmitočtová modulace, konstantní šířka impulsů ale proměnný kmitočet

DPS Deska Plošného Spoje

# SEZNAM PŘÍLOH

|          |                                           |           |
|----------|-------------------------------------------|-----------|
| <b>A</b> | <b>Vnitřní struktura obvodu LTC3453</b>   | <b>58</b> |
| <b>B</b> | <b>Naměřené hodnoty</b>                   | <b>59</b> |
| B.1      | Tabulka hodnot pro první vzorek . . . . . | 59        |
| B.2      | Tabulka hodnot pro druhý vzorek . . . . . | 61        |
| B.3      | Tabulka hodnot pro třetí vzorek . . . . . | 63        |
| <b>C</b> | <b>Podklady pro výrobu vzorku</b>         | <b>64</b> |
| C.1      | Schéma zapojení . . . . .                 | 64        |
| C.2      | Deska plošného spoje . . . . .            | 64        |
| C.3      | Osazovací plánec . . . . .                | 65        |
| C.4      | Seznam součástek . . . . .                | 66        |

## A VNITŘNÍ STRUKTURA OBVODU LTC3453



Obr. A.1: Vnitřní struktura ovodu LTC3453

## B NAMĚŘENÉ HODNOTY

### B.1 Tabulka hodnot pro první vzorek

Tab. B.1: Tabulka naměřených hodnot prvního vzorku

| U zdroje | U vstup             | I vstup             | U výstup             | I výstup             |
|----------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| U [V]    | U <sub>in</sub> [V] | I <sub>in</sub> [A] | U <sub>out</sub> [V] | I <sub>out</sub> [A] |
| 6,000    | 6,006               | 0,263               | 3,300                | 0,330                |
| 5,900    | 5,906               | 0,267               | 3,300                | 0,330                |
| 5,800    | 5,805               | 0,272               | 3,300                | 0,330                |
| 5,700    | 5,705               | 0,276               | 3,300                | 0,330                |
| 5,600    | 5,605               | 0,280               | 3,300                | 0,330                |
| 5,500    | 5,505               | 0,288               | 3,300                | 0,331                |
| 5,400    | 5,404               | 0,365               | 3,296                | 0,329                |
| 5,300    | 5,304               | 0,378               | 3,287                | 0,324                |
| 5,200    | 5,203               | 0,385               | 3,276                | 0,319                |
| 5,100    | 5,102               | 0,435               | 3,270                | 0,316                |
| 5,000    | 5,002               | 0,465               | 3,261                | 0,310                |
| 4,900    | 4,902               | 0,469               | 3,260                | 0,310                |
| 4,800    | 4,799               | 0,666               | 3,084                | 0,218                |
| 4,700    | 4,700               | 0,648               | 3,070                | 0,210                |
| 4,600    | 4,599               | 0,630               | 3,056                | 0,202                |
| 4,500    | 4,500               | 0,612               | 3,042                | 0,194                |
| 4,400    | 4,400               | 0,595               | 3,029                | 0,186                |
| 4,300    | 4,300               | 0,577               | 3,015                | 0,178                |
| 4,200    | 4,200               | 0,559               | 3,002                | 0,171                |
| 4,100    | 4,100               | 0,540               | 2,988                | 0,163                |
| 4,000    | 4,000               | 0,520               | 2,975                | 0,156                |
| 3,900    | 3,900               | 0,499               | 2,962                | 0,148                |
| 3,800    | 3,800               | 0,478               | 2,949                | 0,141                |
| 3,700    | 3,700               | 0,456               | 2,937                | 0,134                |
| 3,600    | 3,596               | 0,728               | 3,053                | 0,191                |

| U [V] | U <sub>in</sub> [V] | I <sub>in</sub> [A] | U <sub>out</sub> [V] | U <sub>out</sub> [A] |
|-------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| 3,500 | 3,495               | 0,878               | 3,145                | 0,238                |
| 3,400 | 3,396               | 0,820               | 3,089                | 0,211                |
| 3,300 | 3,296               | 0,798               | 3,060                | 0,197                |
| 3,200 | 3,196               | 0,779               | 3,044                | 0,188                |
| 3,100 | 3,093               | 1,002               | 3,154                | 0,244                |
| 3,000 | 2,993               | 0,969               | 3,126                | 0,231                |
| 2,900 | 2,894               | 0,907               | 3,107                | 0,222                |
| 2,800 | 2,794               | 0,676               | 3,023                | 0,179                |
| 2,700 | 2,697               | 0,612               | 2,953                | 0,144                |
| 2,600 | 2,600               | 0,388               | 3,095                | 0,213                |
| 2,500 | 2,501               | 0,296               | 3,012                | 0,172                |
| 2,400 | 2,402               | 0,203               | 2,917                | 0,126                |
| 2,300 | 2,303               | 0,027               | 2,615                | 0,016                |
| 2,200 | 2,204               | 0,012               | 2,542                | 0,004                |
| 2,100 | 2,104               | 0,004               | 2,062                | 0,000                |
| 2,000 | 2,004               | 0,000               | 0,000                | 0,000                |

## B.2 Tabulka hodnot pro druhý vzorek

Tab. B.2: Tabulka naměřených hodnot druhého vzorku

| <b>U zdroje</b> | <b>I vstup</b>      | <b>I výstup</b>       |
|-----------------|---------------------|-----------------------|
| U [V]           | I <sub>in</sub> [A] | I <sub>out</sub> [mA] |
| 6,0             | 1,1150              | 493,20                |
| 5,9             | 1,1050              | 445,64                |
| 5,8             | 1,0090              | 406,13                |
| 5,7             | 0,9740              | 386,16                |
| 5,6             | 0,9610              | 377,30                |
| 5,5             | 0,9460              | 368,01                |
| 5,4             | 0,9210              | 359,40                |
| 5,3             | 0,9200              | 351,56                |
| 5,2             | 0,9020              | 341,78                |
| 5,1             | 0,8950              | 333,53                |
| 5,0             | 0,8800              | 324,43                |
| 4,9             | 0,8320              | 310,01                |
| 4,8             | 0,7900              | 295,71                |
| 4,7             | 0,7770              | 287,50                |
| 4,6             | 0,7620              | 278,52                |
| 4,5             | 0,7450              | 269,16                |
| 4,4             | 0,7260              | 259,00                |
| 4,3             | 0,7090              | 249,01                |
| 4,2             | 0,6900              | 239,02                |
| 4,1             | 0,6710              | 229,10                |
| 4,0             | 0,6630              | 219,18                |
| 3,9             | 0,6530              | 210,20                |
| 3,8             | 0,6450              | 202,88                |
| 3,7             | 0,6330              | 196,01                |
| 3,6             | 0,6110              | 187,04                |
| 3,5             | 0,6250              | 182,90                |
| 3,4             | 0,6510              | 180,21                |
| 3,3             | 0,5680              | 166,84                |
| 3,2             | 0,6020              | 166,37                |
| 3,1             | 0,6190              | 168,52                |

| <b>U zdroje</b> | <b>I vstup</b>      | <b>I výstup</b>       |
|-----------------|---------------------|-----------------------|
| U [V]           | I <sub>in</sub> [A] | I <sub>out</sub> [mA] |
| 3,0             | 0,6590              | 170,85                |
| 2,9             | 0,6730              | 166,30                |
| 2,8             | 0,6790              | 160,71                |
| 2,7             | 0,6920              | 159,63                |
| 2,6             | 0,6660              | 151,60                |
| 2,5             | 0,1670              | 102,71                |
| 2,4             | 0,0820              | 55,02                 |
| 2,3             | 0,0330              | 21,75                 |
| 2,2             | 0,0080              | 2,39                  |
| 2,1             | 0,0050              | 0,00                  |
| 2,0             | 0,0060              | 0,00                  |

## B.3 Tabulka hodnot pro třetí vzorek

Tab. B.3: Tabulka naměřených hodnot třetího vzorku

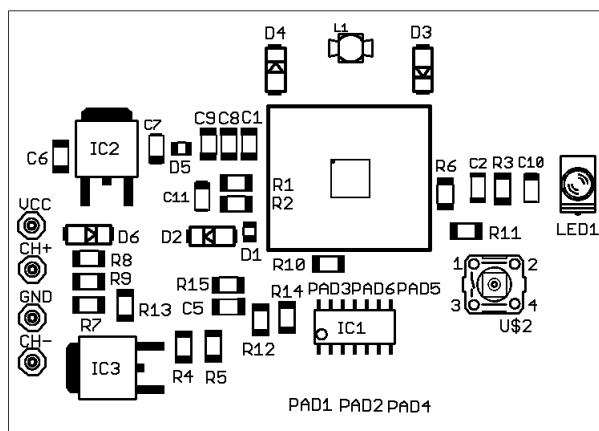
| U zdroje | I výstup              |
|----------|-----------------------|
| U [V]    | I <sub>out</sub> [mA] |
| 6,0      | 243,51                |
| 5,8      | 222,56                |
| 5,6      | 207,13                |
| 5,4      | 197,96                |
| 5,2      | 184,56                |
| 5,0      | 170,18                |
| 4,8      | 154,47                |
| 4,6      | 151,61                |
| 4,4      | 120,58                |
| 4,2      | 96,98                 |
| 4,0      | 121,65                |
| 3,8      | 114,60                |
| 3,6      | 104,47                |
| 3,4      | 86,77                 |
| 3,2      | 10,43                 |
| 3,0      | 2,29                  |
| 2,8      | 0,00                  |

Tab. B.4: Použité měřicí přístroje pro všechna měření

|                      |                |               |
|----------------------|----------------|---------------|
| ampérmetr 1          | AGILENT 34401A | SN:MY41041496 |
| ampérmetr 2          | AGILENT 34401A | SN:MY41007386 |
| voltmetr 1           | AGILENT 34401A | SN:MY41041473 |
| voltmetr 2           | AGILENT 34401A | SN:MY41008113 |
| stabilizovaný zdroj  | HP E3631A      | SN:           |
| digitální osciloskop | AGILENT 54621A | SN:MY40005722 |



## C.3 Osazovací pláněk



Obr. C.3: Plánek osazení součástek

## C.4 Seznam součástek

| označení | hodnota            | pouzdro |
|----------|--------------------|---------|
| C1       | 1u                 | C1206   |
| C2       | 100n               | C1206   |
| C5       | 10n                | C1206   |
| C6       | 10n                | C1206   |
| C7       | 2u2                | SMC A   |
| C8       | 1u                 | C1206   |
| C9       | 1u                 | C1206   |
| C10      | 4u7                | SMC A   |
| C11      | 1u                 | SMC A   |
| D1       | 1n4148             | R0805   |
| D2       | SS16               | DO214AC |
| D3       | SS16               | DO214AC |
| D4       | SS16               | DO214AC |
| D5       | 1n4148             | R0805   |
| D6       | SS16               | DO214AC |
| IC1      | ATTINY24/44/84-SSU | SOIC14  |
| IC2      | LF33CDT            | TO252   |
| IC3      | IRLR120            | TO252   |
| L1       | 4u7                | MS50    |
| R1       | 2k7                | R1206   |
| R2       | 27                 | R1206   |
| R3       | 2k4                | R1206   |
| R4       | 68k                | R1206   |
| R5       | 13k                | R1206   |
| R6       | 0                  | R1206   |
| R7       | 100                | R1206   |
| R8       | 8k2                | R1206   |
| R9       | 10k                | R1206   |
| R10      | 0                  | R1206   |
| R11      | 0                  | R1206   |
| R12      | 0                  | R1206   |
| R13      | 0                  | R1206   |
| R14      | 0                  | R1206   |
| R15      | 0                  | R1206   |
| U1       | LTC3453            | QFN     |

## C.5 Zdrojový kód

```
.include "tn44def.inc"

.DEF MASKA=R18
.DEF REG=R16      ;pracovní registr
.DEF PWM=R17      ;jas LED
.DEF CNT1=R0
.DEF CNT2=R1
; code segment
;
.cseg
.org $0000
rjmp RESET          ; Reset Handler
rjmp INTer0         ; IRQ0 Handler
rjmp PCINTer0       ; PCINT0 Handler
rjmp PCINTer1       ; PCINT1 Handler
rjmp WDT            ; Watchdog Interrupt Handler
rjmp TIM1_CAPT      ; Timer1 Capture Handler
rjmp TIM1_COMPA     ; Timer1 Compare A Handler
rjmp TIM1_COMPB     ; Timer1 Compare B Handler
rjmp TIM1_OVF       ; Timer1 Overflow Handler
rjmp TIM0_COMPA     ; Timer0 Compare A Handler
rjmp TIM0_COMPB     ; Timer0 Compare B Handler
rjmp TIM0_OVF       ; Timer0 Overflow Handler
rjmp ANA_COMP       ; Analog Comparator Handler
rjmp AD_C           ; ADC Conversion Handler
rjmp EE_RDY         ; EEPROM Ready Handler
rjmp USI_STR        ; USI STart Handler
rjmp USI_OVF        ; USI Overflow Handler
;
.org $0011
RESET:      ;CLI
            LDI REG, HIGH(RAMEND)
            OUT SPH,REG
            LDI REG, LOW(RAMEND)
            OUT SPL,REG

; port A pin1=EN1pwm pin2=EN2 pin7=pwm port B pin2=tlacitko

; DDRx=0 vstup PORTx=1 pullup

            LDI REG,0b11111111      ;pin 1a2 vystup pin 7 vystup
            OUT DDRA,REG
            LDI REG,0b00000000      ;pin 1,2 a 7v nule
            OUT PORTA,REG
            LDI REG,0b11111011
```

```

OUT  DDRB,REG                ;portb vystupy pin2 vstup tlacitko
LDI  REG,0b00000100
OUT  PORTB,REG               ;v nule pin2 pullup

LDI  MASKA,0b00000100;maska pro negaci portu

LDI  PWM,0                   ; jas
LDI  REG,0b00100011
OUT  TCCR0A,REG
LDI  REG,0b00000001
OUT  TCCR0B,REG
CLR  REG
OUT  OCR0B,PWM
SBI  PORTA,1                 ;aktivace vstupu EN1 pro PWM
MAIN:                         ;hlavní smyčka:

SMYC0:  IN      REG,PINB      ;čti stav PB
        COM REG              ;neguj stavy
        ANDI REG,0b00000100   ;maskuj další bity
        BREQ SMYC0            ;pro REG=0 se vrať
        RCALL    ZPOZDENI
        IN      REG,PINB      ;čti stav PB
        COM REG              ;neguj stavy
        ANDI REG,0b00000100   ;maskuj další bity
        BREQ SMYC0            ;pro REG=0 se vrať

        CPI  REG,0b00000100   ;test tlacitka
        BREQ TL

        RJMP MAIN

TL:      ;CBI  PORTA,1
        ;SBI  PORTA,2

        ;IN   R26,PORTA
        ;EOR  R26,MASKA
        ;OUT  PORTA,r26

        LDI  REG,51            ;5 kroků PWM
        ADD  PWM,REG
        RJMP NASTAV

NASTAV:  CLR  REG
        OUT  OCR0B,PWM        ;OCR0B=PWM

SMYC1:  IN      REG,PINB      ;čti stav PB

```

|                     |                     |
|---------------------|---------------------|
| COM REG             | ;neguj stavy        |
| ANDI REG,0b00000100 | ;maskuj další bity  |
| BRNE SMYC1          | ;pro REG<>0 se vrať |
| RCALL ZPOZDENI      |                     |
| IN REG,PINB         | ;čti stav PB        |
| COM REG             | ;neguj stavy        |
| ANDI REG,0b00000100 | ;maskuj další bity  |
| BRNE SMYC1          | ;pro REG<>0 se vrať |
| RCALL ZPOZDENI      |                     |
|                     |                     |
| RJMP MAIN           |                     |

```

ZPOZDENI:CLR R0
          CLR R1
ZPOZDENI1:DEC R1
          BRNE ZPOZDENI1
          DEC R0
          BRNE ZPOZDENI1
          RET

```

|             |                              |
|-------------|------------------------------|
| INTer0:     | ; IRQ0 Handler               |
| PCINTer0:   | ; PCINT0 Handler             |
| PCINTer1:   | ; PCINT1 Handler             |
| WDT:        | ; Watchdog Interrupt Handler |
| TIM1_CAPT:  | ; Timer1 Capture Handler     |
| TIM1_COMPA: | ; Timer1 Compare A Handler   |
| TIM1_COMPB: | ; Timer1 Compare B Handler   |
| TIM1_OVF:   | ; Timer1 Overflow Handler    |
| TIM0_COMPA: | ; Timer0 Compare A Handler   |
| TIM0_COMPB: | ; Timer0 Compare B Handler   |
| TIM0_OVF:   | ; Timer0 Overflow Handler    |
| ANA_COMP:   | ; Analog Comparator Handler  |
| AD_C:       | ; ADC Conversion Handler     |
| EE_RDY:     | ; EEPROM Ready Handler       |
| USI_STR:    | ; USI Start Handler          |
| USI_OVF:    | ; USI Overflow Handler       |
| Reti        |                              |