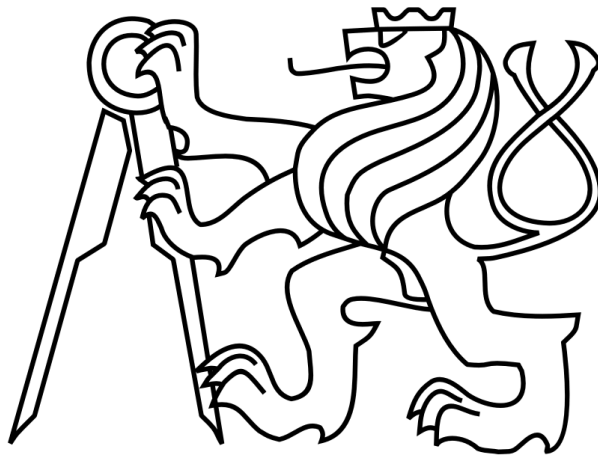


České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra mikroelektroniky



Diplomová práce

Napájení LED diod s využitím fotovoltaického měniče

Magisterský studijní obor: Elektronika

Autor: Bc. Jiří Korbel

Vedoucí práce: Prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.

2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. K O R B E L Jiří**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Obor: Elektronika

Název tématu: **Napájení LED diod s využitím fotovoltaického měniče**

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte rešerši současného stavu napájení LED diod s využitím fotovoltaických měničů energie.
2. Navrhněte a realizujte napájecí zdroj s fotovoltaickým měničem s akumulací do baterie NiCd článků s automatickým řízením nabíjení, měničem zajišťujícím napájení LED s měnícím se výstupním napětím. Do návrhu zabudujte řízení jasu diody a režim blikání.
3. Zjistěte a vyhodnoťte parametry realizovaného napájecího zdroje s ohledem na světelné podmínky a použité měniče napětí. Zhodnoťte výhody a nevýhody navrženého řešení, kladné a záporné stránky řešení vztažené k současnému stupni rozvoje technologií.
4. Proveďte ekonomickou rozvahu pro navržený systém.

Seznam odborné literatury:

- [1] Husák, M.: Návrh napájecích zdrojů pro elektroniku, skriptum, ČVUT, Praha, 2006
- [2] Libra, M., Poulek, V: Fotovoltaika, teorie a praxe využití solární energie, 1. vydání, Příbramská tiskárna, Příbram, 2009, 160 stran, ISBN 978-80-904311-0-2
- [3] <http://www.gme.cz/solarni-panely-do-20w/fotovoltaicky-solarni-panel-rs-m-12v-20w-p522-021/#dokumentace>
- [4] <http://www.ges.cz/cz/solar-f-13w-bg-GES08102651.html>

Vedoucí: **Prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.**

Platnost zadání: 31. 8. 2015

L.S.

Prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.
vedoucí katedry

Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 7. 2. 2014

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou práci „Napájení LED diod s využitím fotovoltaického měniče“ zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a používal jsem pouze literaturu uvedenou na konci práce. Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejňováním.

V Praze dne

podpis

Bc. Jiří Korbel

Poděkování

V úvodu mé bakalářské práce bych rád poděkoval rodině a přátelům za podporu při studiu, dále vedoucímu práce za cenné rady a vedení při jejím psaní i v předcházejících semestrálních projektech. V neposlední řadě patří mé poděkování Tomáši Bínovi, který mi umožnil využívat jeho laboratoř při konstrukci a měření zařízení.

Anotace

Diplomová práce se zabývá teorií a praxí nabíjení baterií a následným využitím uložené energie k napájení vysoce svítivé diody. Primárním zdrojem energie pro celý systém je fotovoltaický panel, a proto je hlavním kritériem při návrhu co nejefektivnější využití dostupné energie a její úspora. Využívá se jednoduchého algoritmu sledování bodu maximálního výkonu (MPPT) při nabíjení baterií a možnosti analogové regulace jasů LED. Součástí řešení je také výstražná funkce blikání zajištěná pomocí PWM s frekvencí postřehnutelnou lidským okem.

Konečný výrobek je schopen bezpečně nabíjet NiCd, NiMH, nebo Li baterie s účinností přesahující 90 %.

Práce obsahuje ukázkou rozpočtové bilance vyrobeného zařízení s úvahou o uvedení výrobku na trh.

Abstract

This thesis deals with theory and application of charging batteries, which are consequently allowed to discharge powering high brightness LED. As a primary source for the whole system photovoltaic panel is designated. Because of that, efficiency of harvesting energy and its saving are main goals. A simple algorithm of maximum power point tracking is used for charging. For powering of LED, capability of regulating of luminous flux is built in. Also a function of flash light, achieved by low frequency PWM driving, that is perceivable by human visual system, is a part of the solution.

The final device is capable of safe charging of nickel or lithium based accumulators with efficiency overreaching 90 %.

The thesis contains a demonstration of a budgetary balance of a manufactured device.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	6
Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	10
1. Úvod	11
2. LED.....	12
2.1. Napájení LED	13
2.1.1. Možnosti napájení.....	14
2.1.2. Možnosti řízení jasu	16
2.1.3. Boost converter – zvyšující měnič.....	18
3. Maximum Power Point Tracking.....	21
4. Návrh a realizace jednoduchého fotovoltaického zdroje	24
4.1. Blokové schéma	25
4.2. Nabíjecí část obvodu	25
4.2.1. Obvodový návrh	26
4.3. Část obvodu pro řízení LED	33
4.3.1. Obvodový návrh	35
5. Dosažené výsledky	43
5.1. Charakteristika fotovoltaického panelu	43
5.2. Parametry nabíjecího obvodu	45
6. Ekonomická rozvaha	49
7. Závěr.....	52
Seznam použité literatury	53
Seznam příloh.....	54

Seznam použitých zkratek a symbolů

AKO	Astabilní klopný obvod
BE	Přechod báze emitor bipolárního tranzistoru
DC	Direct current = stejnosměrný proud
DPS	Deska plošných spojů
FV	Fotovoltaika
FP	Fotovoltaický panel
HPLED = HBLED	High Power (Brightness) LED = vysoce výkonná (svítivá) LED
IO = IC	Integrovaný obvod = Integrated Circuit
LED	Light emitting diode = světlo vyzařující dioda
Li-Ion	Lithium-iontový akumulátor
MPPT	Maximum Power Point Tracking = sledování bodu maximálního výkonu
NiCd	Niklo-kadmiový akumulátor
NiMH	Niklmetalhydridový akumulátor
PWM	Pulse width modulation = pulzně šířková modulace
SMD	Surface Mounted Device = součástky pro povrchovou montáž na DPS
ΔV	Pokles napětí – metoda vyhodnocování nabíjení
CX	Kondenzátor - označení součástky, kde X je specifický znak konkrétní součástky
DX	Dioda - označení součástky, kde X je specifický znak konkrétní součástky
LX	Cívka - označení součástky, kde X je specifický znak konkrétní součástky
LEDX	Svítivá dioda - označení součástky, kde X je specifický znak konkrétní součástky
NTC	Termistor s negativním teplotním koeficientem
RX	Odpor - označení součástky, kde X je specifický znak konkrétní součástky
QX = TX	Tranzistor - označení součástky, kde X je specifický znak konkrétní součástky

Diplomová práce

CA	(-)	Poměrná jednotka ke kapacitě baterie popisující nabíjecí a vybíjecí proudy
C _d	(Ah)	Disponibilní kapacita baterie
C	(F)	Kapacita
C _X		Kapacita součástky, kde indexované X označuje konkrétní součástku
E	(lx)	Intenzita osvětlení
I	(A)	Proud
I _f		Proud v propustném směru
I _{MP}		MP = Maximum Power, proud v bodě maximálního výkonu
I _X		Proud součástkou, kde indexované X označuje konkrétní součástku
L	(H)	Indukčnost
P	(W)	Výkon
R	(Ω)	Odpor
R _{DS-ON}		Odpor kanálu tranzistoru v sepnutém stavu
R _X		Odpor součástky, kde indexované X označuje konkrétní součástku
T	(s)	Perioda
U = V	(V)	Napětí
U _f		Napětí v propustném směru
U _{ON}		Napětí, při kterém dojde ke spuštění
U _X		Napětí na součástce, kde indexované X označuje konkrétní součástku
V _{CO}		Voltage Cut Off = napětí, při kterém dojde k odpojení
V _{IN}		Vstupní napětí
V _{OC}		Voltage Open Circuit = napětí naprázdno
V _{OUT}		Výstupní napětí
V _{MP}		Voltage Maximum Power = Napětí v bodě maximálního výkonu
V _{CC}		Napájecí napětí
φ	(lm)	Světelný tok
W	(Wh)	Elektrická práce

s	(-)	střída
f	(Hz)	Frekvence
t	(s)	Čas

Seznam obrázků

Obr. 2.1: Dioda BXRA-56C0700-A-00 – BRIDGELUX [1]	13
Obr. 2.2: Tvar voltampérové charakteristiky diody	14
Obr. 2.3: Charakteristika LED BXRA-56C0700-A-00 – BRIDGELUX [1].....	15
Obr. 2.4: Závislost normovaného světelného toku na proudu tekoucím diodou [1]	15
Obr. 2.5: Ukázka časových průběhů PWM pro různé střídny[3].....	17
Obr. 2.6: Schéma základního zvyšujícího měniče [4].....	18
Obr. 2.7: Zvyšující měnič v počáteční fázi sepnutého spínače [4].....	19
Obr. 2.8: Zvyšující měnič ve fázi rozepnutého spínače [4].....	19
Obr. 2.9: Zvyšující měnič ve fázi sepnutého spínače v dalších cyklech [4].....	20
Obr. 3.1: Experimentálně zjištěná zatěžovací charakteristika FV panelu pro různá osvětl. [2]..	21
Obr. 3.2: Experimentálně zjištěná výkonová charakteristika FV panelu pro různá osvětlení [2]	22
Obr. 4.1: Blokové schéma obvodu	25
Obr. 4.2: Obvodové schéma nabíječky	27
Obr. 4.3: Schéma AKO	34
Obr. 4.4: Obvodové schéma LED driveru	36
Obr. 5.1: Schéma zapojení pro měření FP.....	43
Obr. 5.2: Proměnná zátěž	43
Obr. 5.3: Zatěžovací charakteristika FP.....	44
Obr. 5.4: Výkonová charakteristika FP	45
Obr. 5.5: Průběh napětí na cívce nabíječky pro napájení 11 V	46
Obr. 5.6: Průběh napětí na cívce nabíječky pro napájení 15 V	47
Obr. 5.7: Průběhy napětí na hradlech tranzistorů nabíječky pro napájení 11 V.....	47

Seznam tabulek

Tab. 5.1: Účinnost nabíjecího obvodu.....	46
Tab. 6.1: Přehledová tabulka ekonomické rozvahy	51

1. Úvod

Tato práce navazuje tematicky na mou bakalářskou práci, kde byla navržena a zkonstruována nabíječka NiCd/NiMH článku s využitím solárního panelu. Východiskem pro tuto práci byly také poznatky uvedené v bakalářské práci, které zde nebudou ve všech případech popsány, nicméně k základnímu porozumění by měl popis v této práci dostačovat. Solární energie je do baterie ukládána, aby mohla být posléze využita v momentě, kdy aktuálně není energie ze Slunce dostupná. Takovým případem může být například osvětlení.

Cílem této práce je k nabíjení použít menší fotovoltaický panel, baterii s větším počtem článků, aby měla dostatečnou kapacitu a využít ji k napájení výkonové LED diody. Na začátek jsou uvedeny některé běžné postupy řešení jednotlivých problémů. Shrnutí těchto informací je hlavní náplní kapitol 2 a 3.

Hlavním bodem při nabíjení je využití metody MPPT při zachování funkce ochrany baterií během nabíjecího cyklu. Na druhé straně, při čerpání energie z baterie, se práce zaměřuje na možnost regulace jasu a tím možné prodloužení použití zařízení nabití v jednom vybíjecím cyklu. Jsou vybrány vhodné komponenty a součástky, ze kterých je vyrobeno samotné zařízení. Návrhem celého zařízení od počátečních úvah až po výpočty hodnot součástí se zabývá kapitola 4.

Součástí práce je také zhodnocení dosažených parametrů výrobku v kapitole 5. a ekonomická rozvaha pro celý systém, kapitola 6.

2. LED

LED (z anglického light emitting diode) je polovodičový zdroj světla. Funguje na principu převodu elektrické energie na elektromagnetické záření. Vyzařování je umožněno díky efektu elektroluminiscence, což je vyzařování energie ve formě fotonů, k němuž dochází při rekombinaci volných elektronů a děr např. v polovodiči. Množství energie a s tím spjatá vlnová délka (barva světla) závisí na šířce zakázaného pásu v polovodiči.

V dnešní době jsou diody schopny vyzařovat ve spektrech od infračervené do ultrafialové oblasti a to s poměrně velkými intenzitami. Taková LED, vyzařující světlo bílé barvy, by měla být použita k návrhu v diplomové práci.

Z počátku byly LED diody používány jako indikace, protože na trhu byly dostupné pouze málo svítivé diody, postupem času se však jejich účinnost, světelný výkon a jiné parametry zlepšovaly a dnes tento způsob osvětlování vytlačuje konvenční světelné zdroje a LED najdeme téměř všude a v každé aplikaci.

Výhody LED

Účinnost – LED vyzařují více světla na watt než běžné žárovky. Zároveň není třeba používat filtry snižující účinnost, pokud je potřeba specifická barva světla. Lze diodu vyrobit z materiálu s šířkou zakázaného pásu odpovídajícího vyzařování žádané barvy. Dnešní komerčně dostupné LED se pohybují světelnou účinností k hodnotám i přes $100 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ oproti klasické žárovce, která má účinnost $10 - 15 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$.

Životnost – Výrobci udávají životnost desítky tisíc hodin, přičemž toto číslo je značně ovlivněno, na delší i kratší životnost, podmínkami, za kterých jsou LED provozovány. Jsou také mnohem více odolné proti nárazům než žárovkové a fluorescenční zdroje světla. Postupným stárnutím klesá světelný výkon a zřídka dojde k tomu, že LED přestane náhle fungovat.

Nevýhody LED

Počáteční cena – Počáteční cena je vyšší než u běžných zdrojů světla přepočteno na dostupný světelný tok. Navíc je třeba zajistit správné napájení, které vyžaduje zdroj proudu vzhledem k nelineární VA charakteristice diody.

Spektrum – Objekty osvětlené LED zdrojem mohou být vnímány jinak barevně než v denním světle, což je způsobeno velmi odlišným spektrem. Z tohoto důvodu jsou používány speciální luminofory, které „převádí“ spektrum na relativně spojité podobné Slunci. Ty také mohou umožňovat, např. s další optikou, větší vyzařovací úhel diody, který je kvůli vysokému indexu lomu poměrně malý. Na druhou stranu, pokud diodu stmíváme (protéká jí menší proud), vyzařované spektrum se nemění.

HPLED (High Power LED)

Oproti ostatním LED, které mohou být buzeny proudem jednotek, maximálně desítek mA, vysoce výkonné LED, nebo také vysoce svítivé (HBLED – high brightness) mohou být napájeny proudem stovek mA až jednotek A a dosahují světelných toků přes 1000 lm a hustot výkonu $300 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$, což souvisí s potřebou odvodu tepla z čipu.

2.1. Napájení LED

Pro účely této práce by měla být použita dioda o příkonu okolo 10 W. Vzhledem k nelineární závislosti světelného toku na proudu diodou, použití baterií k napájení a životnosti diody stojí za uvážení provozovat diodu na nižší výkonové úrovni, než je maximální možná. Pokud snížíme proud, dioda by měla mít větší životnost a nebude se tolik ohřívat. Navíc při použití diody s udávaným proudem 1 A, můžeme ze vzorce (2.1) snadno určit, že je potřeba napětí 10 V. Pokud by bylo použito 4 článků s napětím 1,2 V, znamená to odebírat z baterie větší proud než 2 A, což je poměrně velká hodnota. Z tohoto důvodu bude lepší neprovozovat diodu při maximálních možných výkonových hodnotách.

$$P = U \cdot I \quad (2.1)$$

Vhodnou a komerčně dostupnou LED pro naše účely by mohla být například dioda s označením BXRA-56C0700-A-00 od výrobce BRIDGELUX (obr. 2.1), která dosahuje, jak výrobce udává, účinnosti $118 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$. Jedná se o více jednotlivých LED uspořádaných do řady, jak je pro tento typ obvyklé.

Nejdůležitějšími elektrickými parametry jsou:

Napětí v propustném směru $U_f = 18,1 \text{ V}$

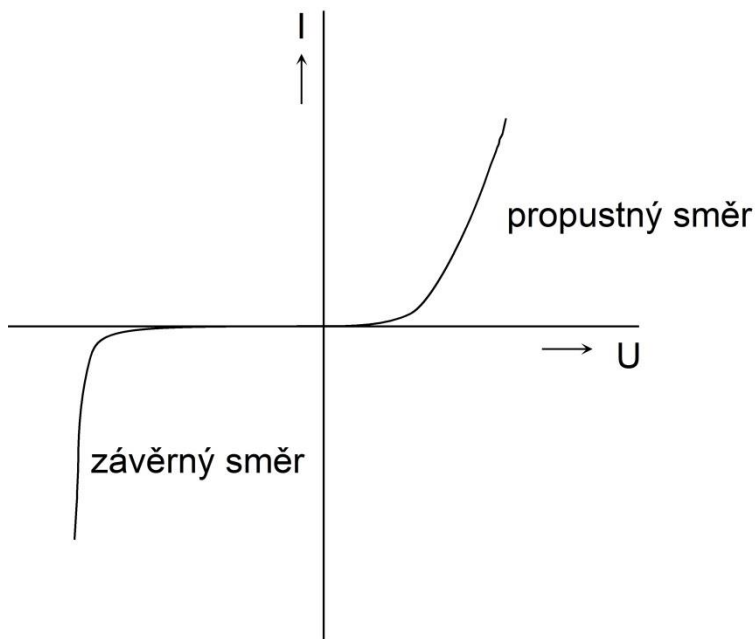
Proud typ. v propustném směru $I_f = 350 \text{ mA}$

Maximální výkon $P_d = 6,6 \text{ W}$



Obr. 2.1: Dioda BXRA-56C0700-A-00 – BRIDGELUX [1]

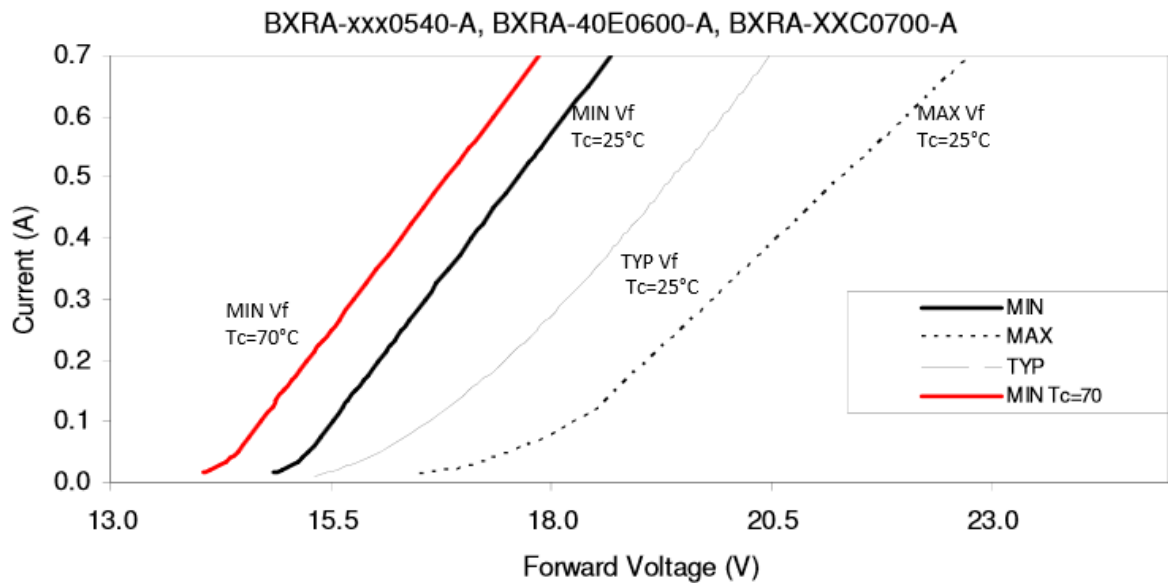
2.1.1. Možnosti napájení



Obr. 2.2: Tvar voltampérové charakteristiky diody

Napětové napájení LED

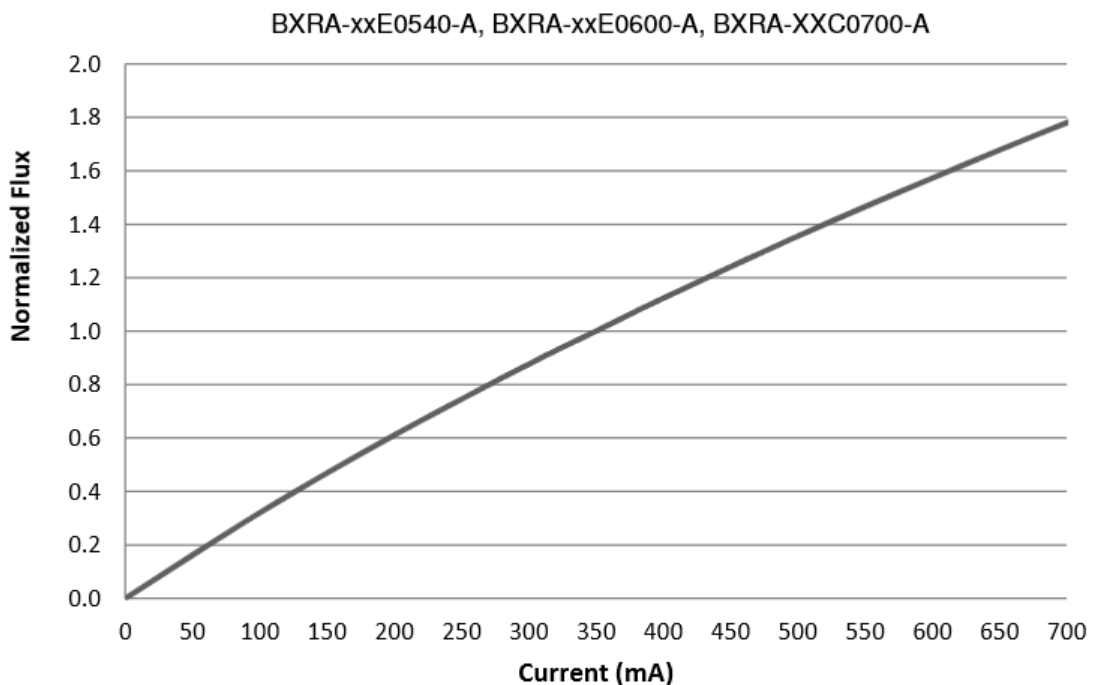
Ačkoliv se voltampérové charakteristiky jednotlivých nejen LED diod mohou lišit, základní tvar je vždy podobný klasické diodě podle obr. 2.2. Z této charakteristiky je vidět, že malé změně napětí odpovídá relativně velká změna proudu, především po překročení ohybu okolo prahového napětí. Vzhledem k tomu, že proud procházející diodou je pro její funkci kritický, malá změna napětí by ji mohla nevratně poškodit. Proto je nevhodné, z praktického hlediska, napájet LED diodu zdrojem konstantního napětí, i když je teoreticky tento přístup také možný. Některé dnešní vysoce svítivé LED ovšem mají tvar charakteristiky téměř lineární (po překročení prahového napětí). Pro ně se na první pohled nabízí možnost napětového napájení, např. z charakteristiky odečteme proud 300 mA, čemuž odpovídá určité napětí. Zde je ale potřeba si uvědomit další vlastnosti, které jsou patrné z dále uvedených charakteristik z datasheetu (obr. 2.3) ke konkrétní vybrané LED, jako je posun charakteristiky s teplotou nebo technologický rozptyl parametrů. A opět je vidět, že napájení konstantním napětím by mohlo vést k destruktivní velikosti proudu.



Obr. 2.3: Charakteristika LED BXRA-56C0700-A-00 – BRIDGELUX [1]

Proudové napájení

Z výše uvedeného vyplývá požadavek na napájení konstantním zdrojem proudu tak, aby dioda pracovala v rozmezí povolených pracovních výkonů. Dalším faktorem, který ukazuje na výhodnost napájení diody proudovým zdrojem, je přímá úměrnost mezi světelným tokem a proudem diodou, jak je patrné z obr. 2.4.



Obr. 2.4: Závislost normovaného světelného toku na proudu tekoucím diodou [1]

a) Sériový rezistor

Nejjednodušším „proudovým zdrojem“ je rezistor s přiloženým napětím. Pokud tedy budeme mít např. 100Ω rezistor s napětím 10 V, podle Ohmova zákona poteče větví 100 mA. Toto řešení je sice jednoduché, levné a spolehlivé, ale zato nepřesné (změní-li se napětí diody v důsledku např. teplotní změny, změní se i napětí na odporu, a tím i proud) a neúčinné (na odporu vzniká odpadní teplo). Proto se hodí a běžně používá pro napájení indikačních LED, ale pro výkonové svítivé se nehodí.

b) Lineární stabilizátor

Další možností, jak zajistit napájení konstantním proudem, je použití lineárního stabilizátoru zapojeného jako zdroj proudu. Tím se řeší problém s rozdílným napětím na odporu, a tedy i proudu, ale problém neúčinnosti zapojení zůstává, protože odpadní teplo vzniká stejně, pouze na jiné součástce. A účinnost je vzhledem k napájení z baterií kritickým faktorem při návrhu, protože se lineární stabilizátor pro naši aplikaci také nehodí.

c) Spínaný zdroj proudu

V [2] byl použit a vysvětlen princip spínaného zdroje proudu. V této práci se předpokládá použití baterie o asi 6 článcích NiCd, což odpovídá napětí 7,2 V. Protože má vybraná LED uváděné napětí pro běžný provozní proud okolo 18 V, bude třeba využít strukturu zvyšujícího (boost) DC-DC měniče. Zároveň je potřeba, aby šlo řídit proud, který bude do LED dodáván, a tím i úroveň osvětlení.

2.1.2. Možnosti řízení jasu

Jak bylo již zmíněno výše, jas diody je přímo úměrný protékajícímu proudu, takže je třeba řídit proud, který diodou protéká. V zásadě máme dvě principiální možnosti, jak stmívat LED. Analogově a pomocí PWM (pulzně šířkové modulace).

a) PWM

Pulzně šířková modulace je široce používaná modulace pro přenos analogového signálu v podobě diskretních hodnot. Obecně funguje na principu průměrování maximální hodnoty v sepnutém stavu a minimální (nulové) hodnoty ve stavu rozepnutém. Výsledná průměrná hodnota je daná poměrem jednotlivých dob, sepnuté a rozepnuté, tzv. střídou. Střída 50 % tedy představuje jednu časovou jednotku v sepnutém a jednu v rozepnutém stavu. 100% střída je neustále sepnutý stav a 0% naopak úplně vypnutý. Na obr. 2.5 jsou ukázány průběhy pro různé velikosti střídy.

Tohoto jevu využívá např. i lidské oko, což pro nás znamená, že pokud maximální špičkový možný proud diodou bude např. 1 A, můžeme diodu napájet pomocí PWM s protékajícím proudem střídajícím úrovně 0 A a 1 A. A pokud bude frekvence dostatečně rychlá, neuvidíme blikání, ale průměrnou hodnotu jasu, odpovídající proudu v rozmezí 0 až 1 A.

Oko tedy funguje jako dolnofrekvenční propust. Kritickou frekvenci blikání řeší Ferry-Porterův zákon, který říká

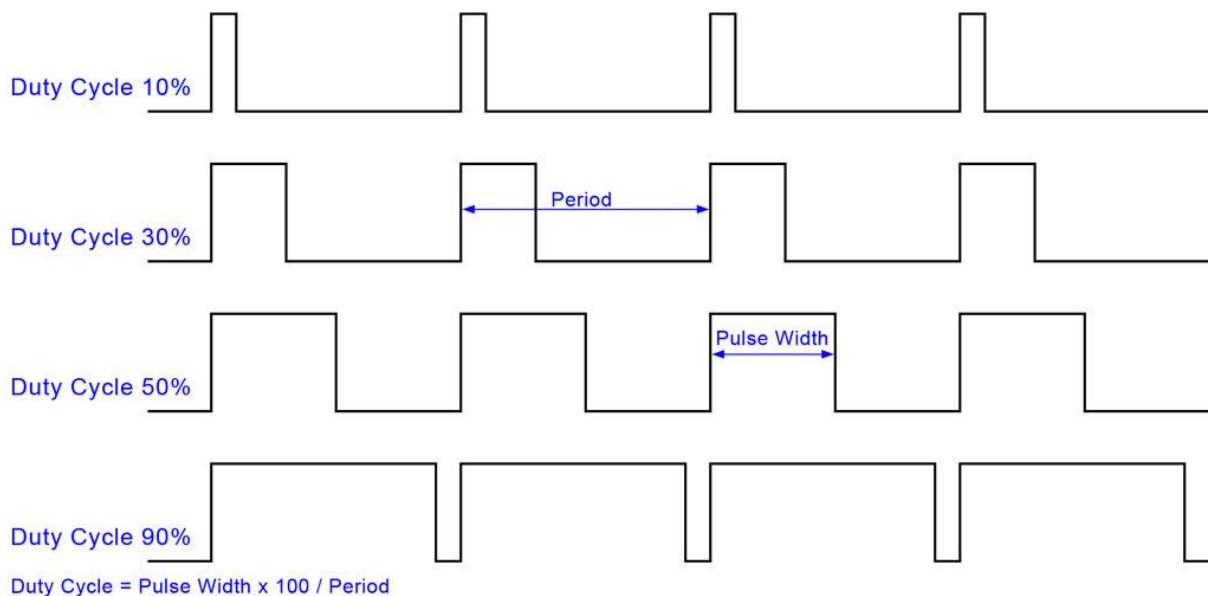
$$f_k = k_1 + k_2 \cdot \log L \quad (2.2)$$

kde f_k kritická frekvence blikání (nad ní už nevidíme blikání)

k_1 a k_2 konstanty, experimentálně zjištěné, $k_1 = 30,26$ a $k_2 = 12,6$

L jas [$\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$]

Jak je vidět z (2.2), frekvence blikání, kterou je člověk schopen zaznamenat, není konstantní, ale mění se logaritmicky s absolutní hodnotou jasu. f_k také záleží na úhlu pozorování, díky různému typu senzorů na jednotlivých místech sítnice. Běžně udávanou hodnotou, kterou člověk není schopen zaznamenat jako blikání, je 100 Hz.



Obr. 2.5: Ukázka časových průběhů PWM pro různé střídy[3]

b) Analogové stmívání

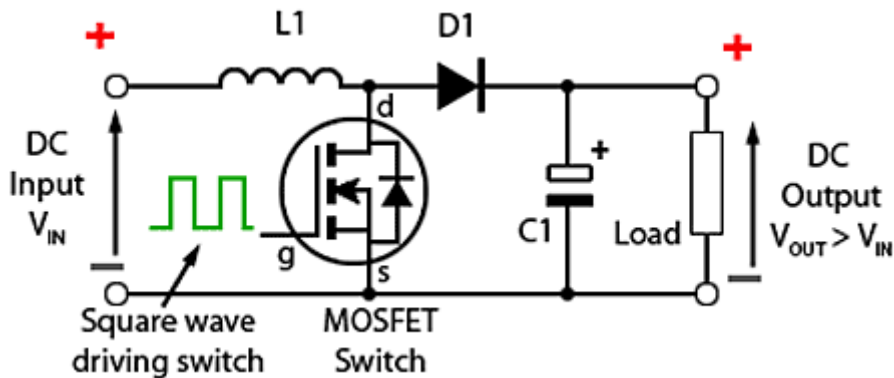
Čistě analogové stmívání představuje i zmíněná možnost napájení přes předřadný rezistor. Změnou jeho velikosti lze potom LED jednoduše stmívat. Jde tedy o to, že diodou teče konstantní proud, který můžeme měnit.

V dnešní době je na trhu spousta IO, které nabízejí funkci LED driveru, tedy obvodu schopného budit LED. Na výběr je z obvodů typu snižujících / zvyšujících DC-DC měničů, s funkcí stmívat led analogově i pomocí PWM. Analogové stmívání tak, aby mělo praktické využití, musí mít účinnost srovnatelnou s PWM. PWM se vyznačuje vysokou účinností, protože na spínacím prvku jsou malé ztráty. Proti tomu, pokud řídíme LED analogově, na odporu nebo lineárním regulátoru se přebytečná energie, o kterou jsme snížili výkon LED diody, mění na

odpadní teplo, což je velmi neúčinné. Prakticky je analogové stmívání řešeno za pomoci spínaného zdroje proudu, který sám využívá PWM a výstupní proud je filtrován dolní propustí. Napájet diodu už vyhlazeným proudem má výhodu, protože ji nezatěžujeme maximálním možným proudem, má o něco vyšší účinnost a hlavně odpadá problém s případným viditelným blikáním.

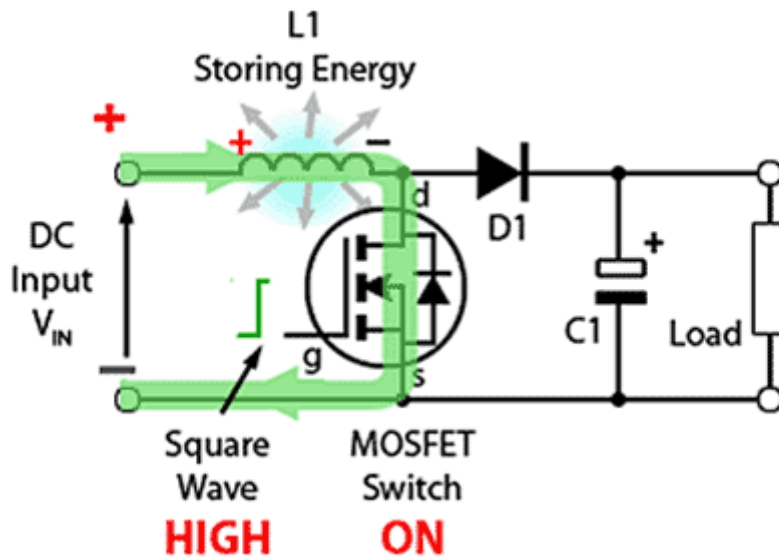
2.1.3. Boost converter – zvyšující měnič

Protože jako zdroj v této práci jsou určeny baterie s napětím nižším, než je napětí potřebné k napájení vybrané diody, nedílnou součástí celého obvodu musí být zvyšující DC-DC měnič, který potřebné napětí zajistí. Jak název napovídá, výstupní napětí je tedy vyšší než napětí vstupní, nicméně je důležité mít na paměti, že výkonové poměry a rovnice (2.1) musí stále platit. Vyšší napětí tedy dostáváme za cenu vyššího proudu odebíraného ze zdroje než dodávaného do zátěže a navíc zaplatíme ztrátami v měniči samotném. Principiální schéma takového měniče je ukázáno na obr. 2.6.



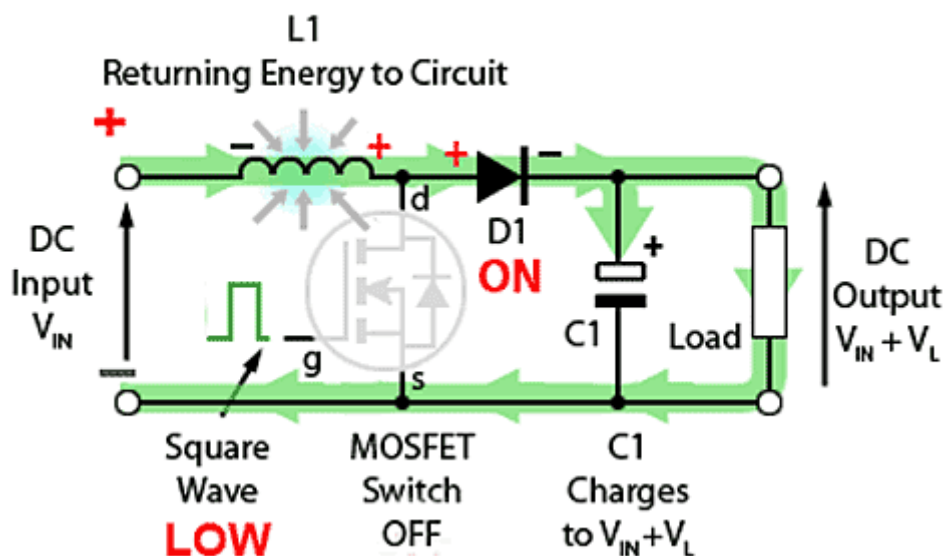
Obr. 2.6: Schéma základního zvyšujícího měniče [4]

Na obr. 2.7 je ukázán princip činnosti měniče ve stavu sepnutého spínače, který si můžeme představit jako ideální. Cívkou L1 začne procházet proud a ukládá se v ní energie ve formě magnetického pole. Zbytkem obvodu v důsledku mnohem vyšší vodivosti spínače neprochází téměř žádný proud.



Obr. 2.7: Zvyšující měnič v počáteční fázi sepnutého spínače [4]

Na obr. 2.8 je znázorněn stav po vypnutí spínače. Náhlý pokles hodnoty proudu způsobí, že cívka $L1$ vytvoří opačně orientované elektrické pole proti sepnuté fázi ve snaze udržet tekoucí proud pomocí uložené magnetické energie. Toto napětí se sečte se vstupním a přes diodu se přenáší do zátěže a nabíjí kondenzátor $C1$.

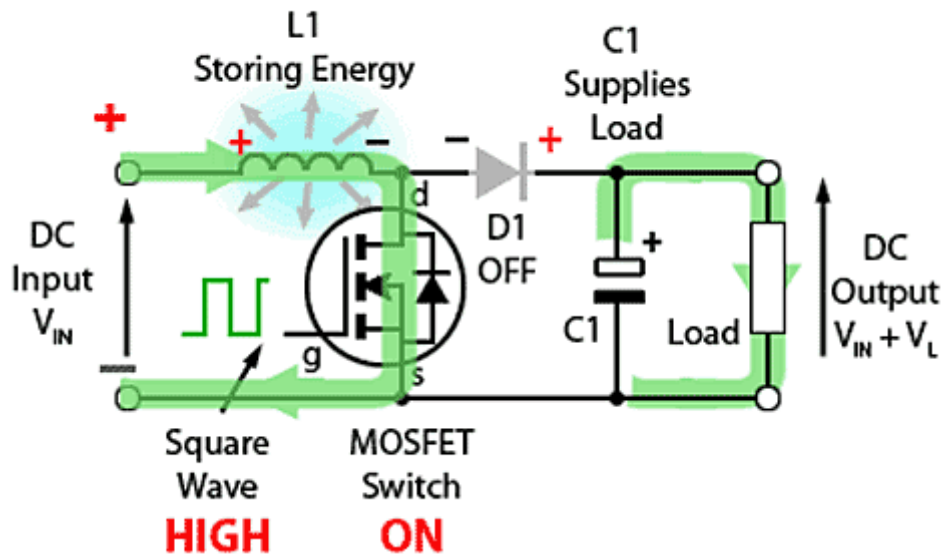


Obr. 2.8: Zvyšující měnič ve fázi rozepnutého spínače [4]

Obr. 2.9 znázorňuje měnič v dalších cyklech. V další fázi sepnutého spínače je dioda $D1$ uzavřená díky náboji v kondenzátoru, z kterého je kontinuálně napájena zátěž a je tudíž vybíjen a znovu nabíjen na součet vstupního napětí a napětí vytvořeného cívkou ve fázi rozepnutého spínače. Na zátěži tak může být udržováno téměř konstantní napětí.

Teoreticky je výstupní napětí určeno vstupním napětím a střídou s spínání podle

$$V_{\text{out}} = \frac{V_{\text{in}}}{1 - s} \quad (2.3)$$



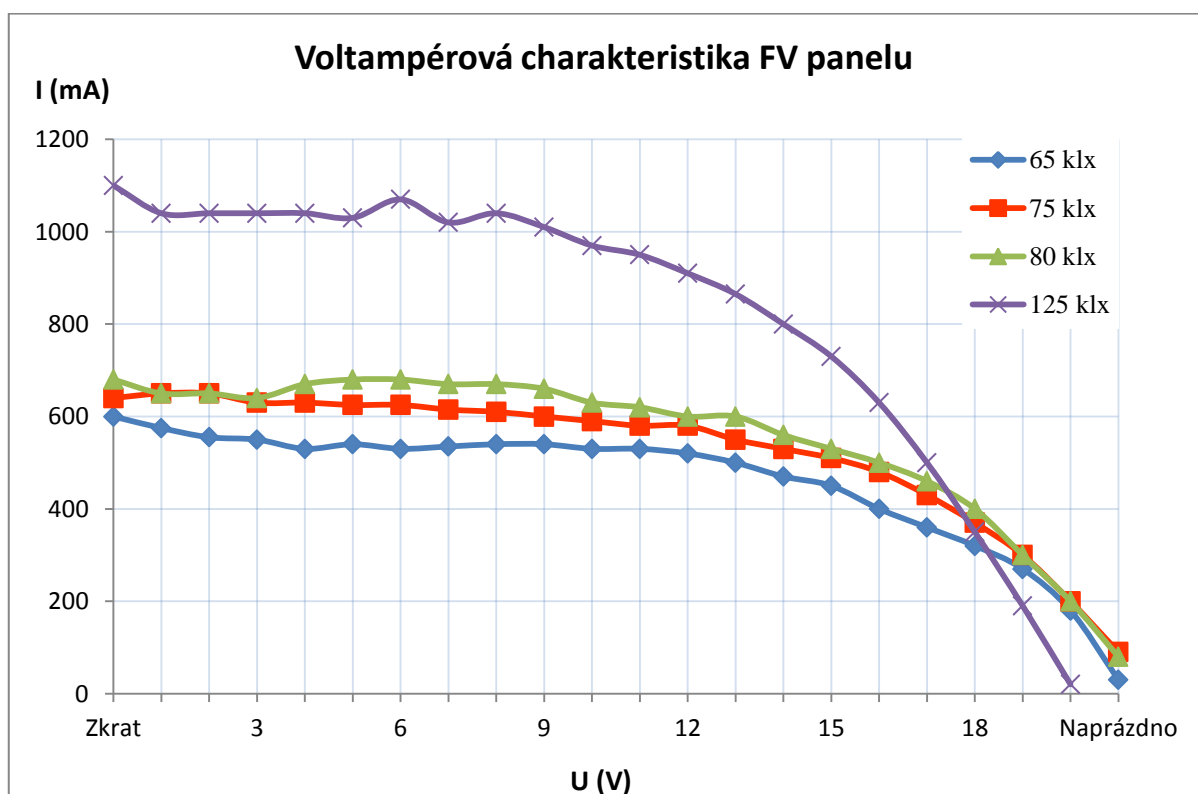
Obr. 2.9: Zvyšující měnič ve fázi sepnutého spínače v dalších cyklech [4]

V praxi existuje mnoho IO, které využívají těchto struktur a spínají podle nastavené reference napětí tak, aby výstup byl konstantní. U proudového zdroje je tato reference malá, aby nevznikaly velké nežádoucí ztráty, protože úbytek je tvořen proudem na rezistoru ve snímané větvi. Pokud tedy budeme schopni řídit tuto referenci, můžeme snadno nastavit i proud tekoucí v našem případě LED diodou.

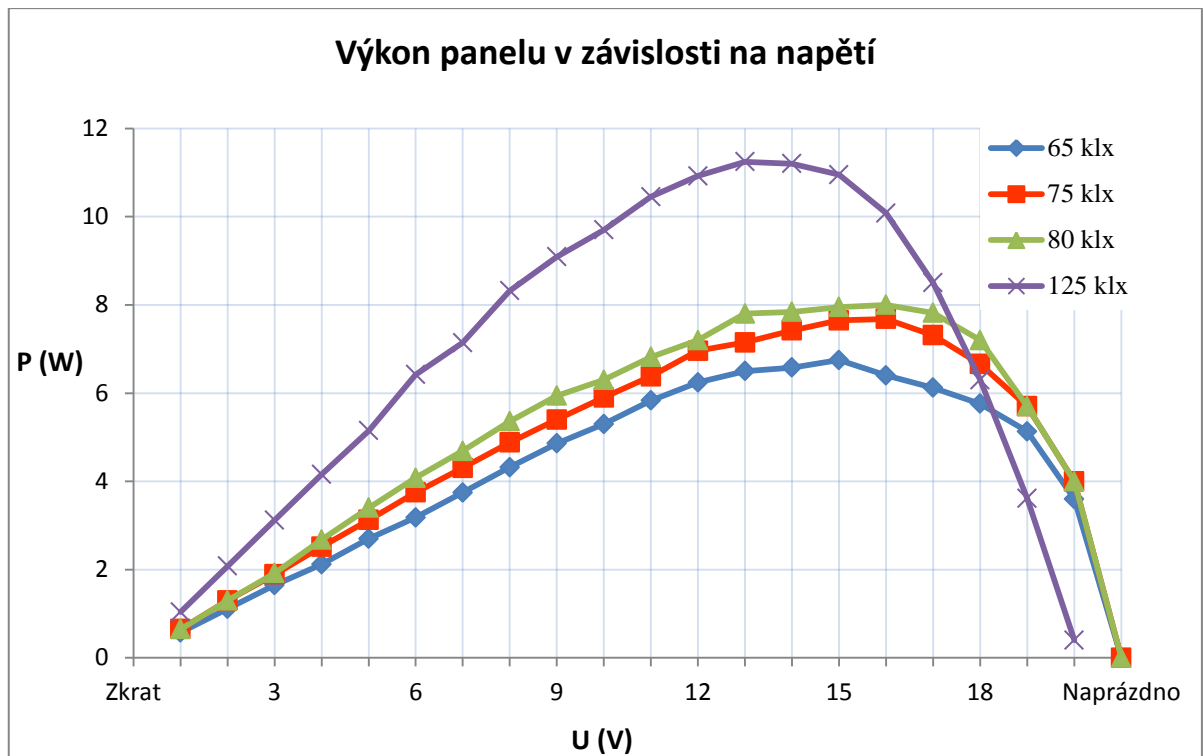
3. Maximum Power Point Tracking

V bakalářské práci bylo k nabíjení baterií využíváno techniky konstantního proudu, protože to je metoda nejvhodnější k nabíjení Ni baterií. Alespoň co se jejich životnosti a správného ukončení nabíjení týká. Nyní ale plánujeme použít k nabíjení podstatně méně výkonný panel a baterii s větší kapacitou. Konstantní proud, který bychom z panelu mohli čerpat, by tedy nemusel být ani dostatečně velký, aby zajistil správné ukončení nabíjení, či aby baterie mohl poškodit. A proto je třeba se zaměřit na optimální výkonové využití panelu tak, abychom nepromarnili žádnou dostupnou solární energii.

K tomu se v praxi používá techniky zvané Maximum Power Point Tracking, sledování bodu maximálního výkonu. Tento bod se může lišit pro různé panely a je ovlivněn okolními faktory, především momentální teplotou panelu, jeho osvětlením atd. Na obr. 3.1 je vidět VA charakteristika panelu použitého v [2]. Je vidět, že se panel chová víceméně jako zdroj proudu až do určitého napětí, kdy začíná proud klesat. V tomto okamžiku je panel schopný dodávat největší množství energie, jak vyplývá z obr. 3.2 a v tomto bodě budeme chtít panel provozovat. Existuje množství technik, jak tento bod hlídat a několik nepoužívanějších bude popsáno na následujících stranách. Praktické aplikace samozřejmě mohou kombinovat více uvedených a využívat vždy tu neoptimálnější. Obecně lze používat MPPT pro libovolné aplikace, nejen pro solární panely.



Obr. 3.1: Experimentálně zjištěná zatěžovací charakteristika FV panelu pro různá osvětlení [2]



Obr. 3.2: Experimentálně zjištěná výkonová charakteristika FV panelu pro různá osvětlení [2]

a) Konstantní napětí

Nejjednodušší metoda, která využívá jednoho udávaného V_{MP} , napětí maximálního výkonu. Je však zřejmé, že ne za všech podmínek bude toto napětí právě napětím maximálního výkonu. Napětí maximálního výkonu se mění u FP hlavně se změnou teploty a zavedením jiné opačně teplotně závislé reference se dá také kompenzovat. Jak je vidět z obr. 3.2, posun křivky pro maximální osvětlení, kdy byla teplota podstatně větší, není nijak extrémně výrazný. Proto stojí za zvážení, jestli se vyplatí přidávat další součástky s další spotřebou ke kompenzaci teplotního posunu.

Pro solární aplikace je tato metoda vhodná především pro aplikace s malým výkonem. Napětí maximálního výkonu se příliš nemění a hlavní přínos této metody spočívá v její jednoduchosti, a tím i energetické nenáročnosti, protože není vyžadováno výpočetního výkonu jako například u metody Perturb & Observe.

b) Napětí naprázdno

Vylepšením předešlé metody je využití V_{OC} , napětí naprázdno, z kterého je poté dopočítáváno

$$V_{MP} = V_{OC} \cdot k \quad (3.1)$$

kde typicky $0,7 < k < 0,8$. Tato metoda zohledňuje jak rozdíly v osvětlení, tak i rozdíly způsobené rozdílnou teplotou panelu, neboť teplotní závislost V_{OC} je stejná jako teplotní

závislost V_{MP} . Musí však být pravidelně kontrolováno a měřeno aktuální napětí naprázdno. Potřeba upravit V_{OC} může být indikována měřením dodávaného proudu.

c) Proud nakrátko

Obdobně jako v metodě s napětím naprázdno, můžeme přes konstantu k dopočítávat proud maximálního výkonu I_{MP} ze změřeného zkratového proudu. Během měřicího pulzu, kdy napětí spadne k nule, musíme ale zajistit jiný zdroj napájení pro obvod napájený ze solárního panelu. Zde se k pohybuje v rozmezí 0,9 – 0,98.

d) Perturb & Observe

Tato metoda funguje na neustálé změně napětí nebo proudu (Perturb) a hlídání (Observe) výkonu. Pokud tedy např. zvýšíme proud, dojde-li k navýšení výkonu, působilme dále stejnou kladnou změnou, až dokud se výkon nezačne zmenšovat. Důležitá je volba správného kroku, aby nedocházelo k oscilacím okolo MPP nebo netrvalo příliš dlouho tento bod najít. Také můžeme volit změnu napětí, nebo proudu. Při změně úrovně osvětlení se mění více proud a při nízkých osvětleních by hledání pomocí změny napětí nemuselo korektně fungovat. Metoda používaná kvůli své složitosti a náročnosti především u aplikací s velkým výkonem (v solární oblasti např. elektrárny), kde každý posun od ideálního maxima způsobuje velké energetické ztráty.

e) Přírůstek vodivosti

Hledání maximálního výkonu je založeno na tom, že nastává v případě, kdy je okamžitá vodivost rovna jejímu zápornému přírůstku.

$$\frac{dI_{FV}}{dU_{FV}} = \frac{I_{FV}}{U_{FV}} \quad (3.2)$$

Prakticky se mění reference U_{FV} , napětí panelu, dokud není splněna rovnice (3.2) a je nalezen MPP. Poté se přejde ke hlídání dI_{FV} a pokud toto není rovno nule, začne se hledat nový bod maximálního výkonu.[5]

4. Návrh a realizace jednoduchého fotovoltaického zdroje

Výběr hlavních „výkonových“ komponent

Nejdříve je třeba vybrat základní komponenty jako zdroj energie, v našem případě FP, LED a baterii k uložení energie. K úvahám o tom, jak výkonné a velké použít, poslouží dobře jednoduchá výkonová rovnice (2.1). Výběr LED byl již naznačen výše.

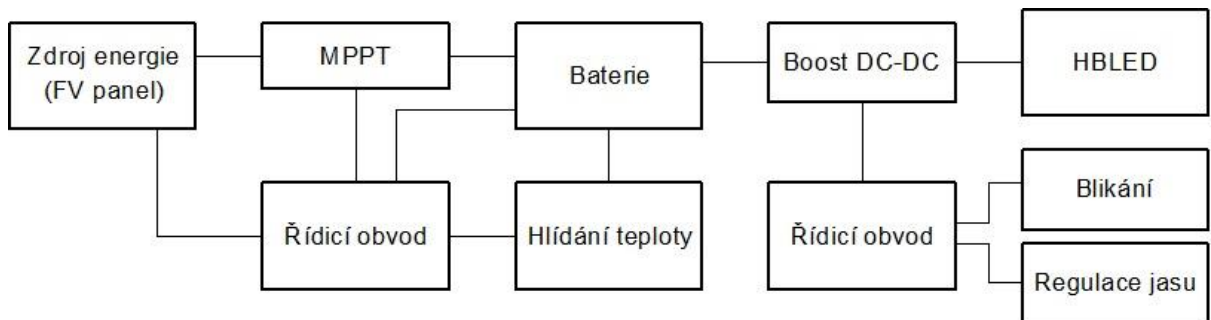
Domluveným zadáním bylo dáno, že má mít dioda výkon cca 10 W. To by znamenalo použití poměrně velké baterie, kterou by bylo třeba nabíjet i několik dní, anebo zajistit dostatečně silný zdroj energie. FP by měl ale na druhou stranu být co nejmenší, a tudíž bude mít malý výkon. Díky kompromisu byla nakonec vybrána dioda uvedená výše se špičkovým výkonem 6,6 W. Obvyklé kapacity baterií jsou okolo 2 A · h. Aby baterie nebyla příliš zatěžována, maximální vybíjecí proud bude přibližně 0,5 CA (CA se používá pro označení poměrné jednotky ke kapacitě baterie, např. pro baterii s kapacitou 1 A · h znamená 0,5 CA vybíjecí proud 500 mA). Teoreticky by tedy měla být baterie schopna zásobovat zařízení energií 2 hodiny. Ve skutečnosti to bude ovšem méně, protože platí, čím větší vybíjecí proud, tím menší „kapacita baterie“. Udávaná kapacita běžně platí pro vybíjecí proudy 0,2 CA. Z určeného proudu 1 A do zátěže a maximálního příkonu 6,6 W bez uvážení ztrát vychází potřebné napětí zhruba 7 V. To odpovídá baterii z šesti článků NiCd (NiMH), popřípadě dvou článků Li-Ion. Obě takové baterie mají nominální napětí 7,2 V. Jak bude uvedeno dále v návrhu, tohoto faktu může být využito k univerzálnosti nabíječky a možnosti použití obou typů akumulátoru.

Teoretická elektrická práce určená z (4.1), kterou může v předešlém odstavci zmíněná baterie vykonat, je 14,4 W · h. Pokud uvážíme nabíjecí ztráty baterie a ztráty měniče zajišťujícího nabíjení, můžeme tvrdit, že k nabití této baterie potřebujeme vykonat práci blízkou se hodnotě 20 W · h. Aby bylo možné nabíjení provést v rozumné době, například jednoho slunečného odpoledne, a zároveň nebyly FP příliš rozměrné, jako zdroje energie byly vybrány, s ohledem na rozměry i ekonomickou dostupnost, dva 2W FP s následujícími udávanými parametry:

Nominální výkon:	$P = 2 \text{ W}$
Napětí při maximálním výkonu	$U_{MP} = 6 \text{ V}$
Proud při maximálním výkonu	$I_{MP} = 333 \text{ mA}$

$$W = P \cdot t \quad (4.1)$$

4.1. Blokové schéma



Obr. 4.1: Blokové schéma obvodu

První část vlevo od baterie na obr. 4.1 zajišťuje nabíjení baterie maximálním možným dostupným výkonem a obsahuje příslušné řízení a kontrolu. Druhá část slouží k napájení LED a regulací protékajícího proudu umožňuje měnit jas a zajišťuje výstražnou funkci blikání.

4.2. Nabíjecí část obvodu

Způsob nabíjení

Existuje několik způsobů nabíjení a především vyhodnocení konce nabíjení niklových akumulátorů, které jsou uvedeny a popsány v [2].

Pro nabíjení NiCd je nejvhodnější metodou nabíjení konstantní proudem s vyhodnocením metodou ΔV , tedy detekce poklesu napětí baterie o několik, typicky 8 mV. Tento pokles je spjat mimo jiné s prudkým nárůstem teploty. Ideálním řešením je tedy detekce ΔV při konstantním proudu tekoucím do baterie, tato metoda je ovšem neslučitelná s maximálním využitím FP. V bodě maximálního výkonu by se panel ocitl pouze v případě, že by osvětlení bylo právě dostačující na napájení nabíječky. Je potom zřejmé, že takový případ nastane spíše ojediněle. Na druhou stranu, pokud nebude proud do baterie konstantní, její napětí bude kolísat s měnícím se protékajícím proudem o hodnoty větší než 8 mV. Chceme-li tedy využít FP na maximum, jak je cílem této práce, tuto metodu, ačkoli nejspolehlivější, nelze použít.

Existují i další metody, které jsou ovšem podstatně méně spolehlivé a nepřesné. Mezi ty patří například vyhodnocení pomocí teploty, fixního napětí, počítání náboje a další. V této práci bude využito nabíjení do hranice V_{co} , kdy dojde k ukončení, a současné hlídání teploty. V našem případě jde vlastně o nabíjení maximálním dostupným proudem do hranice konečného napětí. Taková metoda se víceméně používá při nabíjení lithiových akumulátorů, které jsou v dnešní době běžnější a progresivnější než NiCd. Tato shoda není náhodná a je použito záměrně napětí akumulátoru 7,2 V, neboť nabíječka bude schopna pracovat jak s niklovými, tak s lithiovými akumulátory. K těm by měl být nabíjecí cyklus dokonce šetrnější,

protože nabíjení na konstantní napětí je u lithiových baterií žádoucí, zatímco u NiCd/NiMH je to kompromisem pro dosažení našich požadavků.

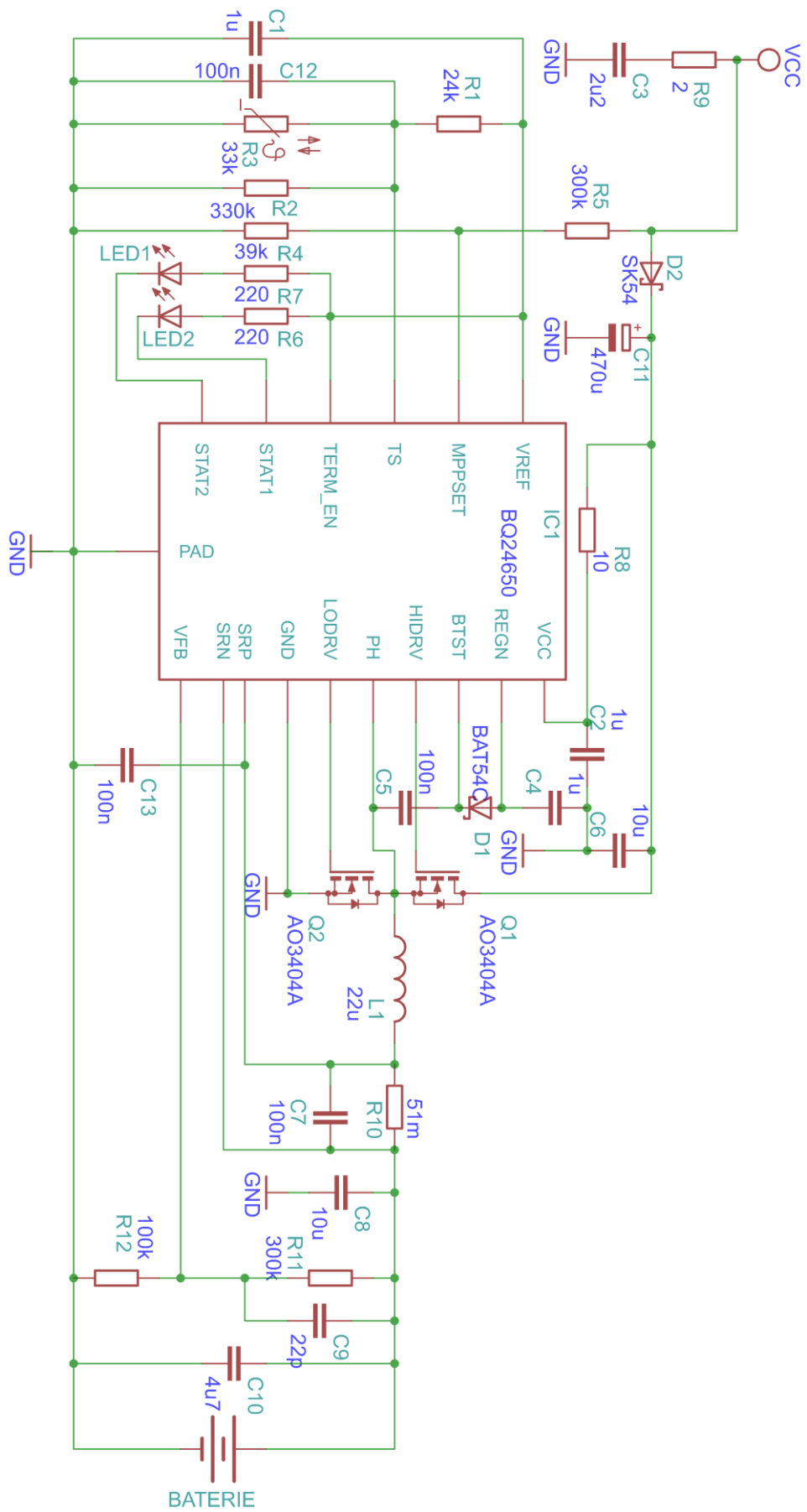
MPPT

Bylo již uvedeno, že nejpřesnější metodou je neustálé hlídání a počítání nového optimálního bodu na výkonové křivce. Tyto metody jsou ovšem také nejsložitější a energeticky nejnáročnější. V této práci bude využito obvodu, který zajišťuje práci v oblasti MPP pomocí nastavení fixního napětí maximálního výkonu. To se u solárních článků mění hlavně s teplotou, přibližně o -2 mV na jeden PN polovodičový přechod. Pokud uvažíme napětí generované jedním přechodem 0,6 V, na náš 12V zdroj vychází 20 článků, což odpovídá poklesu U_{MP} o $40 \text{ mV} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$. Tento pokles je možné kompenzovat například měřením teploty a zanesením napětí, které vyrovná tento pokles. Ale změna není nijak výrazná a vzhledem k tomu a faktu, že bude využito panelu o výkonu pouhých 4 W, v této práci teplotní pokles kompenzován nebude.

4.2.1. Obvodový návrh

Základem této části je IO od firmy Texas Instruments s označením BQ24650, který sleduje proud tekoucí do baterie i napětí panelu a spínáním tranzistorů Q1 a Q2 velikost proudu řídí.

Schéma nabíječky je vyobrazeno na obr. 4.2.



Obr. 4.2: Obvodové schéma nabíječky

Řídicí obvod BQ24650 [6]

IO BQ24650 je určen přímo pro nabíjení baterií solárními články. Mezi jeho hlavní funkce a vlastnosti, které budou využity v této práci, patří:

- MPPT – sledování bodu maximálního výkonu při nastavitelném napětí
- Vstupní napětí v rozsahu 5 – 18 V
- Řízení nabíjení sledováním napětí baterie, teploty
- Řízení N-MOS tranzistorů pro spínaný snižující měnič
- Indikace stavu pomocí LED
- Detekce připojené baterie a režim pro nabíjení hluboce vybité baterie

Dva tranzistory N-MOS jsou součástí snižujícího měniče napětí. Tyto tranzistory se spínají s měnicí se střídou tak, aby byly splněny nastavené požadavky. Pokud se sepne tranzistor Q1, začne se ukládat energie v cívce L1, roste proud dodávaný do baterie přes R10. Na tomto odporu je snímáno napětí, které je vyhodnoceno a pokud je překročen limit, Q1 se vypíná a naopak Q2 otevírá. Cívka se snaží udržovat konstantní proud za cenu uložené energie. Když proud odporem R10 klesne pod nastavenou úroveň, cyklus se opakuje. Navíc může být spínání tranzistorů ovlivněno poklesem napětí zdroje, v důsledku čehož se střída upraví, aniž by se dosáhlo proudu odporem R10, který byl nastaven. Tento nastavený limit je tak maximálním proudem, který může do baterie téct v případě dostatečného výkonu zdroje. Teoreticky by tedy pro náš účel mohl být odpor úplně z návrhu vypuštěn a FP by dodával maximální možný proud. V návrhu ovšem odpor bude zařazen, přestože na něm budou vznikat částečné energetické ztráty, z důvodu ochrany před zkratem a hlavně kvůli možnosti použít silnější zdroj, například i síťový adaptér.

Popis pinů a přidružených součástek

Rozložení v pouzdře je znázorněno v příloze A.1.

VCC

Pin pro připojení napájecího napětí (solárního panelu). R8 a C2 tvoří filtr k odstranění šumu z napájení.

MPPSET

Slouží k nastavení MPP. Vstupní zdroj vytváří přes dělič R4, R5 napětí na tomto vstupu, které je regulováno na 1,2 V. Pokud napětí klesne pod tuto mez, dojde ke snížení nabíjecího proudu tak, aby bylo udrženo děličem nastavené napětí panelu.

STAT1, STAT2

Výstupy typu otevřený drain. Indikují stav kontroléru, STAT1 je v logické nule během nabíjecího cyklu, STAT2 při úspěšném ukončení nabíjení. Pokud svítí obě LED, IO je v chybném stavu, ke kterému by nemělo ideálně dojít. V ostatních případech jsou oba výstupy ve stavu HI. R6 a R7 omezují proud diodami, aby nedošlo k jejich zničení.

TS

Vstup pro hlídání teploty. Aby nabíjení proběhlo v pořádku a vůbec začalo, musí být napětí na tomto vstupu v povoleném rozmezí. K nastavení těchto úrovní slouží v zapojení dělič napětí R1, R2 s připojeným NTC rezistorem R3. C12 je blokovací kondenzátor.

VREF

Referenční zdroj napětí 3,3 V. Je využit jako zdroj pro indikační LED a nastavení napětí na pinu TS. Kondenzátor C1 je blokovací kondenzátor pro tento výstup.

TERM_EN

Vstup, kterým se dá zablokovat funkce ukončení nabíjení. V našem případě potřebujeme, aby nabíjení bylo hlídáno, a proto je připojen na VREF. Tím je ukončení nabíjení povoleno.

VFB

Zpětná vazba z baterie. Na tomto pinu je snímáno napětí baterie, které je přenášeno přes dělič R11, R12. Napětí na tomto pinu je regulováno na 2,1 V. Pokud je napětí pod úrovní 1,55 V, je aplikováno tzv. „přednabíjení“ z důvodu ochrany hluboce vybitých baterií. Když dojde k překročení této úrovně, automaticky se přejde na nabíjení nastaveným proudem až na hladinu 2,1 V. C9 je blokovací kondenzátor.

SRN, SRP

Piny pro připojení záporného (SRN) a kladného (SRP) pólu snímacího rezistoru R10 a kondenzátoru C7 k filtraci rozdílného rušení. Napětí mezi těmito piny je regulováno na 40 mV. Pro odpor 40 mΩ tedy podle Ohmova zákona (4.2) vychází proud 1 A. V módu pro hluboce vybité baterie je „přednabíjecí“ proud omezen na 1/10, napětí mezi SRN a SRP je 4 mV.

$$U = R \cdot I \quad (4.2)$$

Kondenzátor C13 slouží k filtraci souhlasného rušení.

GND

Výkonová země pro připojení uzlu, kterým protéká velký proud (source tranzistoru Q2, vstupní a výstupní kondenzátory).

REGN, PH, BTST

Piny pro připojení součástek potřebných k řízení tranzistorů. D1 a C5 tvoří nábojovou pumpu pro udržení potřebného napětí pro otevření Q1. Když se uzavře tranzistor Q2, na sourcu tranzistoru Q1 vzroste napětí, a tudíž je pro otevření třeba vyššího napětí i na gate. To je zajištěné nábojovou pumpou. C4 je blokovací kondenzátor.

HIDRV, LODRV

Tyto piny jsou určeny na přímé připojení ke gate elektrodám tranzistorů.

PAD

Zajišťuje propojení se zemí a zároveň odvod tepla z IO.

Ostatní součástky

C3, R9

Vstupní filtr pohlcující napěťové špičky, které by mohly vzniknout při připojení síťového adaptéru, aby nedošlo k přepětí na pinech IO. Pro použití pouze s FP nadbytečné součástky, nicméně takto lze použít zařízení i pro nabíjení ze sítě.

C6, C8, C10, C11

Vstupní a výstupní kondenzátory pro pokrytí napěťových špiček a vyhlazení průběhů napětí.

D2

Ochrana proti přepólování a vybíjení baterie v případě, že na FP poklesne napětí pod úroveň napětí baterie.

Výběr a výpočty hodnot součástek

Většina součástek má poměrně velký možný rozsah hodnot bez omezení jejich funkce a výrobce IO doporučuje, jaké hodnoty použít pro daný IO. V této práci jsou voleny s ohledem na dostupnost na trhu. Budou použity součástky SMD (surface mounted device – s povrchovou montáží), převážně velikosti 1206, kvůli jejich velikosti, ceně a trendu v jejich používání, přestože na manuální práci nejsou tak vhodné.

D1, D2 – Obě jsou Schottky diody kvůli jejich malému úbytku v propustném směru. Přes D2 prochází veškerý proud odebíraný ze zdroje, takže na ní vznikají relativně velké ztráty a napěťový úbytek je kritickým faktorem při výběru. Zároveň musí vydržet výkon, který se na ní ztratí. Byla zvolena dioda SK54. U D1 naopak nevyžadujeme velký výkon, ale malý úbytek je žádoucí, protože dioda tvoří nábojovou pumpu a úbytek na ní se odečítá od výsledného napětí. Zároveň musí být rychlá, aby stačila sledovat změny při PWM. Použita bude dvojitá dioda BAT54C.

Q1, Q2 – Na oba tranzistory jsou kladeny stejné požadavky, mezi které patří co nejmenší odpor kanálu v sepnutém stavu R_{DS-ON} , rychlost nebo malá kapacita hradla, aby se snížily spínací ztráty. V neposlední řadě musí tranzistory vydržet protékající proud a napětí, které na nich bude. Po uvážení všech kritérií byly zvoleny tranzistory AO3404A

Kondenzátory – Kapacity kondenzátorů jsou určeny na doporučení v katalogovém listu obvodu a velikost kondenzátoru C11 pokrývajícího nepatrné poklesy energie napájení je kompromisem mezi množstvím náboje, který může udržet, a jeho velikostí. Všechny jsou keramické, kromě elektrolytického C11.

L1 – Stejně tak cívka má hodnotu 22 μH na doporučení výrobce pro nabíjecí proud 0,5 A. Zároveň je potřeba, aby měla co nejmenší parazitní odpor. Proud, kdy dochází k nasycení, musí být větší než maximální možný nabíjecí.

LED1, LED2 – Indikační diody mají každá jinou barvu kvůli rozlišení.

R8, R9 – Velikosti těchto odporů jsou podle doporučení v katalogovém listu obvodu.

R1, R2, R3 – Dělič, který nastavuje rozmezí povolených pracovních teplot. Povolenému rozmezí odpovídá napětí na pinu TS $U_{\text{HTF}} = 1,57 \text{ V}$ pro „horkou“ hranici a $U_{\text{LTF}} = 2,43 \text{ V}$ pro „chladnou“ hranici.

Velikost odporu R3 (NTC termistor) byla zvolena jako 33 $\text{k}\Omega$ (platí při referenční teplotě). Jeho absolutní hodnota se určí ze vzorce

$$R_{\text{NTC}} = k \cdot R_{\text{NTC}_{25}} \quad (4.3)$$

kde k teplotní koeficient – pro zvolené povolené rozmezí teplot

$$0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad k = 2,4295 \quad R_{\text{NTC}} = 80,1735 \text{ k}\Omega$$

$$40 \text{ } ^\circ\text{C} \quad k = 0,6226 \quad R_{\text{NTC}} = 20,5458 \text{ k}\Omega$$

$R_{\text{NTC}_{25}}$ odpor termistoru při referenční teplotě 25 $^\circ\text{C}$

Pro odporový dělič napětí platí

$$\frac{U_{R_1}}{R_1} = \frac{U_{R_2}}{R_2} \rightarrow U_{R_1} + U_{R_2} = U_{R_1} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = U_{R_2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \quad (4.4)$$

kde R_1, R_2 velikosti odporů, kterými je dělič tvořen

U_{R_1}, U_{R_2} napětí na jednotlivých odporech

Z čehož pro naše názvy počítaných veličin lze vyjádřit

$$\frac{R_{R1}}{R_{R2} || R_{\text{NTC}}} = \frac{U_{R1}}{U_{R2} || R_{\text{NTC}}}$$

Pokud do (4.4) dosadíme dvě hodnoty R_{NTC} a napětí na termistoru odpovídající limitním teplotám, ze soustavy rovnic o dvou neznámých dostaneme velikosti $R_{R1} = 23,4 \text{ k}\Omega$ a $R_{R2} = 343 \text{ k}\Omega$. Dostupné řadové hodnoty, které jsou nejbližší: $R_{R1} = 24 \text{ k}\Omega$ a $R_{R2} = 330 \text{ k}\Omega$. Tím se teplotní hranice posunou nevýznamně níže, což nám nevadí.

R4, R5 – Dělič pro nastavení U_{MP} . S použitím (4.4) spočítáme hodnoty odporů tak, aby $U_{\text{MP}} = 12 \text{ V}$. Přitom využijeme faktu, že napětí na pinu MPPSET je regulováno na 1,2 V. Hodnotu jednoho odporu zvolíme z řady, například $R_{R4} = 39 \text{ k}\Omega$. Tato velikost je kompromisem mezi ztrátami na děliči a přesností. Velikost odporů nesmí být natolik velká, aby byl dělič ovlivněn impedancí vstupu IO.

$$\frac{U_{\text{MPPSET}}}{R_{R4}} = \frac{U_{R5}}{R_{R5}} = \frac{12 - U_{\text{MPPSET}}}{R_{R5}}$$

$$\frac{1,2}{39 \cdot 10^3} = \frac{12 - 1,2}{R_{R5}}$$

$$R_{R5} = 351 \text{ k}\Omega$$

Nejbližší dostupná hodnota je 360 kΩ. Hodnota U_{MP} vychází tedy téměř přesně 12 V. To je ovšem hodnota panelu udávaná pro teplotu 25 °C, v reálných podmínkách se FP na slunci ohřeje a U_{MP} klesne. V praktické části byla změřena skutečná hodnota U_{MP} a podle naměřených výsledků (Obr. 5.4) byla hodnota R_{R5} upravena na $R_{R5} = 300 \text{ k}\Omega$, pro které vychází $U_{\text{MP}} \doteq 10,43 \text{ V}$, což teoreticky odpovídá poklesu při zvýšení teploty o zhruba 40 °C. Dalším důvodem pro nastavení napětí maximálního výkonu pod úroveň 12 V, je skutečnost, že nabíječku navrhujeme zároveň pro použití se síťovým zdrojem. Pokud by bylo U_{MP} nastaveno na 12 V, síťový dvanácti-voltový zdroj by mohl udržovat napětí těsně pod touto hranicí a MPPT algoritmus by uvedl zařízení do stavu, kdy by byl nabíjecí proud roven nule.

R6, R7 – Omezení proudu LED diodami. Pokud od napájecího napětí 3,3 V odečteme napětí LED, můžeme opět snadno z (4.2) určit velikost odporů, abychom dostali požadovaný proud. Aby ztráty byly co nejmenší a zároveň bylo vidět, že LED svítí, bylo zvoleno odporů $R = 220 \Omega$, čímž se proud omezí na přibližně 5 mA.

R10 – Nastavení maximálního nabíjecího proudu. IO se snaží na tomto odporu udržet konstantní napětí 40 mV. Pro vybranou cívku a její hodnotu by se neměl maximální proud dostat příliš přes 0,5 A. Tomu odpovídá velikost odporu

$$R_{R10} = \frac{40 \cdot 10^{-3}}{0,5} = 80 \text{ m}\Omega$$

0,5 A je zároveň nejvyšší teoretická hodnota, kterou je schopen dodat náš solární zdroj, proto by mohl být odpor vypuštěn. Je ovšem třeba pro omezení proudu v případě hluboce vybitých baterií, kdy je proud omezen na 1/10 normálního proudu, pro 80 mΩ tedy 50 mA. Dále je rezistor potřeba jako omezení proudu při případném připojení síťového zdroje, pro který je nabíječka také konstruována, a jako ochrana před zkratem. Dostupnou hodnotou je ovšem velikost 51 mΩ, a proto bude použit takový rezistor. S takovým nastaveným proudem by měla cívka ještě spolehlivě pracovat i při připojení síťového zdroje a jako bonus omezíme ztráty na odporu ve fotovoltaickém módu.

R11, R12 – Nastavení zpětné vazby z baterie. Je potřeba nastavit nabíjecí napětí baterie na 8,4 V. To je běžné nabíjecí napětí lithiových článků (4,2 V / článek). Pro 6 plánovaných NiCd článků to odpovídá napětí 1,4 V / článek. NiCd během nabíjení dosahují i větších hodnot, což nebude v tomto případě možné. To je ale záměrem, abychom omezili proud před koncem nabíjení. Díky tomu se budou ohřívat články pomaleji a zpoždění vyrovnání teplot termistoru a baterie nebude kritické pro její životnost.

Velikost těchto odporů by měla být co největší, aby se přes ně baterie co nejméně vybíjela v momentě, kdy dojde k odpojení zdroje, ale opět by nemělo dojít k ovlivnění

s impedancí vstupu IO. Pro zvolenou hodnotu $R_{R12} = 100 \text{ k}\Omega$, na kterém je napětí regulováno na $U_{VFB} = 2,1 \text{ V}$, vyjde z (4.4) velikost $R_{R11} = 300 \text{ k}\Omega$.

4.3. Část obvodu pro řízení LED

Nejdůležitějším bodem při návrhu této části je proudový zdroj zvyšující napětí, který je schopen ze 7V baterie napájet LED s napětím v propustném směru přesahující 18 V. Dále je třeba zajistit možnost řízení tohoto zdroje tak, abychom mohli plynule regulovat velikost dodávaného proudu.

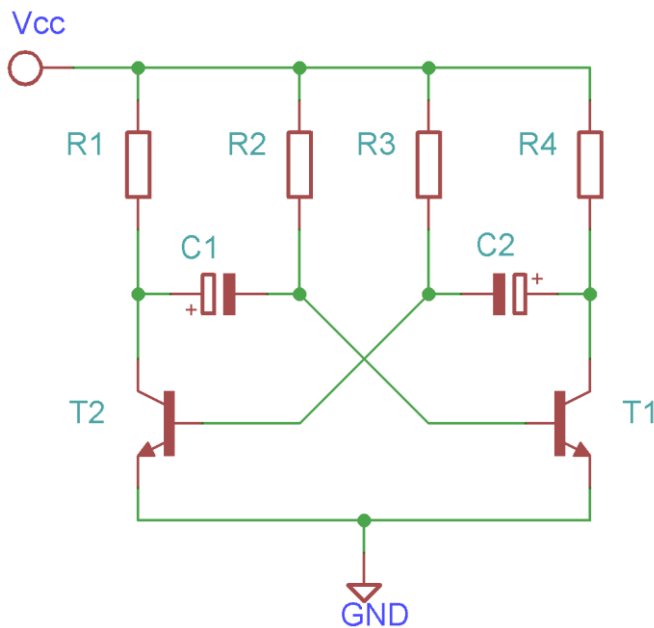
Regulace jasu

V kapitole 2.1.2 byly popsány možnosti stmívání svítivých diod. Stmívání bude řešeno analogovým způsobem, ve smyslu změny velikosti konstantního proudu, který bude diodou procházet. To je výhodné z několika důvodů. Odpadne problém s blikáním diody pro nízké frekvence PWM. Dioda má vyšší účinnost při nižších napájecích proudech, při nižších intenzitách svícení tedy dosáhneme stejné intenzity nižším průměrným proudem než při řízení pomocí PWM. Samotný zdroj proudu ovšem musí mít dostatečně velkou účinnost, aby právě zmíněné výhody nebyly vykoupeny neúměrně velkou energetickou spotřebou samotného zdroje. Z tohoto důvodu odpadá možnost použití lineárních regulátorů a v podstatě jediným možným řešením je použití spínaného zdroje, který sám využívá PWM a umožňuje ve správném zapojení vytvořit námi žádané zvýšené napětí, potřebné pro otevření LED.

Funkce blikání

Součástí zadání je do návrhu integrovat funkci blikání, které může sloužit například jako výstražné světlo. V principu nejjednodušším způsobem, jak toho dosáhnout, je náš proudový zdroj, popsaný v předchozím odstavci, střídavě zapínat a vypínat. V praxi to bude vyřešeno vytvořením dvou střídajících se logických úrovní, pro stav zapnuto a vypnuto, které budou zdroj řídit. Díky tomu bude integrována funkce blikání, přičemž nastavení proudového zdroje (velikost dodávaného proudu – jas diody při blikání) zůstane nezměněné. K vytvoření těchto dvou logických úrovní se dobře hodí jednoduchý astabilní klopný obvod (AKO), tzv. multivibrátor (obr. 4.3).

AKO – astabilní klopný obvod



Obr. 4.3: Schéma AKO

AKO je složen ze dvou spínacích prvků v pozitivní zpětné vazbě s kapacitně odporovou sítí. Obvod se neustále překlápí mezi dvěma stavy, high a low, přičemž jako výstup bereme kolektory tranzistorů T1 a T2. Tyto výstupy jsou komplementární, tzn. pokud je jeden ve stavu high, druhý je ve stavu low.

Po připojení napájení se začnou otevírat oba tranzistory a nabíjet kondenzátory, vlivem reálných vlastností však, přestože tranzistory jsou stejné, dojde k tomu, že se jeden otevře rychleji. Pokud se otevře T1, pravý pól (+) C2 je stažen k zemi, což způsobí záporné napětí na bázi T2, dojde k jeho úplnému uzavření a C1 se nabije na plné napájecí napětí (-0,6 V na přechodu BE tranzistoru T1) – kladná zpětná vazba. C2 se ovšem začne okamžitě vybíjet, na bázi T2 se zvedá napětí, až dojde k jeho otevření, T1 se vypíná a obvod je v opačném stavu. Celý proces se opakuje.

Doba, po které se obvod překlápí z jednoho stavu do druhého, závisí na čase vybíjení kondenzátorů. Tento čas je závislý na množství náboje, který je třeba odvést z kondenzátoru a na rychlosti (velikosti proudu), kterou je náboj odváděn, což v praxi odpovídá veličinám R a C příslušejícím jednotlivým fázím.

Lze odvodit, že pro $V_{CC} \gg V_{BE} \cong 0,6 \text{ V}$ platí

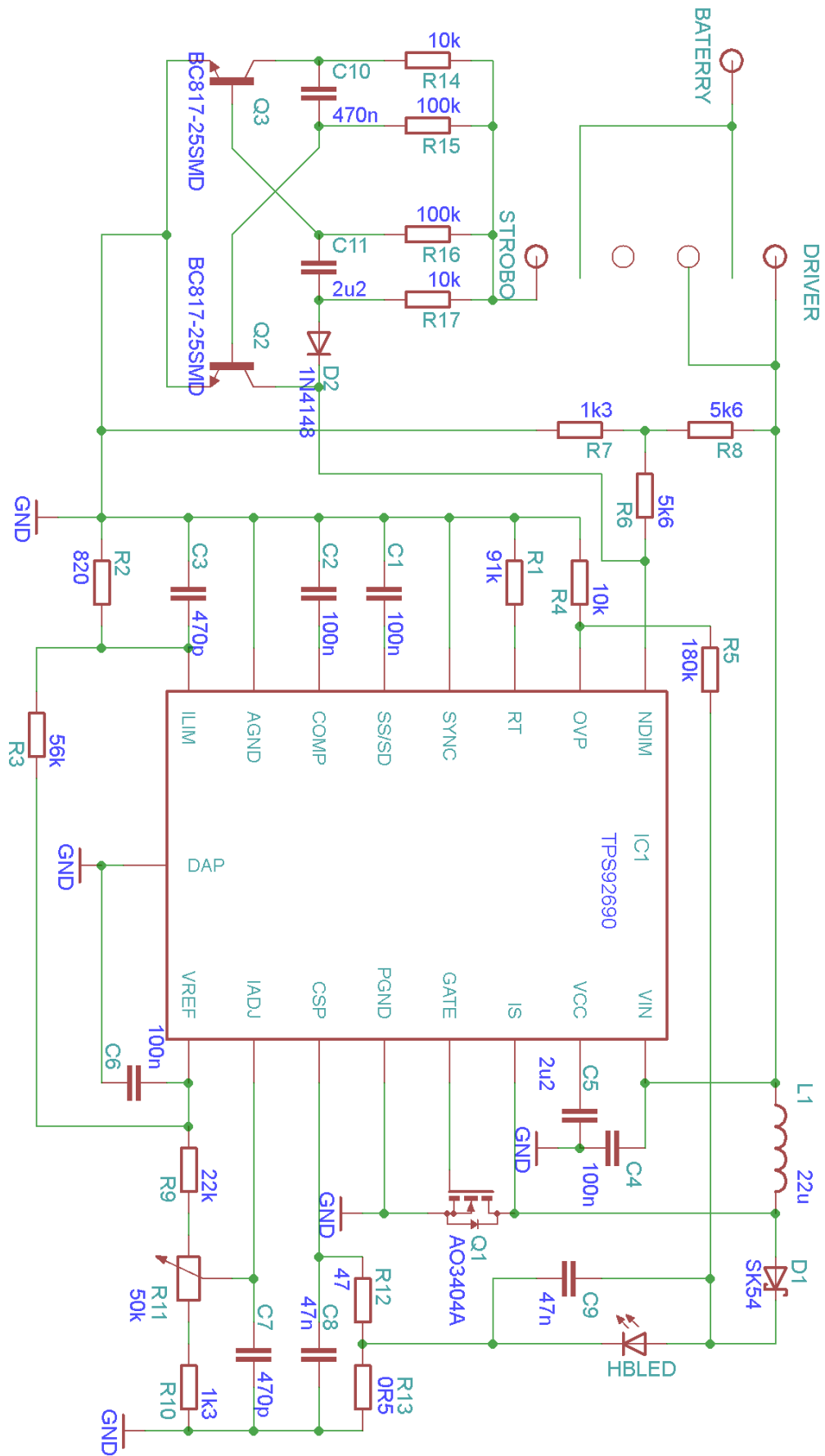
$$T = t_1 + t_2 = \ln(2) R_2 C_1 + \ln(2) R_3 C_2 \quad (4.5)$$

Kde	T	celková perioda jednoho cyklu
	t_1, t_2	doby jednotlivých fází; t_2 je doba, po kterou je otevřen T2 a zavřen T1; pro t_1 opačně
	R_x, C_x	velikosti jednotlivých součástek

4.3.1. Obvodový návrh

Základem této části obvodu je IO s označením TPS92690 od firmy Texas Instruments, který slouží k řízení naší výkonné LED. Zahrnuje řízení spínaného zdroje proudu a umožňuje řízení jasu LED jak analogovým způsobem, tak pomocí externí PWM.

Ovládání uživatelem je řešeno pomocí třípolohového přepínače (na obr. 4.4 v levé části – obrázek je otočen o 90° ve směru hodinových ručiček). V jedné poloze je celé zařízení odpojeno od baterie, v jedné je napájen pouze samotný zdroj proudu a ve třetí navíc AKO zajišťující blikání.



Obr. 4.4: Obvodové schéma LED driveru

Řídicí obvod TPS92690 [7]

IO je navržen jako kontrolér pro LED driver. Mezi jeho hlavní funkce a vlastnosti, které budou využity v této práci, patří:

- Povolené vstupní napětí v rozsahu 4,5 – 75 V
- Nastavitelné napětí na rezistoru snímajícím velikost proudu (50 mV – 0,5 V)
- Ochrana proti přepětí i podpětí
- Vstup pro externí PWM k řízení jasu

V kapitole 2.1.3 byl popsán princip činnosti boost měniče, který je využit v tomto zapojení. Po připojení napájení se otevře tranzistor Q1, cívka L1 ukládá energii a postupně narůstá proud, dokud se nedosáhne nastaveného limitu. Poté je tranzistor vypnut a cívka se snaží udržet procházející proud, na anodě diody D1 (a zároveň na C9 a HBLED) roste napětí, nabíjí se kondenzátor C9, až na něm naroste napětí natolik, že dosáhne úrovně potřebné k otevření vysoce svítivé diody (cca 18 V), kterou začne téct proud. Ten je snímán na sériově zapojeném rezistoru R13 a střída spínání je upravena tak, aby na něm byl ideálně konstantní úbytek (velikost můžeme nastavit). Podle tohoto napěťového úbytku se upravuje střída spínání tranzistoru Q1. K okamžitému uzavření tranzistoru Q1 také dojde při přepětí, podpětí nebo průchodu maximálního proudu tranzistorem Q1 (viz blokové schéma, příloha A.3).

Popis pinů a přidružených součástek

Rozložení v pouzdře je znázorněno v příloze A.2.

nDIM

Vstup pro externí PWM pro řízení jasu diody. Zároveň má funkci ochrany před podpětím. IO obsahuje proudový zdroj 20 μ A zajišťující hysterezi. Pokud úroveň napětí na tomto pinu přesáhne 1,24 V, IO začne pracovat v normálním režimu a začne napájet zátěž. Současně se spustí tento zdroj nutící proud ven z pinu a zajišťující tak hysterezi mezi úrovní spuštění a vypnutí, aby nedocházelo k oscilacím. Odporový dělič R7, R8 slouží k nastavení napětí napájecího zdroje, při kterém dojde k odblokování funkce driveru, R6 je přidán pro zajištění větší hystereze.

OVP

Pin pro ochranu před přepětím (buď vstupním, nebo výstupním). Bude použit pro hlídání výstupního napětí. Stejně jako u pinu nDIM, rozhodovací úroveň je nastavena na 1,24 V a po překročení se spustí 20 μ A proudový zdroj poskytující hysterezi pro opětovné spuštění. Odporů R4 a R5 nastavují hodnotu výstupního napětí, při kterém dojde k zablokování driveru. Velikost R5 navíc udává hysterezi.

RT

Připojením rezistoru se nastavuje základní spínací frekvence zdroje. V našem zapojení nese odpor označení R1.

SYNC

Synchronizační vstupní pin. Pokud je frekvence připojené PWM nižší než frekvence nastavená pomocí odporu RT, je využit vnitřní oscilátor obvodu. Nicméně pro naše účely nebude tento pin využit a proto je pevně připojen k zemi.

SS/SD

Slouží pro připojení externího kondenzátoru (C1) potřebného na soft-start (postupné spuštění) obvodu.

COMP

Slouží pro připojení externího kondenzátoru (C2) pro kompenzační smyčku obvodu.

AGND, PGND, DAP

Připojení zemních uzlů. Propojeny společným padem DAP pod IO. DAP plní zároveň funkci odvodu tepla ze součástky.

VREF

Zdroj referenčního napětí 2,45 V. V zapojení je využito pro napájení děličů nastavujících maximální proud spínacím tranzistorem a referenci ke snímacímu odporu. C6 je blokovací kondenzátor.

ILIM

Napětí nastavené na tento pin pomocí děliče R2, R3 určuje maximální proud spínacím tranzistorem. Ten je snímán na pinu IS a hranicí k vypnutí je dosažení stejného napětí, které je nastaveno na ILIM. Navíc je přidán filtrační kondenzátor C3.

IADJ

Napětím na IADJ lze nastavit velikost proudu, který má procházet diodou. Na stejné napětí, pouze dělené deseti, je regulováno napětí na snímacím rezistoru. Pokud tedy 2x zvýšíme napětí na IADJ, zvýší se zároveň 2x i proud procházející skrz HBLED. Tohoto faktu využijeme při řízení jasu tak, že toto napětí, dané děličem R9, R10, R11 z referenčního napětí, budeme měnit pomocí potenciometru, případně trimru (v zapojení R11). Velikostí R9 lze nastavit horní mez velikosti proudu, naopak velikostí R10 dolní mez. Opět je přidán filtrační kondenzátor - C7.

CSP

Na tento pin je připojen kladný pól snímacího rezistoru R13, na kterém je napětí řízením spínacího tranzistoru regulováno na hodnotu napětí pinu IADJ dělenou 10. Protože proud procházející odporem R13 není úplně konstantní, je přidán filtr tvořený součástkami R12 a C8.

GATE

Výstup driveru řídicího otevírání tranzistoru. Přímo připojen na hradlo Q1.

IS

Snímací pin, díky němuž je rozpoznáno dosažení maximálního přípustného proudu procházejícího tranzistorem. Napětí na něm je porovnáváno s napětím na ILIM.

VCC

K tomuto pinu je připojen blokovací kondenzátor C5 napájení kontroléru.

VIN

Vstup napájecího napětí kontroléru. Blokování je zajištěno kondenzátorem C4.

Ostatní součástky

R14 - R17, C3, C4, Q1, Q2

Tvoří AKO popsany na str. 34.

D2

Odděluje multivibrátor od zbývající části, aby se Q1 a Q2 neotevíraly proudy, které by tekly z napájení přes odpory R8 a R6. Hlavně však odstraňuje postupný náběh vzestupné hrany způsobený pomalým nabíjením kondenzátoru tím, že ho oddělí od kolektoru tranzistoru.

Pokud bude LED driver pracovat v režimu blikání, na pinu kontroléru nDIM se bude přes diodu D2 a odpor R17 dostávat napětí, které způsobí rozvážení děliče nastavujícího úroveň podpětí. Díky tomu bude možno baterii vybit podstatně více, čímž dojde ke snížení její životnosti. Nicméně tato vlastnost je žádoucí, neboť režim blikání je chápán jako „nouzový“ a výstražný a je třeba, aby zařízení fungovalo co nejdéle, přestože za to bude zapláceno životností baterií. Pokud by bylo třeba eliminovat tuto vlastnost, šlo by zapojení jednoduše upravit přidáním jednoho tranzistoru s kolektorem připojeným na nDIM. Tento tranzistor by poté byl řízen z invertovaného výstupu v této práci navrženého AKO.

Výběr a výpočty hodnot součástek

Velká část součástek má poměrně velký možný rozsah hodnot bez omezení jejich funkce a výrobce IO doporučuje, jaké hodnoty použít pro daný IO. Jejich konečný výběr je kompromisem mezi cenou, přesností, parazitními vlastnostmi apod. Budou použity součástky SMD (surface mounted device – s povrchovou montáží), převážně velikosti 1206, kvůli jejich velikosti, ceně a trendu v jejich používání, přestože na manuální práci nejsou tak vhodné.

AKO

D2 – Levná křemíková dioda. Nejsou vyžadovány žádné specifické vlastnosti. Zvolena obyčejná dioda 1N4148.

R14, R17 – Odporů omezující proud tekoucí tranzistory Q1 a Q2 v sepnutém stavu, a tím i ztráty obvodu. Proto je vhodné, aby měly co největší hodnotu. Zároveň se přes ně ale nabíjí kondenzátory ve fázi sepnutého tranzistoru, na jehož bázi jsou připojeny. Během této fáze se musí stačit spolehlivě nabít, proto by měly být hodnoty podstatně menší než hodnoty odporů R15 a R16. Pokud jedna fáze trvá např. 5x déle, dostatečný poměr odporů je teoreticky 1:5. Dalším důvodem ke snížení jejich velikosti je strmost vzestupné hrany, která je s jejich rostoucí velikostí více zaoblená. V naší aplikaci je ovšem zapojena dioda D2, která tento problém řeší. Zvoleny byly odpory velikosti $R = 10 \text{ k}\Omega$.

R15 + C10, R16 + C11 – Kombinace těchto součástek udávají časové konstanty a dobu trvání jednotlivých fází. Vzhledem k tomu, že zařízení je napájeno z baterie, doba svícení bude několikrát kratší, aby se omezila spotřeba a zvýšila doba, po kterou bude zařízení schopno pracovat v tomto režimu. Střihu výstupního signálu nastavíme např. na poměr 1:5, kdy logická jednička bude trvat přibližně 30 ms. Velikosti odporů jsou stanoveny s ohledem na přechodový odstavec na $R = 100 \text{ k}\Omega$. Hodnoty kondenzátorů dopočítáme s využitím (4.5).

$$t_1 = \ln(2)C_{C10}R_{R15}$$

$$0,03 = \ln(2)C_{C10} \cdot 10^5$$

$$C_{C10} = \frac{0,03 \cdot 10^{-5}}{\ln(2)} \doteq 0,43 \mu\text{F}$$

Nejbližší dostupnou hodnotou je $C_{C10} = 470 \text{ nF}$.

$$t_2 = 5 \cdot t_1 \rightarrow C_{C11} = 5 \cdot C_{C10} \rightarrow C_{C11} = 2,150 \mu\text{F}$$

Nejbližší dostupnou hodnotou je $C_{C11} = 2,2 \mu\text{F}$.

Q2, Q3 - Levné NPN tranzistory. Nejsou vyžadovány žádné specifické vlastnosti. Zvoleny tranzistory BC817-25.

LED driver

Při návrhu velikosti odporů v děličích nastavujících proudy zdroje, hranici přepětí apod. je snahou, aby proudový odběr byl co nejmenší, ale zároveň dělič nesmí být ztlačně ovlivněn impedancí vstupů IO.

D1 – Přes tuto diodu teče veškerý proud z cívky do zátěže. Proto je potřeba minimalizovat ztráty, které na D1 vzniknou. Toho dosáhneme výběrem diody s minimálním napětím v propustném směru nebo rychlostí zotavení. Použijeme SK54 stejně jako u nabíjecí části.

Q1 – Stejně jako u měniče v nabíjecí části, i zde musí mít tranzistor co nejmenší R_{DS-ON} a kapacitu hradla. Použit bude stejný tranzistor AO3404A.

L1 – Požadavky na cívku jsou minimální parazitní odpor (ten roste s indukčností, pokud se nemění způsob provedení cívky), dostatečně velký maximální možný proud, velká indukčnost kvůli zvlnění proudu. Stejná cívka jako u nabíječe (22 μH) může být použita i zde.

R1 – Jeho velikost udává frekvenci vnitřního oscilátoru a základní spínací frekvenci. Je zvolen $R_{R1} = 91 \text{ k}\Omega$ pro nastavení frekvence zhruba 450 kHz. Nižší frekvence zpravidla vedou k vyšší účinnosti, neboť spínací ztráty jsou menší. Na druhou stranu, pro nižší frekvence je potřeba větších součástek s horšími parazitními vlastnostmi, které také vedou ke snížení účinnosti. Proto je třeba najít vhodný kompromis.

Kondenzátory – Hodnoty blokovacích a filtračních kondenzátorů příslušejících IO jsou voleny na doporučení výrobce IO. Velikost výstupního kondenzátoru C9 byla určena podle následující úvahy.

Aby C9 dokázal pokrýt spotřebu HBLED během jedné periody (s nastavenou frekvencí $f = 450 \text{ kHz}$) při maximálním jasu ($I_{\text{HBLED}} = 333 \text{ mA}$), je potřeba náboje

$$Q = I \cdot t = \frac{I}{f} = 0,74 \text{ }\mu\text{C} \quad (4.6)$$

V situaci nabitého kondenzátoru na 18 V ($\cong U_{\text{fHBLED}}$) vychází

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{0,74 \cdot 10^{-6}}{18} \doteq 41 \text{ nF} \quad (4.7)$$

Nejbližší vyšší dostupnou hodnotou je $C_{C9} = 47 \text{ nF}$.

R2, R3 – Tímto děličem se nastavuje limitní proud tranzistorem. Ten je dosáhnout pokud napětí na pinu IS právě dosáhne nastaveného napětí na pinu ILIM. Maximální proud cívkou je 1,1 A, proto ve výpočtu bude počítáno s maximem 1 A. Pro snímání může být využito dalšího snímacího odporu, zapojeného v sérii s tranzistorem, což vede k přesnějšímu nastavení limitu, ale větším celkovým ztrátám. Kvůli minimalizaci ztrát využijeme odporu kanálu tranzistoru v sepnutém stavu $R_{\text{DS-ON}}$, který podle katalogového listu činí $R_{\text{DS-ON}} = 35 \text{ m}\Omega$. S využitím Ohmova zákona (4.2) vychází potřeba nastavit napětí $U_{\text{ILIM}} = 35 \text{ mV}$.

S vědomím, že $V_{\text{VREF}} = 2,45 \text{ V}$, použitím (4.4) a chvilce výpočtů vychází jako vhodná kombinace dvojice odporů $R_{R2} = 820 \text{ }\Omega$ a $R_{R3} = 56 \text{ k}\Omega$.

R4, R5 – Odpory sloužící k nastavení úrovně přepětí. Hranicí je 1,24 V na pinu OVP. Hranice výstupního napětí, kdy dojde k zablokování funkce driveru, musí být vyšší než U_f svítivé diody a zároveň nesmí dojít k překročení maximálního povoleného napětí C9 a Q1, aby nedošlo k průrazu. C9 je určen na 50 V, N-FET na 30 V, na LED by nemělo napětí dosáhnout 21 V. Budeme tedy počítat s tím, že k blokadě dojde při 23 V. Zde tolik nezáleží na hysterezi, proto ji nyní zanedbáme. Pro zvolenou velikost $R_{R4} = 10 \text{ k}\Omega$ vychází z (4.4) $R_{R5} \doteq 175 \text{ k}\Omega \doteq 180 \text{ k}\Omega$. Hystereze díky tomu činí 3,6 V a k odblokování dojde při napětí $U_{\text{ON}} \doteq 19,96 \text{ V}$.

R6, R7, R8 – Pomocí těchto odporů je nastavena úroveň vybití baterií, při které se zablokuje měnič, aby se baterie nevybíjely do takové míry, že by docházelo k jejich poškození. Baterie

je možno bezpečně vybíjet na úroveň 1 V / článek u NiCd a 3 V / článek u lithiových. V obou případech tomu odpovídá celkové napětí baterie 6 V. Vzhledem k tomu, že pokud měnič běží v normálním pracovním režimu, z pinu nDIM je nucen proudovým zdrojem proud 20 μ A zajišťující hysterzezi, je třeba s tímto proudem počítat při výpočtu děliče. Hranicí pro vypnutí je 1,24 V na nDIM. Zvolíme hodnoty $R_{R6} = 5,6 \text{ k}\Omega$ a $R_{R7} = 1,3 \text{ k}\Omega$ a dopočítáme velikost R8.

Proudový zdroj vytváří na R6 úbytek $U_{R6} = 5,6 \cdot 10^3 \cdot 20 \cdot 10^{-6} = 112 \text{ mV}$. Na R7 tím pádem zbývá $1,24 - 0,112 = 1,128 \text{ V}$. K vytvoření tohoto úbytku na R7 je potřeba procházející proud $I \doteq 0,87 \text{ mA}$. Stejný proud bez 20 μ A musí procházet i odporem R8.

$$R_{R8} = \frac{6 - 1,128}{(0,87 - 0,02) \cdot 10^{-3}} \doteq 5,75 \text{ k}\Omega$$

Ve výrobku bude osazen odpor 5,6 k Ω , což umožní baterii vybit nepatrně více.

R9, R10, R11, R13 – Napětí na snímacím rezistoru R13 je regulováno na úroveň pinu IADJ dělenou deseti. Čím větší napětí na R13 bude nastaveno, tím větší přesnost regulace proudu získáme, avšak za cenu větších ztrát. Kompromisem doporučeným v katalogovém listu je regulace maxima na hodnotu 100 mV – 250 mV. Vzhledem k malé dostupnosti nízkých hodnot bude použito dvou paralelně zapojených 1 Ω odporů, které vytvoří $R_{R13} = 0,5 \Omega$. Pro maximální proud 350 mA potom vychází potřeba regulace na 175 mV.

Děličem složeným z R9, R10 a trimru R11 musí jít na pin IADJ nastavit napětí v rozmezí od pár desítek mV do 1,75 V. Minimální úroveň je vhodná, aby bylo na první pohled poznat, že je zařízení zapnuté, i při staženém trimru a také proto, že při velmi nízkých proudech nemusí měnič správně fungovat a může se objevit viditelné blikání. Hodnota R11 byla zvolena jako 50 k Ω . Odpor pro nastavení spodní hranice na chvíli zanedbáme a z (4.4)

$$R_{R9} = \frac{U_{R9}}{U_{R11}} \cdot R_{R11} = \frac{U_{VREF} - U_{R11}}{U_{R11}} \cdot R_{R11} = \frac{2,45 - 1,75}{1,75} \cdot 50 \cdot 10^3 \doteq 20 \text{ k}\Omega$$

Nyní uvážíme odpor pro nastavení minimální hranice proudu, a proto zvolíme nejbližší vyšší dostupnou hodnotu $R_{R9} = 22 \text{ k}\Omega$. Z (4.4) a (4.2) lze pro požadovaný minimální proud vypočítat R_{R10} . V této práci bude použito $R_{R10} = 1,3 \text{ k}\Omega$, čemuž odpovídá minimální proud cca 10 mA.

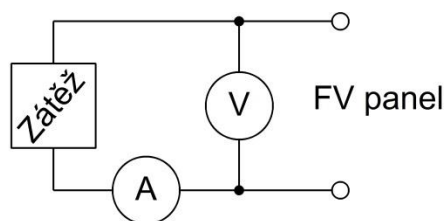
R12 – Na doporučení v katalogovém listu pro správnou filtraci $R_{R12} = 47 \Omega$.

5. Dosažené výsledky

Pro měření závislá na osvětlení byl k jeho zjištění použit luxmetr s označením ELVOS LM-1010. Použité baterie jsou poskládané z jednotlivých článků a mají udávanou kapacitu 2 600 mA · h pro lithiovou baterii a 2 000 mA · h pro baterii NiCd.

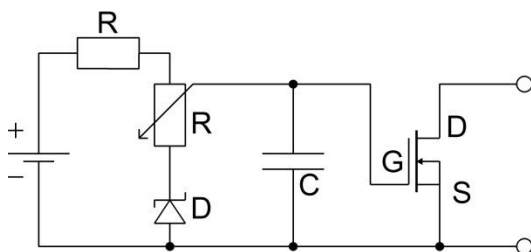
5.1. Charakteristika fotovoltaického panelu

Ke zjištění skutečného MPP FV panelu a skutečného výkonu při daném osvětlení bylo využito měření podle schéma na obr. 5.1.



Obr. 5.1: Schéma zapojení pro měření FP

Jako zátěž v tomto zapojení byla použita jednoduchá proměnná zátěž (obr. 5.2), která byla zkonstruována pro účely stejného měření v BP.



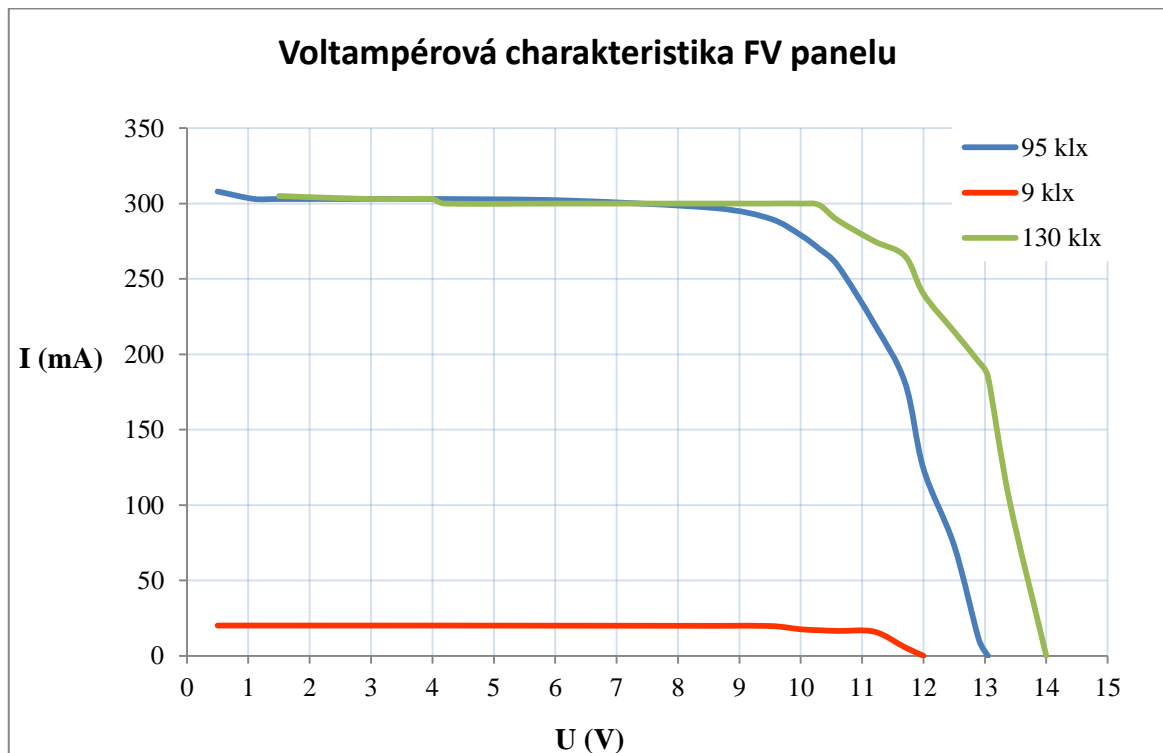
Obr. 5.2: Proměnná zátěž

Výkonový tranzistor řízený polem funguje jako regulovatelný odpor říditelný pomocí napětí přiváděného na gate tranzistoru. Zenerova dioda v zapojení slouží jako omezení nastavitelného rozsahu tohoto napětí. Její napětí by mělo ležet pod úrovní prahového napětí N-MOS tranzistoru. Odpor R naopak slouží jako omezení horní hranice, kdy už nedochází ke snižování odporu kanálu (otevírání tranzistoru). Obě omezení rozsahu jsou zavedena z důvodu menší citlivosti na otočení potenciometrem. Jako zdroj napětí byla v zapojení použita standardní 9V baterie.

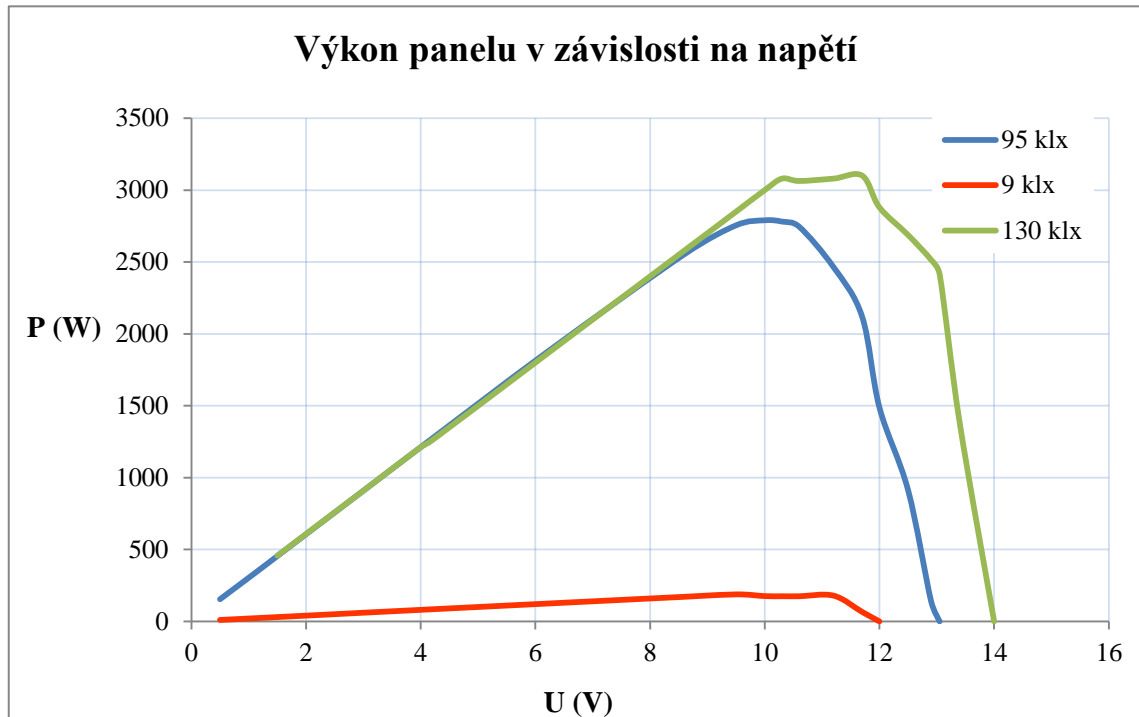
Z obr. 5.3 je vidět, že se FP chová až do určitého napětí jako téměř ideální zdroj proudu, pokud je osvětlení panelu konstantní. To se v průběhu měření za jasného dne měnilo pouze zanedbatelně (pro charakteristiku 95 klx). Je vidět, že i pro velmi nízké intenzity osvětlení (9 klx, což odpovídá měření ve stínu) má křivka podobný charakter, ačkoliv toto

měření je už velmi nepřesné. Stejně tak pro charakteristiku 130 klx měřenou v jiný den lze z grafu pozorovat vlastnosti typické pro FP. Nicméně tato charakteristika je do jisté míry zkreslená častou proměnlivostí osvětlení během měření.

Obr. 5.4 ukazuje závislost výstupního výkonu z FP pro různé hodnoty výstupního napětí. Z tohoto grafu je dobře vidět, jak se mění aktuální výkon se změnou napětí a důvod, proč bylo v návrhu třeba využít MPPT. Pro změřené charakteristiky se MPP pohybuje v okolí 10 V. Pro větší teploty panelu se MPP nepatrně posouvá směrem k nižším napětím, s nižší teplotou naopak. Při návrhu byly uváženy změřené charakteristiky a s ohledem na ně byl bod maximálního výkonu nastaven na úroveň napětí zdroje 10,43 V. Za povšimnutí stojí, že ačkoli byl panel měřen za jasného dne, FP dosáhl udávaného maximálního výkonu pouze ze 3/4.



Obr. 5.3: Zatěžovací charakteristika FP



Obr. 5.4: Výkonová charakteristika FP

5.2. Parametry nabíjecího obvodu

Ke změření vlastností a parametrů nabíjecího obvodu byl využit laboratorní zdroj kvůli možnosti řízení velikosti napájecího napětí.

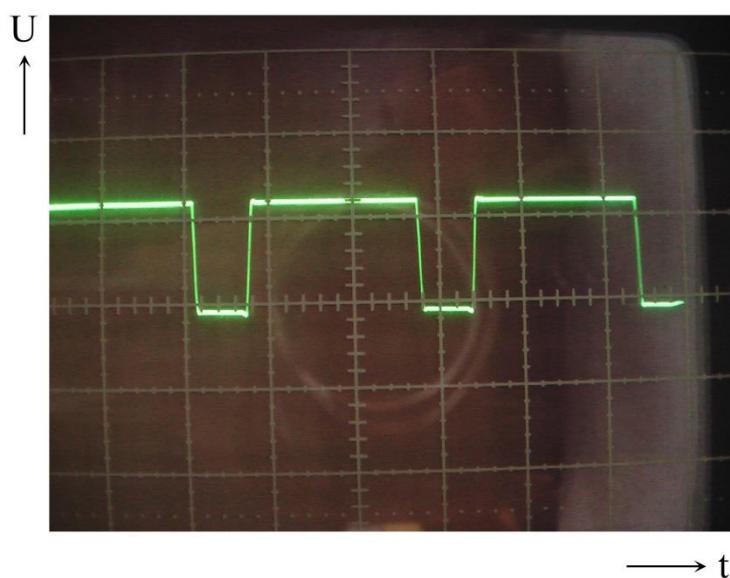
Tab. 5.1 ukazuje dosaženou účinnost nabíjecího obvodu při různých napájecích napětích. Účinnost nabíječky se pohybuje okolo 90 %, což je velmi dobrý výsledek, nicméně pokud klesne dostupná energie zdroje, simulovaná omezením proudu laboratorního zdroje, účinnost klesá až k 70 %. Nicméně i taková účinnost je dobrým výsledkem, pokud uvážíme, že obvod zajišťuje sledování maximálního výkonu, indikuje nabíjení pomocí LED a má spotřebu necelých 0,25 W. Z tabulky je také vidět skutečná hodnota napětí, na kterou je regulován zdroj pomocí MPPT algoritmu, konkrétně 10,42 V.

Tab. 5.1: Účinnost nabíjecího obvodu

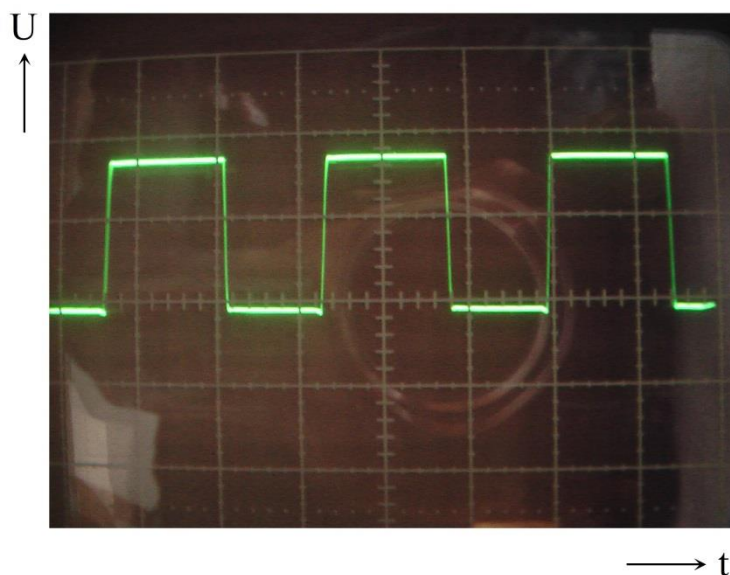
	Napětí U (V)	Proud I (mA)	Výkon P (W)	Příkon P _o (W)	Účinnost η (%)
Baterie	7,48	727	5,44	5,94	91,57
Zdroj	12,12	490			
Baterie	7,46	727	5,42	6,03	89,97
Zdroj	13,7	440			
Baterie	7,43	718	5,33	5,89	90,64
Zdroj	10,51	560			
Baterie	7,1	77	0,55	0,78	69,96
Zdroj	10,42	75			

Průběhy napětí v režimu nabíjení

Všechny uvedené průběhy zachycené z osciloskopu mají měřítko osy x 200 ns/dílek a měřítko osy y 5 V/dílek.



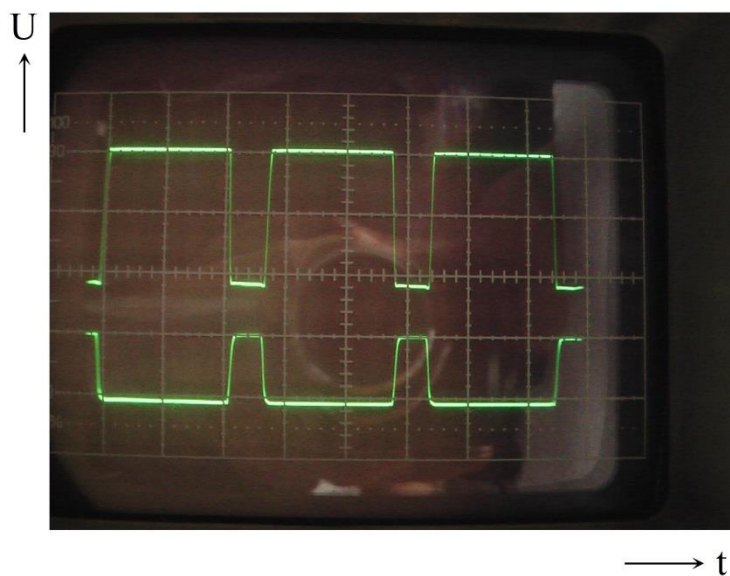
Obr. 5.5: Průběh napětí na cínce nabíječky pro napájení 11 V



Obr. 5.6: Průběh napětí na cívce nabíječky pro napájení 15 V

Z obr. 5.5 a obr. 5.6 je vidět změna střídy spínání pro různá napájecí napětí. Pro větší napětí zdroje se střída zmenšuje a snižuje se proudový odběr ze zdroje. Pokud je obvod napájen zdrojem s omezeným výstupním proudem, střída se také zmenšuje, aby bylo udrženo napájecí napětí 10,4 V.

Na obr. 5.7 jsou zachyceny průběhy napětí na gatech tranzistorů. Horní průběh je pro horní tranzistor ve schématu. Je názorně vidět, že tranzistory se otevírají v protifázi, přičemž je zajištěna nepatrná chvíle mezi sepnutím jednotlivých tranzistorů tak, aby nemohli být sepnuty oba zároveň a nedošlo ke zkratu napájení. Na hradle horního tranzistoru je napětí převyšující napájecí napětí. To je zajištěno nábojovou pumpou.



Obr. 5.7: Průběhy napětí na hradlech tranzistorů nabíječky pro napájení 11 V

Ověřené dosažené výsledky odpovídají předpokladům. Je využito moderních specializovaných integrovaných obvodů a SMD součástek, díky kterým je možno dosáhnout lepších parametrů na menším prostoru za nižší cenu. Tyto výhody jsou vykoupeny těžší manuální manipulací při výrobě, ale hlavně náchylností na vlhkost apod., kdy může snadno dojít ke zkratům na DPS.

Stejně funkční, z pohledu uživatele, zařízení by mohlo být vyrobeno např. s použitím mikrokontroléru se specifickým obslužným programem. Takové řešení by bylo vhodné zejména pro automatizaci některých funkcí a snadnou úpravu řídicího programu a tím i vlastností výrobku. Nicméně takové řešení by bylo pravděpodobně náročnější a nákladnější při menších výrobních počtech a případná porucha mikrokontroléru by byla neopravitelná bez dostupnosti obslužného programu.

Vlastnosti a funkce navrženého proudového zdroje pro LED se bohužel nepodařilo ověřit. Pravděpodobnou příčinou je použití vadné součástky, konkrétně IO. Práce na této části budou pokračovat a naměřené výsledky by měly být dodány do práce ve formě přílohy.

6. Ekonomická rozvaha

V této kapitole bude ukázáno, jak by v praxi mohly vypadat úvahy nad prodejností a rentabilitou navrženého zařízení při uvádění na trh. Tyto úvahy lze chápat jako principiální ukázkou a nelze počítat s naprostou přesností odpovídající realitě. Nicméně orientačně by se konkrétní čísla měla v reálné rovině pohybovat.

Pro začátek řekněme, že jsme investovali 5 000,- do průzkumu trhu, který ukázal, že ačkoli LED svítlen je na trhu velké množství, v podstatě žádné nekombinují funkci solárního nabíjení a světelného výkonu, se kterým bylo v této práci počítáno. Prodatelné množství by s patřičnou reklamou mělo dosahovat počtu 250 ks ročně po dobu alespoň 7 let, pokud cena nepřesáhne 2 000,-.

Konečný výrobek je možno prodávat na trhu jednak včetně FP, bez něj, tak i se síťovým 12V adaptérem, který by se dal také vyrobit, nebo externě koupit za cenu 119 Kč, což by bylo pravděpodobně ekonomicky výhodnější. Prodejní cena 2 000 je průměrem cen jednotlivých verzí.

Cena prototypu

Návrh a testování vyrobeného prototypu zabralo 163 hodin čistého času. To při ceně práce 325,-/h činí celkem 52 975 Kč. Cena plošného spoje (DPS) pro prototyp v navrženém rozměru dosahuje 500,-. Cena výkonových prvků, FP, baterie a HBLEED, je největší položkou mezi součástkami a dohromady činí 1 016 Kč. Ostatní součástky lze pořídit za 285 Kč. Cenu za osazení součástek na DPS můžeme spočítat jako 5 hodin násobených cenou ručního osazování 150,-/h a dostaneme 750 Kč. Celkově se po sečtení přecházejícího cena prototypu vyšplhá na 55 526 Kč.

Hromadná výroba

Zpravidla platí úměra, čím větší počet kusů se vyrábí, tím levnější, v přepočtu na jeden kus, výroba je. Zároveň se fixní náklady jako cena prototypu rozpočítají na více dílů a konečná cena jednoho výrobku je menší, což může opět zvýšit prodejnost.

Při hromadné výrobě je možné domluvit lepší ceny na dodávané komponenty a součástky. Pro množství zjištěné průzkumem trhu se tak cena za výrobu a strojové osazení DPS (cena včetně součástek) dostane na Kč 266/ks. Oproti prototypu je ovšem třeba zajistit konstrukční „krabičku“, dokumentaci a balení výrobku. Na to by měla postačit částka Kč 110/ks.

Práce spojená s kompletací zařízení může být svěřena brigádně pracovníkovi za mzdu 100 Kč na hodinu, kdy jedna hodina by měla stačit na kompletaci jednoho výrobku. Náklady na jedno balení při hromadné výrobě vycházejí:

- Navržený zdroj (včetně HBLED, baterií) + FP + síť. adaptér – $1092 + 400 + 119 = 1611,-$
- Navržený zdroj (včetně HBLED, baterií) + síťový adaptér – $1092 + 119 = 1211,-$
- Navržený zdroj (včetně HBLED, baterií) + FP – $1092 + 400 = 1492,-$

Uvedení na trh

Aby bylo možné prodávat jakékoli elektronické i další zařízení, jsou potřeba pro různé části světa různé atestace, certifikáty a prohlášení o bezpečnosti a funkčnosti zařízení. Na získání těchto osvědčení v této rozvaze vyhradíme 40 000 Kč. Další náklady tvoří reklama, na kterou využijeme 20 000,-. Tyto a ostatní fixní náklady se rozpočítají na předpokládaný počet prodaných kusů.

Rozpočítáním fixních nákladů 115 526,- mezi 1 750 kusů, které se předpokládá prodat během sedmi let, a přičtením ceny z hromadné výroby vychází celkové náklady na:

- | | |
|--|--------|
| • Navržený zdroj (včetně HBLED, baterií) + FP + síťový adaptér | 1677,- |
| • Navržený zdroj (včetně HBLED, baterií) + síťový adaptér | 1277,- |
| • Navržený zdroj (včetně HBLED, baterií) + FP | 1558,- |

Pokud uvážíme reálné prostředí a další nečekané náklady, které se vždy objeví, stanovíme průměrné náklady na jeden kus hotového výrobku na 1 650 Kč. Průzkum trhu uvedl jako možnou prodejní cenu částku 2 000,-, z toho plyne zisk 350,-/ks. Při uvažování rovnoměrně rozložených prodejů v časovém období vychází návratnost investice v řádu 14 měsíců a celkový zisk v přepočtu na jeden měsíc odpovídá přibližně 7 300 Kč.

Ve skutečnosti dochází k inflaci, která znehodnocuje peníze a tím i zisk, a případně dalším faktorům, se kterými zde nebylo počítáno. Ve výsledku je třeba zvážit, jestli se tato investice a riziko vyplatí a je úměrné předpokládanému zisku. 7 300,- měsíčně po dobu 7 let je velmi dobrý výsledek, pokud uvážíme, že návrh a výroba prototypu netrvala příliš dlouho, nicméně nikdy není zaručeno, že průzkum trhu ukázal čísla, na něž se dá stoprocentně spolehnout.

Tab. 6.1 shrnuje popsané náklady a konečný zisk.

Tab. 6.1: Přehledová tabulka ekonomické rozvahy

	Prototyp – částky v Kč		Hromadná výroba – částky v Kč/ks	
Součástky	285		146	
Cena práce	750		100	
Souč. (FP, baterie, LED)	1 016		1 016	
	DPS	500	DPS + osazení	120
	Vývoj	52 975	Kompletační materiál	110
Atestace a certifikáty	40 000		cca 23/ks	
Reklama	20 000		cca 11/ks	
	Fixní náklady	115 526	Variabilní náklady	1 492
Zisk – částky v Kč				
Prodejné množství			250 ks/rok po dobu 7 let	
Minimální prodejní rentabilní cena			1 650	
Maximální prodejní cena daná trhem			2 000	
Měsíční zisk			7 300	

7. Závěr

Cílem této práce bylo najít vhodné řešení nabíjení akumulátorů využívající sluneční záření dopadající na Zemi a následně energii uloženou v bateriích využít pro napájení výkonné LED diody. Primárními kritérii při návrhu byla velikost fotovoltaických panelů zajišťujících přeměnu energie světelné na elektrickou, výstupní světelný výkon LED diody a především celková účinnost systému. Jako optimální kompromis mezi požadovanými výsledky byl vybrán zdroj o maximálním výkonu 4 W a LED o maximálním výkonu 6,6 W.

Samotný návrh byl rozdělen do dvou víceméně samostatných částí. Nabíjecí část je navržena tak, že zajišťuje maximální využití dostupného výkonu zdroje pomocí techniky MPPT a zároveň zaručuje bezpečné nabíjení baterií, aby nedocházelo k jejich poškození a snižování jejich životnosti. Nabíječka umožňuje nabíjet jak články na niklové bázi, tak články lithiové. Dosahuje účinnosti zhruba 70 % při nízkém výkonu zdroje, který odpovídá osvětlení zhruba 30 klx. Při vyšších výkonech zdroje ovšem roste i účinnost a přesahuje hladinu 90 %.

Část soustředící se na řízení napájení LED diody využívá nastavitelného proudového zdroje. Lze plynule řídit jas diody, díky čemuž je možné snížit výkonovou náročnost systému v případě, že je dostačující nižší osvětlení. Další podstatnou funkcí zapojení je možnost zapnutí výstražného blikání, které umožňuje, oproti normálnímu režimu svícení, hluboké vybití baterií.

Práce obsahuje příkladovou ekonomickou analýzu navrženého zařízení, která je zaměřená na přípravu uvedení produktu na trh. Jedná se ovšem pouze o orientační kalkulaci bez reálných podkladů, a může proto být částečně vzdálená od skutečnosti.

Mezi možnosti vylepšení zapojení, které s sebou nenesou velké náklady nebo jiné problémy, patří například možnost nabíjení baterie jiného napětí. Nicméně baterie o 7,2 V byla zvolena s ohledem na dostatečnou kapacitu pro napájení LED. Bylo by možné tedy použít větší baterii, ale ta by se na druhou stranu mohla z použitého panelu nabíjet i déle než jeden den. K návrhu by se dalo přistupovat také odlišným způsobem a k naplnění funkce zapojení by šlo využít mikrokontroléru. Toto řešení by bylo složitější, pravděpodobně nákladnější, ale zařízení by mohlo mít více funkcí. Například by se dala naprogramovat funkce blikání SOS, nebo automatické detekce velikosti baterie apod. Dalším vylepšením, které by zvýšilo účinnost stávajícího zapojení, je úprava DPS nebo použití dražších součástek, ale s lepšími parametry.

Seznam použité literatury

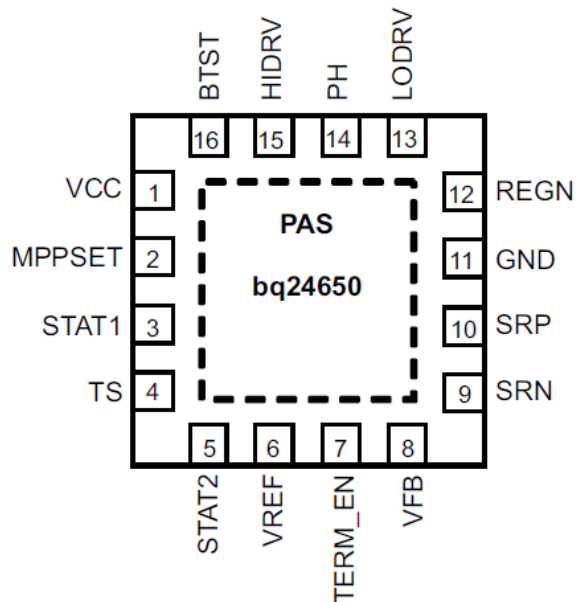
- [1] Datasheet BXRA-56C0700-A-00, dostupný z <http://cz.farnell.com/bridgelux/bxra-56c0700-a-00/es-star-700lm-cool-wht-array-5600k/dp/2070602>
- [2] Korbek, J.: *Fotovoltaická nabíječka*, Bakalářská práce, ČVUT, Praha, 2012
- [3] <http://www.protostack.com/blog/2011/06/atmega168a-pulse-width-modulation-pwm/> dne 28. 12. 2013
- [4] <http://www.learnabout-electronics.org/PSU/psu32.php> dne 3. 1. 2014
- [5] <http://www.ti.com/lit/an/slva446/slva446.pdf> dne 15. 12. 2013
- [6] Datasheet BQ24650, dostupný z <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq24650.pdf>
- [7] Datasheet TPS92690, dostupný z <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps92690.pdf>
- [8] <http://en.wikipedia.org/wiki/Multivibrator> dne 25. 4. 2014

Seznam příloh

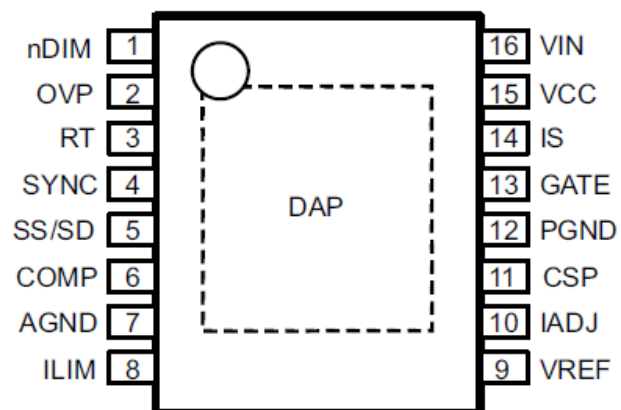
A.1: Rozložení pinů v pouzdře – BQ24650 [6].....	I
A.2: Rozložení pinů v pouzdře – TPS92690 [7].....	I
A.3: Blokové schéma TPS92690 [7].....	II
B.1: DPS – spoje - vrstva bottom.....	III
B.2: DPS – spoje - vrstva top	III
B.3: DPS – Osazovací plán (strana top)	IV
B.4: Tabulka součástek k osazovacímu plánu (příloha B.3).....	IV

A. Textová část

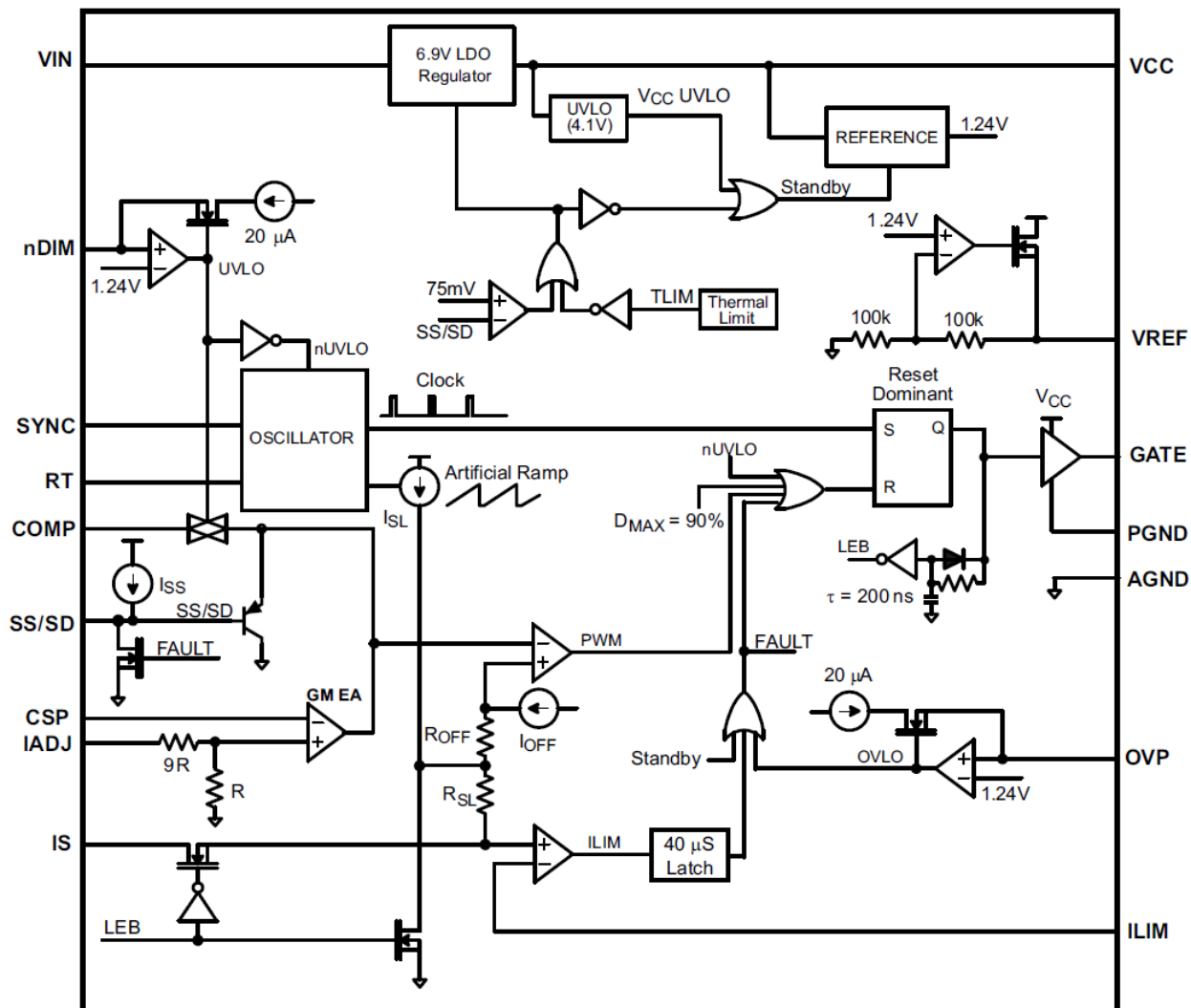
A.1: Rozložení pinů v pouzdře – BQ24650 [6]



A.2: Rozložení pinů v pouzdře – TPS92690 [7]

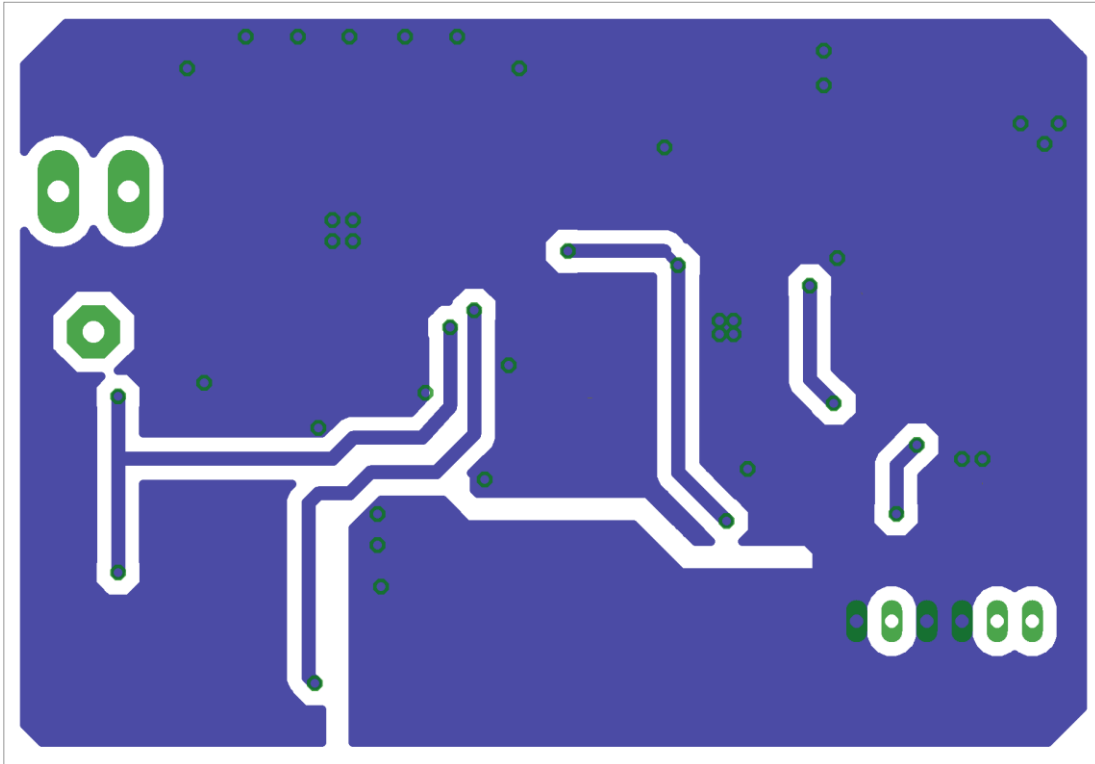


A.3: Blokové schéma TPS92690 [7]

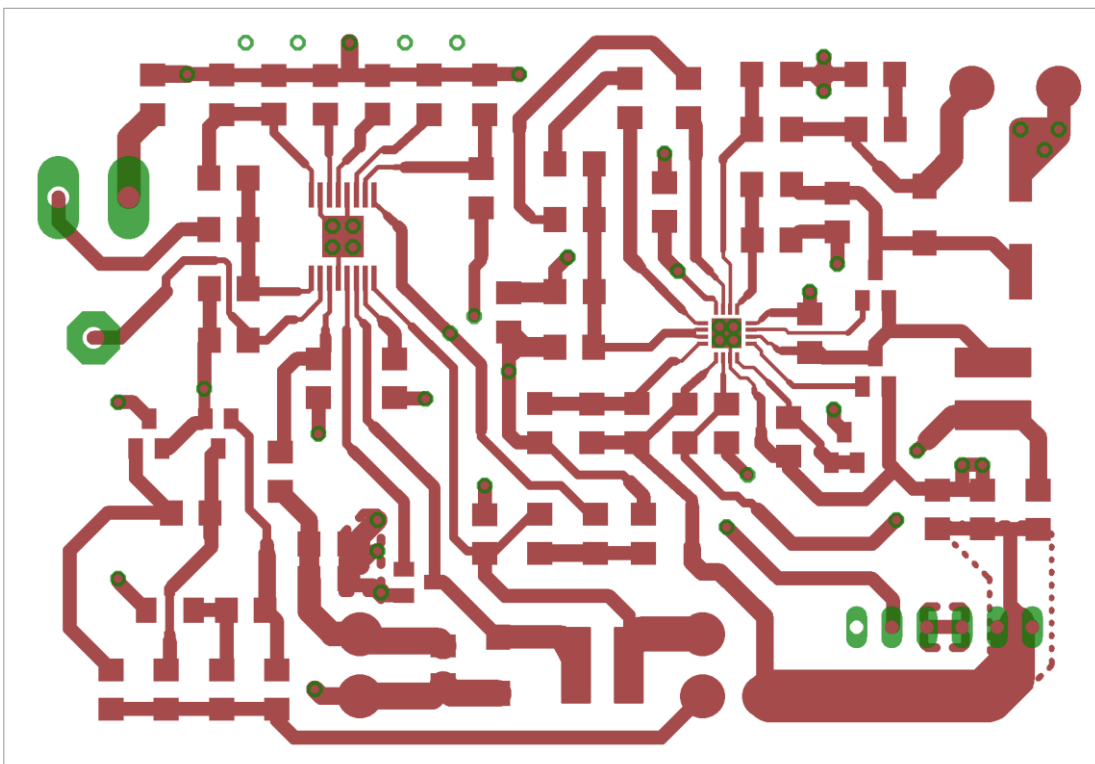


B. Praktická část

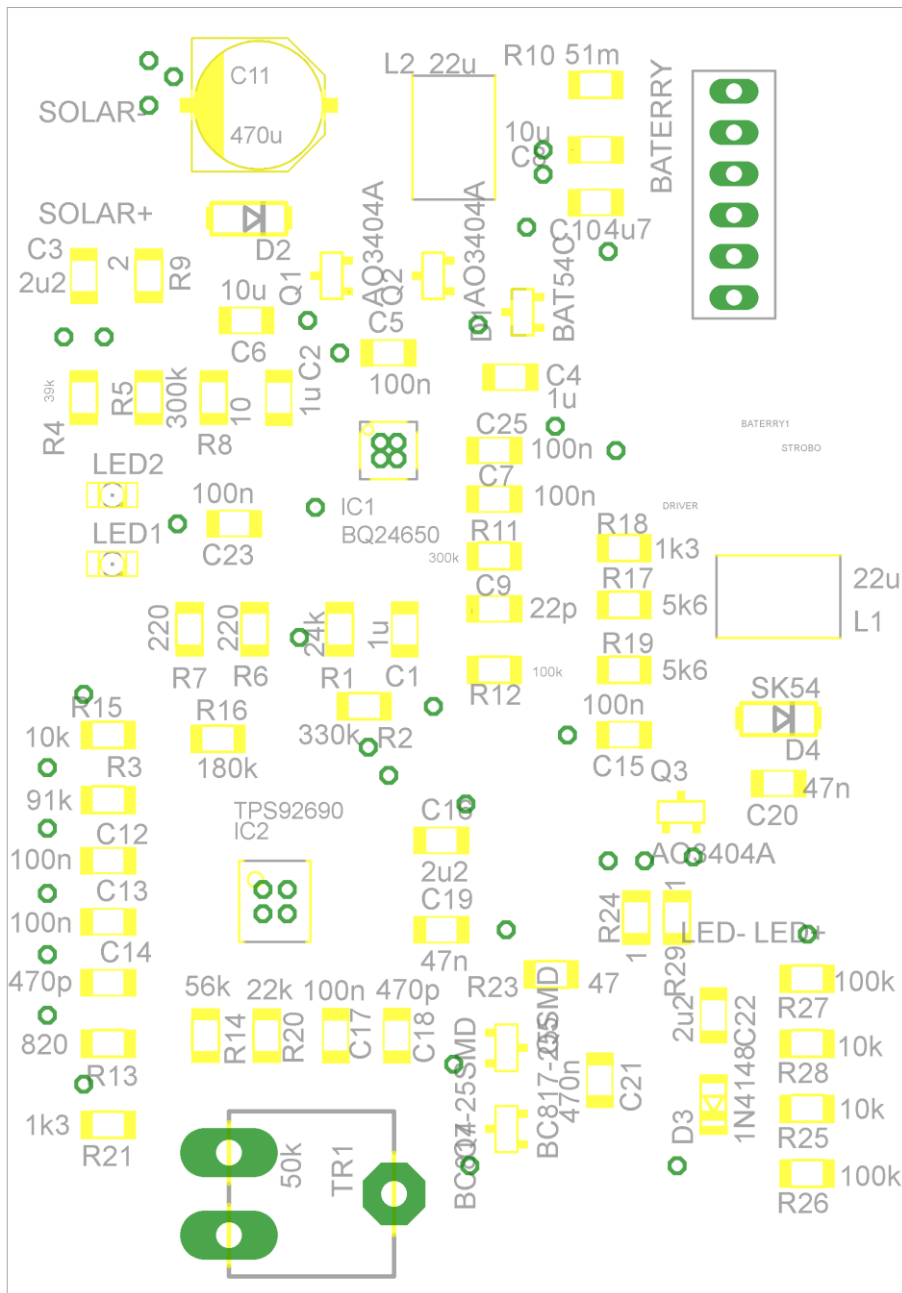
B.1: DPS – spoje - vrstva bottom



B.2: DPS – spoje - vrstva top



B.3: DPS – Osazovací plán (strana top)



B.4: Tabulka součástek k osazovacímu plánu (příloha B.3)

Označení součástky	Popis	Ks
Q1, Q2, Q3	AO3404A - MOS-N-FET 30 V / 5,8 A / 1,40 W, $R_{DS-ON} = 28 \text{ m}\Omega$, SOT23	3
Q4, Q5	BC817-25 – NPN 45 V / 0,5 A / 0,31 W, 200 MHz, SOT23	2
D1	BAT54C - Schottky 30 V / 0,20 A, dual, společná katoda, SOT23	1

D2, D4	SK54 - Schottky 50 V / 5,0 A, DO214AA	2
D3	1N4148 - 100 V / 0,2 A, 8 ns, SOD80	1
LED1	Zelená, $U_f = 2,2$ V, čirá, SMD 1206	1
LED2	Žlutá, $U_f = 2$ V, SMD 1206	1
TR1	Trimr uhlíkový ležatý 50 k Ω logaritmický, 20 %	1
R1	24 k Ω , 5%, 0,25 W, TK200, E24, 1206	1
R2	330 k Ω , 5%, 0,25 W, TK200, E24, 1206	1
R3	91 k Ω , 5%, 0,25 W, TK200, E24, 1206	1
R4	39 k Ω , 5%, 0,25 W, TK200, E24, 1206	1
R5, R11	300 k Ω , 5%, 0,25 W, TK200, E24, 1206	2
R6, R7	220 Ω , 5%, 0,25 W, TK200, E24, 1206	2
R8	10 Ω , 5%, 0,25 W, TK200, 1206	1
R9	2 Ω , 5%, 0,25 W, TK200, E24, 1206	1
R10	51 m Ω , 5%, 0,25 W, TK200, 1206	1
R12, R26, R27	100 k Ω , 5%, 0,25 W, TK200, E24, 1206	3
R13	820 Ω , 5%, 0,25 W, TK200, E24, 1206	1
R14	56 k Ω , 5%, 0,25 W, TK200, E24, 1206	1
R15, R25, R28	10 k Ω , 5%, 0,25 W, TK200, E24, 1206	3
R16	180 k Ω , 5%, 0,25 W, TK200, E24, 1206	1
R17, R19	5,6 k Ω , 5%, 0,25 W, TK200, E24, 1206	2
R18, R21	1,3 k Ω , 5%, 0,25 W, TK200, E24, 1206	2
R20	22 k Ω , 5%, 0,25 W, TK200, E24, 1206	1
R23	47 Ω , 5%, 0,25 W, TK200, E24, 1206	1
R24, R29	1 Ω , 5%, 0,25 W, TK200, E24, 1206	2
C1, C2, C4	Keramický, 1 μ F / 25 V, hmota X7R, 10%, 1206	3
C3, C16, C22	Keramický, 2,2 μ F / 16 V, hmota X7R, 10%, 1206	3
C5, C7, C12, C13, C15, C17, C23, C25	Keramický, 100 nF / 50 V, hmota X7R, 10%, 1206	8
C6, C8	Keramický, 10 μ F / 16 V, hmota X7R, 10%, 1206	2
C9	Keramický, 22 pF / 50 V, hmota NPO, 5%, 1206	1

C10	Keramický, 4,7 μ F / 10 V, hmota X7R, 10%, 1206	1
C11	Elektrolytický, 470 μ F / 16 V, Velikost F	1
C14, C18	Keramický, 470 pF / 50 V, hmota NPO, 5%, 1206	2
C19, C20	Keramický, 47 nF / 50 V, hmota X7R, 10%, 1206	2
C21	Keramický, 470 nF / 50 V, hmota X7R, 10%, 1206	1
L1, L2	TDR54, 22 μ H, $R = 180 \text{ m}\Omega$, $I_{\text{max}} = 1,1 \text{ A}$	2
BATTERY	PSS 254/06, 6 pinový print konektor do DPS, RM 2,54 mm	1
IC1	BQ24650, kontrolér nabíjení, QFN16pin	1
IC2	TPS92690, kontrolér napájení LED, TSSOP16pin	1