



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

ZÁLOŽNÍ ZDROJ SE SOLÁRNÍM ČLÁNKEM

BACKUP POWER SUPPLY WITH SOLAR CELL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MICHAL HRUBÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MICHAL KUBÍČEK, Ph.D.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Michal Hrubý

ID: 24431

Ročník: 3

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Záložní zdroj se solárním článkem

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Proveďte rozbor dostupných fotovoltaických článků, akumulátorů a integrovaných obvodů pro realizaci záložního zdroje se solárním nabíjením. S ohledem na požadované parametry zdroje vyberte vhodnou kombinaci součástek a navrhnete koncepci a schéma zapojení zdroje.

Navržený zdroj sestavte, oživte a ověřte jeho vlastnosti. Soustřeďte se především na parametry nabíjecí části zdroje za zhoršených světelných podmínek.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] KREJČIŘÍK, A. Moderní spínané zdroje, 1. vydání. Praha: BEN - technická literatura, 1999.

[2] NOVOTNÝ, V. Napájení elektronických zařízení. Skriptum. Brno: FEI, VUT v Brně, 1999.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 31.5.2013

Vedoucí práce: Ing. Michal Kubíček, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Vzhledem k moderním trendům získávání energie z obnovitelných zdrojů se tato práce zabývá návrhem záložního zdroje napájeného solárním článkem. Rozebírá princip činnosti solárního článku, popisuje jeho technologický vývoj. Popisuje druhy běžně dostupných akumulátorů, jejich specifické vlastnosti a doporučený postup jejich nabíjení. Dále se zaměřuje na popis činnosti použitých DC-DC měničů a jejich specifik. Cílem této práce je sestavení záložního zdroje zařízení, používajícího sběrnici USB, nezávislého na distribuční elektrické síti.

KLÍČOVÁ SLOVA

Záložní zdroj, solární článek, DC-DC měnič, Li-pol, akumulátor, USB.

ABSTRACT

Due to the modern trends of energy production from renewable sources, this thesis deals with backup power powered solar cell. Analyzes the principle of operation of the solar cell, describes its technological development. Describes types of commercially available accumulators and their specific properties and the recommended charging. It then focuses on the description of the activities used DC-DC converters and their specifics. The aim of this work is to construct a backup power device that uses USB, independent of the electric distribution network.

KEYWORDS

Backup power supply, solar cell, DC-DC converter, Li-pol, accumulator, USB.

HRUBÝ, M. *Záložní zdroj se solárním článkem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2012. 46 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: ing. Michal Kubíček, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Záložní zdroj se solárním článkem jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce ing. Michalovi Kubíčkoví, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků	vi
Seznam tabulek	vii
Úvod	1
1 Fotovoltaické články	2
1.1 Trocha historie	2
1.2 Princip činnosti fotovoltaického článku	3
1.3 Generační vývoj	3
1.3.1 První generace	3
1.3.2 Druhá generace	4
1.3.3 Třetí generace	4
1.4 Sluneční podmínky v ČR	5
2 Baterie	6
2.1 Trocha historie	6
2.2 Rozdělení baterií	7
2.2.1 Palivové články	7
2.2.2 Primární články	7
2.2.3 Sekundární články	7
2.3 Akumulátory	8
2.3.1 Olověný akumulátor Pb	8
2.3.2 Nikl kadmiový akumulátor NiCd	9
2.3.3 Nikl metal hydridové akumulátory NiMH	12
2.3.4 Lithium – iontové akumulátory Li – ion	14
2.3.5 Lithium – polymerové akumulátory Li-pol	15
3 DC-DC měniče napětí	17
3.1 Rozdělení DC-DC měničů	17
3.1.1 Měniče s lineárními prvky	17
3.1.2 Spínané DC-DC měniče	18
3.2 Nejčastěji používané topologie měničů	18

3.3 Boost konvertor.....	19
3.4 Buck–boost konvertor.....	19
4 Výběr optimálních součástek a návrh zařízení	21
4.1 Výběr součástek.....	21
4.1.1 Výběr Solárního článku	21
4.1.2 Výběr akumulátoru	21
4.1.3 Výběr měničů.....	21
4.1.4 Výběr boxu.....	23
4.2 Návrh zařízení.....	24
4.2.1 Nabíjecí obvod	24
4.2.2 Obvod napájecí USB.....	25
Literatura	32
Seznam symbolů, veličin a zkratk	33
Seznam příloh	34

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Princip činnosti solárního článku převzato z [1]	3
Obr. 1.2: Mapa trvání ročního slunečního svitu v ČR převzato z [3]	5
Obr. 1.3: Roční úhrn globálního slunečního záření v ČR [W/m ²] převzato z [3]	5
Obr. 2.1: Znázornění Galvaniho pokusu se žábou převzato z [4]	6
Obr. 2.2: Vybíjecí a nabíjecí křivka Pb akumulátoru převzato z [6]	9
Obr. 2.3: Konstrukce hermetického NiCd akumulátoru válcového tvaru, převzato z [7]	10
Obr. 2.4: Nabíjení NiCd akumulátorů – Metoda “ d^2V/dt^2 ” převzato z [6]	11
Obr. 2.5: Nabíjení NiCd akumulátorů – Metoda proudového ukončení převzato z [7] .	12
Obr. 2.6: Nabíjení NiCd akumulátorů – Metoda “ T_{CO} ” převzato z [7]	14
Obr. 2.7: Nabíjení lithiových akumulátorů převzato z [7]	15
Obr. 3.1: Zvyšující měnič a) tranzistor Q1 sepnut b) tranzistor Q1 rozepnut převzato z [10]	19
Obr. 3.2: První interval, tranzistor Q ₁ rozepnut převzato z [10]	20
Obr. 3.3: Druhý interval, tranzistor Q ₁ sepnut převzato z [10]	20
Obr. 4.1: Účinnost měniče LT1308 v závislosti na odebíraném proudu převzato z [15]	23
Obr. 4.2: Univerzální box Alubos převzato z [16]	23
Obr. 4.3: Schéma zapojení nabíjecího obvodu akumulátoru [17]	24
Obr. 4.4: Závislost účinnosti na modu převzato z [18]	25
Obr. 4.5: Schéma zapojení výstupního měniče do USB	26
Obr. 4.6: Napětí na výstupu nabíjecího měniče	27
Obr. 4.7: Funkce zpětné vazby v závislosti na vstupním napětí	28
Obr. 4.8: Start měniče LTC1308 napětím mezi j	29
Obr. 6.1: Celkový pohled	38
Obr. 6.2: Pohled shora	38
Obr. 6.3: Spodní pohled	39

SEZNAM TABULEK

Tab. 3.1: Vlastnosti lineárních měničů převzato z [10]	17
Tab. 3.2: Vlastnosti spínaných měničů [10]	18
Tab. 4.1: Nabídka Buck-Boost měničů firmy Linear technology. Převzato z [12]	22

ÚVOD

V dnešní době je stále větší snaha o výzkum alternativních zdrojů elektrické energie, jako například teplo zemského nitra, nebo setrvačnost soustavy Země – Měsíc. Aktuálně se energie čerpá ve formě biomasy, geotermální energie, větrné energie, energie přílivu a odlivu, vodní energie, ale především z jaderných přeměn v nitru slunce, které způsobují sluneční záření. V české republice je elektřina z obnovitelných zdrojů podporována formou takzvaných zelených bonusů, anebo zvýhodněnými výkupními cenami.

V závislosti na moderních trendech se moje práce bude zabývat konstrukcí záložního zdroje se solárním článkem. Záložní zdroj bude obsahovat nabíjecí baterii Li-pol dva DC/DC měniče a solární panel. První měnič bude obstarávat přeměnu proměnného vstupního napětí na napětí, které bude napájet baterii, a druhý měnič je bude přizpůsobovat na standardní napětí USB konektoru. Celé zařízení bude sloužit jako zdroj elektrické energie pro nabíjení například mobilního telefonu, mp4 přehrávače, čtečky elektronických knih a podobných přenosných zařízení.

1 FOTOVOLTAICKÉ ČLÁNKY

Sluneční světlo vzniká termonukleární reakcí ve slunečním centru při teplotách okolo 15 milionů Kelvinů. Na povrchu Slunce už je teplota kolem 6 tisíc Kelvinů. Zářivý výkon celého slunce je $3,85 \cdot 10^{23}$ kW. Většina tohoto výkonu se vyzáří do prostoru a k Zemi dorazí jen asi půl miliardy. I tak je to výkon $1,744 \cdot 10^{14}$ kW na celou ozářenou polokouli. Tato skutečnost nutí k zamyšlení nad jejím využitím a stojí za to zapřemýšlet. Sluneční paprsky dávají 20 000 krát více energie než potřebujeme. Kdybychom tuto energii uměli využít, byly by všechny naše energetické problémy vyřešeny.

Systémy se solárními panely mohou být připojené k distribuční síti (tzv. grid-on). Při vyšším výkonu než je odebíraný, nebo při nedostupné dodavatelské síti systém funguje samostatně (tzv. ostrovní nebo grid-off). Jedná se zejména o odlehlé objekty, jakými jsou např. chaty, karavany, jachty, napájení dopravní signalizace a telekomunikačních zařízení, zahradní svítidla, světelné reklamy apod. Grid-off systémy se dále dělí na systémy s přímým napájením, hybridní systémy a systémy s akumulací elektrické energie. U systémů s přímým napájením připojený spotřebič funguje pouze při dosažení dostatečné intenzity slunečního záření.

Při výrobě fotovoltaických článků se dosahuje podle technologie 20 – 30 let, potom postupně klesá jejich účinnost. Samotný panel je tvořen pospojovanými články, krytými vysoce propustným tvrzeným sklem. Rozměrnější panely jsou poté zasazeny do hliníkových rámců a hermeticky uzavřeny proti povětrnostním vlivům. U minipanelů, kterými se budu zabývat v této práci chybí rámy, a hermetické uzavření je provedeno nalepením vysocepropustného plastu na samotné polovodičové články.

1.1 Trocha historie

Již v roce 1839 tehdy devatenáctiletý francouzský fyzik Alexandre Edmond Becquerel objevil fotovoltaický jev při experimentech s dvěma kovovými elektrodami a elektrolytem. O téměř 35 let později, tedy v roce 1873 bylo britským fyzikem Willoughby Smithem učiněno zjištění, že prvek selen mění svůj elektrický odpor podle intenzity jeho osvětlení.

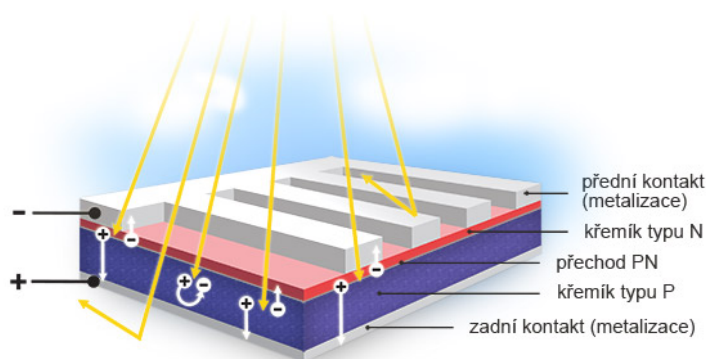
Tento jev však našel uplatnění až v roce 1883 při sestrojení prvního fotovoltaického článku americkým vědcem Charlesem Frittssem. Ten potáhl selen velmi tenkou vrstvou zlata, ovšem docílil jen jednaprocentní účinnosti. Principu, který umožňoval přeměnu světelných paprsků v elektrické napětí však nebylo přes sto let porozuměno. Fotoelektrický jev totiž objevil až ve dvacátém století Albert Einstein. Za tento objev mu poté byla udělena Nobelova cena. Konstrukce dnešních solárních článků se zrodila v Bell Laboratories sídlící ve Washington D.C. Při pokusech s dopovaným křemíkem se povedlo docílit účinnosti 6 procent. Vzhledem k tomu, že v dnešní době fotovoltaické články dosahují účinnosti kolem 20 procent, a výrobní náklady jsou podstatně nižší, je tato technologie dostupná a hojně využívána. Je to v podstatě nejrychleji rozvíjející se odvětví získávání energie.

Význam fotovoltaiky se projevil zvláště v kosmonautice, kde fotovoltaika tvoří prakticky jediný zdroj elektrické energie pro umělé družice Země. Prvou družicí s fotovoltaickými články byla americká družice Vanguard I, vypuštěná na oběžnou dráhu 17. března 1958.

1.2 Princip činnosti fotovoltaického článku

Jde v podstatě o velkoplošný polovodičový prvek s alespoň jedním polovodičovým přechodem P-N, čili o polovodičovou diodu. V klidovém stavu jsou nosiče náboje v obou polovodičích v neuspořádaném stavu. Jakmile ale na něj dopadne elektromagnetické záření v podobě světla určitého spektra, nosiče náboje se v obou typech polovodiče se polarizují a vytvoří tím rozdíl potenciálů. Zátěží (elektrospotřebičem) připojenou mezi oba kontakty potom protéká stejnosměrný elektrický proud, jenž je přímo úměrný ploše solárních článků a intenzitě dopadajícího slunečního záření. Protože výkon článků závisí na okamžitém slunečním záření, udává se jejich výkon jako tzv. špičkový, tedy při dopadajícím záření s intenzitou 1000 W/m^2 při definovaném spektru. Napětí na jednom přechodu P-N je zhruba jen $0,5 \text{ V}$, a proud je závislý na ploše přechodu, proto je nutno takovéto články spolu spojovat sériově, nebo paralelně.

Princip činnosti názorně popisuje následující obrázek.



Obr. 1.1: Princip činnosti solárního článku převzato z [1]

1.3 Generační vývoj

1.3.1 První generace

První generací se nazývají fotovoltaické články využívající jako základ křemíkové desky. Dosahují poměrně vysoké účinnosti přeměny (v sériové výrobě 16 až 19 %, speciální struktury až 24 %). Přestože výroba krystalického křemíku je poměrně drahá, ještě v dnešní době obsazují kolem 90 procent odbytu.

1.3.2 Druhá generace

U druhé generace bylo snahou zlevnit výrobu a učinit tak solární panely dostupnější. Články druhé generace se vyznačují 100 krát až 1000 krát tenčí aktivní absorbující polovodičovou vrstvou (thin-film) a jejími představiteli jsou např. články z amorfního a mikrokrytalického křemíku (případně silicon-germania, či silicon-karbidu, ale také tzv. směsné polovodiče z materiálů jako Cu, In, Ga, S, Se, označované obecně jako CIS struktury). Nicméně dosahovaná účinnost je obvykle nižší, v sériové výrobě typicky pod 10%. U tenkovrstvých článků je velikou výhodou možnost volby substrátu. Tyto články se začaly vyrábět v druhé polovině osmdesátých let.

1.3.3 Třetí generace

Zde je hlavním cílem nejen snaha o maximalizaci počtu absorbovaných fotonů a následně generovaných párů elektron - díra („proudový“ zisk), ale i maximalizace využití energie dopadajících fotonů („napětový“ zisk fotovoltaických článků).

Existuje více směrů při řešení tohoto problému. Jen pro orientaci je vypíši:

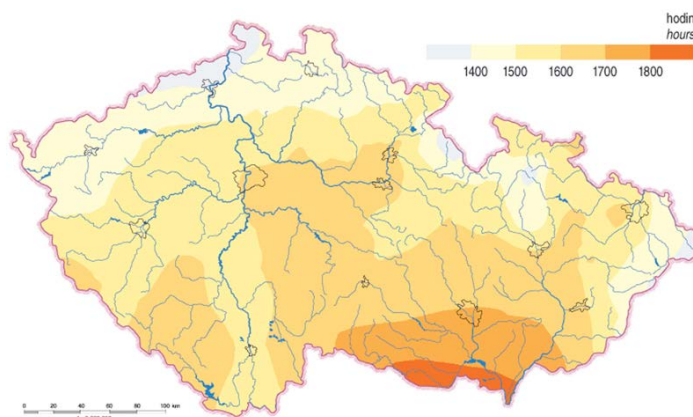
- vícevrstvé solární články (z tenkých vrstev)
- články s vícenásobnými pásy
- články, které by využívaly „horké“ nosiče náboje pro generaci více párů elektronů a děr
- termofotovoltaická přeměna, kde absorbér je současně i radiátorem vyzařujícím selektivně na jedné energii
- termofotonická přeměna, kde absorbér je nahrazen elektroluminiscencí
- články využívají kvantových jevů v kvantových tečkách nebo kvantových jamách
- prostorově strukturované články vznikající samoorganizací při růstu aktivní vrstvy
- organické články (např. na bázi objemových heteropřechodů)

Z této generace se nejvíce prosadily dvojvrstvé a trojvrstvé struktury, z nichž každá sub-struktura PIN absorbuje určitou část spektra a maximalizuje se tak energetická využitelnost fotonů. Každý polovodič totiž lépe absorbuje jiné spektrum světla.

Vše [2]

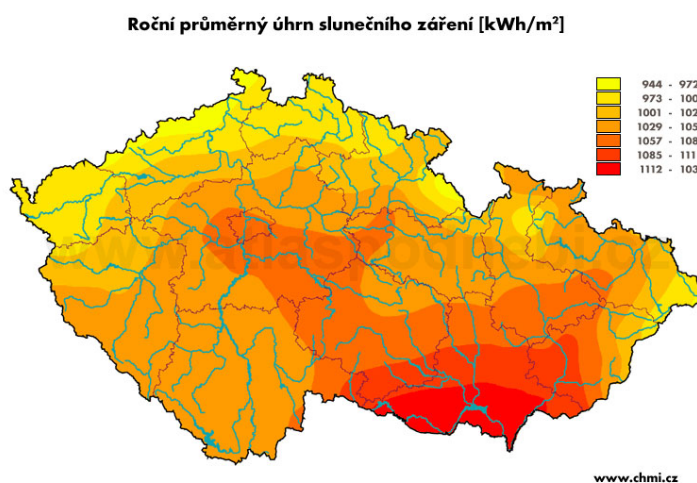
1.4 Sluneční podmínky v ČR

Důležitým faktorem dopadající sluneční energie je celková roční doba dopadajícího slunečního svitu, potažmo zeměpisná poloha. Názorně ukazuje obr. 1.2. Doba slunečního svitu se pohybuje od 8 hodin v zimě až po 16 hodin v létě.



Obr. 1.2: Mapa trvání ročního slunečního svitu v ČR převzato z [3]

Nejvíce slunečního záření lze zaregistrovat na jižní Moravě, nejméně pak na severozápadě Čech, viz Obr. 1.3.



Obr. 1.3: Roční úhrn globálního slunečního záření v ČR [W/m²] převzato z [3]

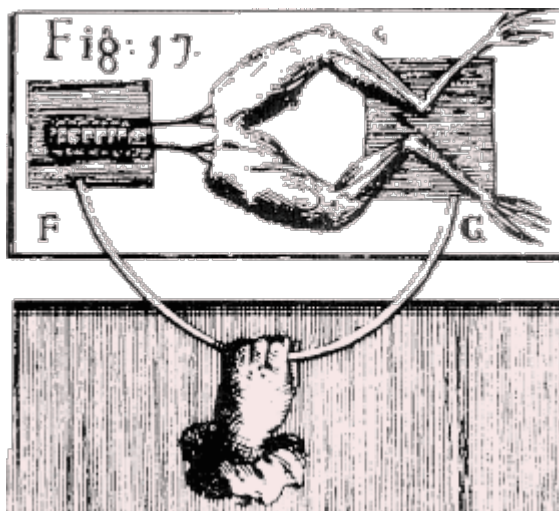
2 BATERIE

2.1 Trocha historie

Luigi Galvani (1737 - 1798) – italský přírodovědec a lékař při pitvání žab na plechu si všimnul, že při dotyku operačního skalpelu sebou žáby začaly podivně cukat. Nijak si tento jev nedovedl vysvětlit, proto letech 1780 až 1790 provedl Galvani ještě nespočet pokusů se žábami, a stále se domníval, že tento fenomén má na svědomí "živočišná" elektřina.

Na pokusy Luigi Galvaniho navázal jiný italský fyzik Alessandro Volta (1745 - 1827). Ten však zjistil, že ono cukání způsobuje dotyk dvou různých kovů oddělených vlhkou látkou. Tento objev odtajnil veřejnosti roku 1800 v Londýně.

Ovšem má se za to, že první elektrický článek prý mohl být vynalezen již o mnoho století dříve. V jednom bagdádském muzeu údajně uchovávají elektrický článek z období parthské říše (250 př. n.l. 224 n.l.). V nádobě z pálené hlíny asi 18 cm vysoké je umístěn 10 cm vysoký válec z měděného plechu. Železná tyčinka provlečená víčkem válce je ode dna i od víčka měděného válce izolována asfaltem. Někteří vědci se domnívají, že pro účel elektrolytu pravděpodobně byla použita vymačkaná šťáva z hroznů. Historikové jsou toho názoru, že tento přístroj mohl sloužit nejpravděpodobněji ke galvanickému pokovování.[4]



Obr. 2.1: Znárodnění Galvaniho pokusu se žábou převzato z [4]

2.2 Rozdělení baterií

Baterie můžeme v první řadě rozdělit na:

- 1) Palivové články
- 2) Primární články
- 3) Sekundární články

2.2.1 Palivové články

Jsou to zařízení, které přeměňují energii paliva a okysličovadla přímo na elektrickou energii, a proto mají relativně vysokou účinnost, jsou spolehlivé a konstrukčně jednoduché. Palivový článek je v podstatě elektrochemický článek skládající se ze dvou elektrod, které jsou odděleny elektrolytem nebo membránou. K anodě je přiváděno palivo a ke katodě okysličovadlo. Jsou závislé jen na dodávce paliva, nebo okysličovadla, a pokud jich mají dostatek, můžou pracovat nepřetržitě. Palivové články uvádím vzhledem k tématu mé práce jen okrajově, jinak jsou to články s vysokým potenciálem pro budoucí vývoj zdrojů energie.[6]

2.2.2 Primární články

Primární články jsou baterie, které při vybíjení přeměňují přímo chemickou energii na energii elektrickou. Tento proces je ale bohužel nevratný. Takové články po vyčerpání všech jejich potenciálních chemických procesů nejsou schopny dodávat požadovanou energii, a dále jsou nepoužitelné. Mají schopnost dodávat energii ihned po sestavení, ale jen po omezenou dobu určenou jejich kapacitou. Jejich omezení spočívá i v malém proudu, který jsou schopny dodávat. Pro účel mého projektu jsou vzhledem k jejich ireverzibilitě nepoužitelné.[5] [6]

2.2.3 Sekundární články

Neboli akumulátory jsou na rozdíl od primárních článků schopné reverzibility chemických reakcí, a to po opětovném nabíjení. Po jejich kompletaci jsou ale chemicky neaktivní a je nezbytné je před použitím nabít. Na rozdíl od primárních článků můžou dodávat mnohem větší proudy díky jejich daleko menšímu vnitřnímu odporu, řádově desítky miliohmů. Tyto články můžeme rozdělit na:

- **Otevřené** – např. některé typy olověných akumulátorů, stříbro – zinkové, nikl železo ...

- **Hermetické** – NiMh, nikl- zinkové, lithiové ...

Dále podle typu elektrolytu na:

- **Kyselé**
- **Alkalické**

Díky jejich schopnosti opakovatelnosti nabíjecího procesu jsou pro můj projekt vhodné.

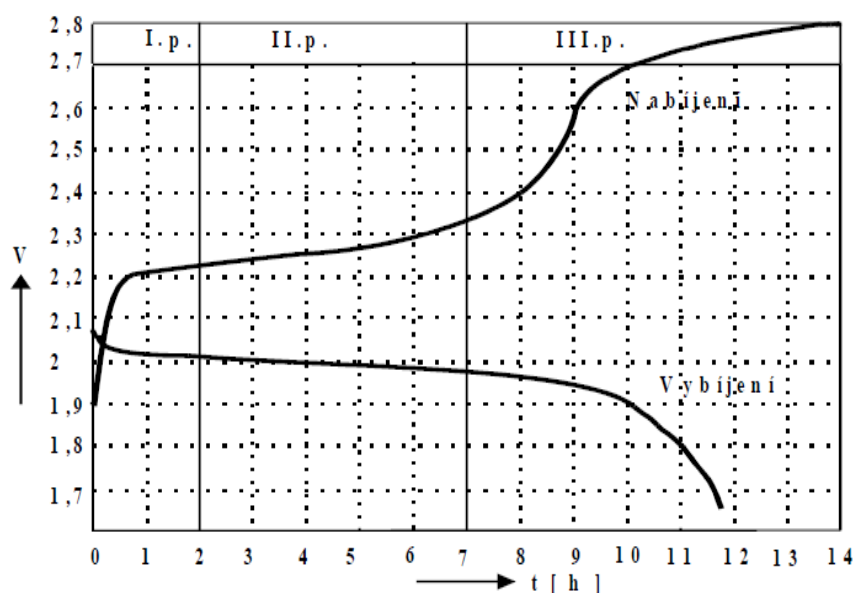
2.3 Akumulátory

V tomto oddílu se budu dále věnovat sekundárním článkům vzhledem k již zmíněné důležitosti v mé práci. Tradiční koncepce využívá dvou sad desek oddělených separátorem a s vnitřním prostorem zaplněným elektrolytem v tekutém, nebo gelovém stavu. Většina akumulátorů nepoužívá depolarizátor, což je látka která se chemicky slučuje s plyny způsobujícími polarizaci. Při hodnocení akumulátorů bereme v úvahu maximální proud dodávaný při poklesu napětí o maximálně 10 %, maximální nabíjecí proud udávaný v poměru ke kapacitě, kapacitu udávanou v mAh, nebo ve Wh, což je kapacita vynásobená svorkovým napětím baterie a oproti primárním článkům ještě počet nabíjecích cyklů.

2.3.1 Olověný akumulátor Pb

Jeho elektrolytem je zředěná kyselina sírová H_2SO_4 , kladná elektroda je oxid olova PbO_2 a záporná elektroda je tvořena čistým porézním olovem. Zde je rovnice popisující nabíjení a vybíjení olověného akumulátoru: $\text{PbO}_2 + 2 \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{Pb} \leftrightarrow \text{PbSO}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$. Zde při vybíjení dochází k sulfatizaci záporné elektrody, a navíc je zředována kyselina sírová. Při sulfatizaci, což je vznik síranu olovnatého na záporné elektrodě, se navíc zvyšuje vnitřní odpor článku. Při jejich nejběžnějšímu účelu použití startování motorových vozidel je to nežádoucí jev.

Dnešní baterie mají desky řešeny jako mřížky a do nich je vlisována pasta s aktivní hmoty. Takovéto baterie při běžném provozu startování motorových vozidel mají životnost asi pět let (350 nabíjecích cyklů). Jmenovité napětí jednoho nabitého článku je 2V, u vybitého je to 1,75V. Při vybíjení pod tuto hodnotu hmota kladné elektrody tuhne a vypadává. Navíc při dlouhodobém provozu vzniká elektrolýza roztoku a tím vývin plynů O_2 a H_2 , které urychlují rozpad aktivní hmoty na kladné elektrodě. Takové baterie je doporučeno nabíjet proudem $0,1 I_c$, silně sulfatované baterie proudem ještě menším. Nabíjecí a vybíjecí charakteristiku demonstruje následující obrázek



Obr. 2.2: Vybijecí a nabíjecí křivka Pb akumulátoru převzato z [6]

Podle technologie výroby můžeme tyto akumulátory rozdělit na akumulátory:

- **Se zaplavenými elektrodami** – elektrolyt je volně nalitá kapalina
- **VRLA (Valve Regulated Lead Acid)** – bezúdržbové ventilem řízené olověné zapouzdřené akumulátory. Tyto akumulátory používají gelové elektrolyty, nebo je elektrolyt nasáknut ve skelné vatě, tzv **AGM**.

Vzhledem k jejich malému vnitřnímu odporu, respektive možnosti dodání velkých proudů je lze použít jako:

- Záložní
- Startovací
- Trakční

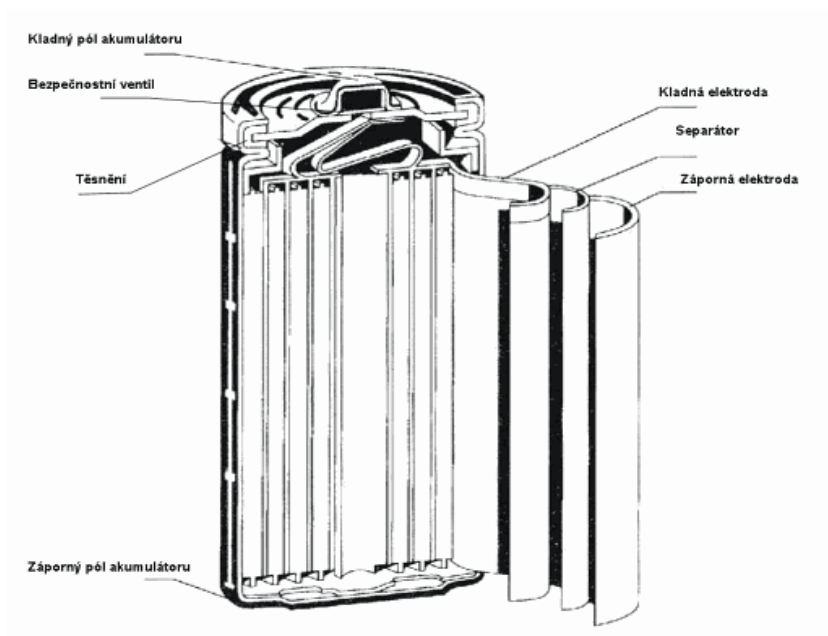
Vše [5]

2.3.2 Nikl kadmiový akumulátor NiCd

Historie niklových akumulátorů sahá až do počátku 20. století. Takzvaný edisonův akumulátor byl na bázi železa a zinku, jako elektrolyt byl použit roztok hydroxidu sodného (NaOH). Ovšem později švéd W. Jungner zaměnil železo na záporné elektrodě za kadmium. Tím vznikl mnohem dokonalejší nikl - kadmiový akumulátor. V dnešní době je ale jako elektrolyt místo roztoku NaOH používán hydroxid draselný. V bývalém Československu se výrobou těchto akumulátorů zabývala firma Bateria Slaný, která ale počátkem devadesátých let pro nedostatek financí na nezbytné ekologické výstavby

sloužící k potřebnému zamezení úniku škodlivin musela výrobu ukončit.

Jedná se o alkalický akumulátor, jehož elektrolytem je zředěný hydroxid draselný KOH. Kladná elektroda je vyrobena z hydroxidu nikelnatého Ni(OH)_2 . Záporná elektroda je vytvořena z práškového kadmia. Ovšem kadmium je látka silně toxická, proto jeho výroba je v dnešní době omezena na nejnutnější produkty. Mezi elektrody je vložen separátor, který odděluje oba elektrodové systémy, a současně může sloužit jako nosič elektrolytu. Názorně celek popisuje následující obrázek 2.3.



Obr. 2.3: Konstrukce hermetického NiCd akumulátoru válcového tvaru, převzato z [7]

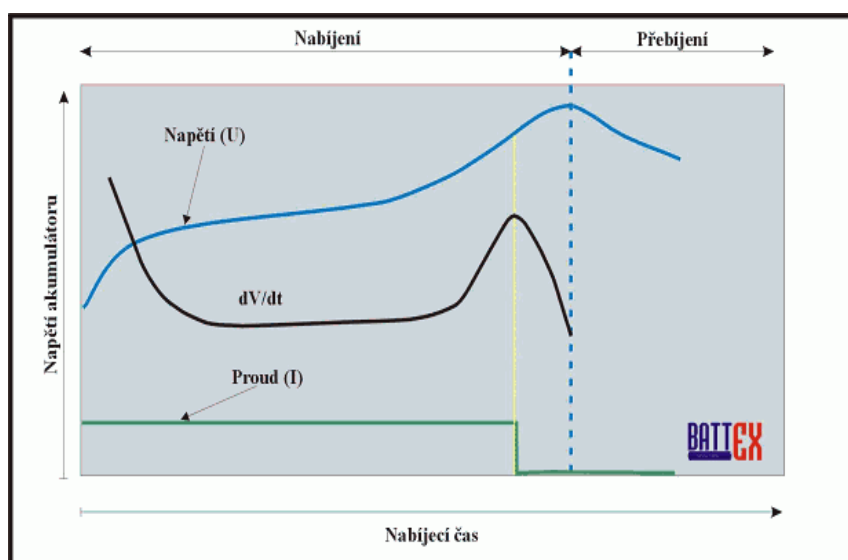
Při procesu nabíjení těchto akumulátorů se hydroxid nikelnatý (dvojmocný nikl), ze kterého je vyrobena kladná elektroda mění na nikloxihydroxid (trojmocný nikl), a hydroxid kademnatý (záporná elektroda) na kadmium. Ovšem tyto přeměny můžou probíhat jen do úplného nabytí elektrod. Po plném nabytí se jako nechtěný jev začne rozkládat elektrolyt a probíhá elektrolýza vody v něm obsažené. Vzniklá voda se dále rozkládá na kyslík, který se usazuje na kladné elektrodě, a vodík usazující se na záporné elektrodě. Pro potlačení tohoto jevu se využívá schopnosti vázat kyslík zápornou elektrodou. Tento děj se nazývá rekombinace. Tyto akumulátory musí být konstruovány tak, aby kapacita záporné elektrody byla o něco větší, a tím pádem byla větší schopnost rekombinace.

Niklokadmiové akumulátory jsou způsobilé dodávat poměrně vysoké proudy, proto dříve byly používány v přístrojích s vyšším příkonem, např. notebooky, videokamery apod. Jejich poměrně velkým nešvarem je paměťový efekt. Tento jev je ale některými autory popírán. Paměťový jev nastává při neúplném vybití článku a opětovném nabytí, kdy se baterie nenabije na maximální kapacitu. Dokonce je údajně nová kapacita takto nabité baterie jen taková, kterou nabijeme při posledním nabíjení. Na druhou stranu ale snesou i poměrně hluboké vybití, ale doporučeno je jejich vybíjení

jen na 0,8 až 0,9 V na článek a poté je zcela nabit. Vybíjení pod tuto úroveň není doporučováno, protože může dojít až k přepólování baterie.

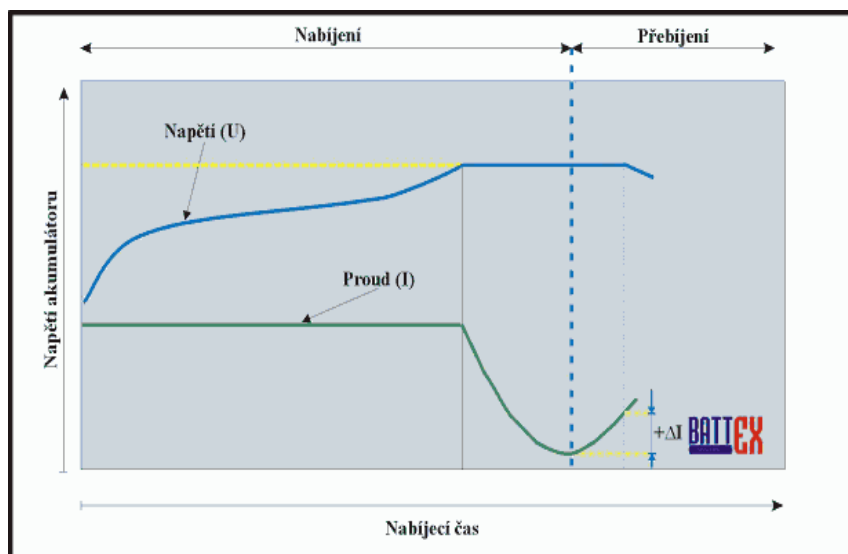
Při nabíjení je nutné kontrolovat svorkové napětí, teplotu, napěťový gradient, což je změna napětí v čase, ale doporučuje se vzhledem k možné tvorbě plynů kontrolovat i tlak.

Napěťová kritéria - Jednodušší nabíječky kontrolují jen derivaci svorkového napětí v závislosti na čase dV/dt . V momentě nulové derivace, tedy dosažení napěťového maxima, ukončují nabíjení. Vyspělejší nabíječky sledují inflexní bod napěťové křivky v čase. Tedy v momentě nulové druhé derivace v čase d^2V/dt^2 ukončují nabíjení. Toto nastává ještě o něco dříve než napěťové maximum. Další možnost ukončení nabíjení je metoda $-\Delta V$, kdy se nabíjení ukončí při poklesu napětí baterie v našem případě o 10 mV. U baterií NIMH je to 5 mV. Tento způsob je založen na jevu, kdy pokles napětí způsobí až přebíjení baterie a následné její zahřívání. [5][7]



Obr. 2.4: Nabíjení NiCd akumulátorů – Metoda “ d^2V/dt^2 ” převzato z [6]

Proudové kritérium – Hodí se zejména pro ultrarychlé nabíjení. Baterie se ze začátku nabíjí konstantním proudem do doby, kdy dosáhne předem definovaného napětí, poté se přejde do režimu konstantního napětí. Nabíjení se ukončí při nárůstu velikosti nabíjecího proudu při konstantním napětí. [5][7]

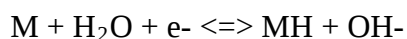


Obr. 2.5: Nabíjení NiCd akumulátorů – Metoda proudového ukončení převzato z [7]

2.3.3 Nikl metal hydridové akumulátory NiMH

Jejich vývoj a výroba byly zahájeny v osmdesátých letech minulého století na podnět ekologů. Materiály těchto akumulátorů měly být náhradou za toxické a zdraví škodlivé kadmium. Prvně vyráběné akumulátory trpěly velmi vysokým samovybíjením, zhoršováním funkceschopnosti během skladování a velice vysokou cenou. Postupem času ale tyto nešvary vymizely a ve své době se staly běžným výrobkem a byly hojně používané například v mobilní technice.

Aktivní hmota kladné elektrody NiMH akumulátorů je v podstatě totožná s elektrodou NiCd akumulátorů, tedy rovněž z hydroxidu nikelnatého Ni(OH)_2 . Chemické děje na této elektrodě při nabíjení i vybíjení jsou rovněž totožné s NiMH akumulátory. Záporná elektroda obsahuje aktivní kovovou slitinu, která je schopna při procesu nabíjení a vybíjení vázat a uvolňovat vodík. Nabíjecí a vybíjecí děj popisuje následující rovnice.



Akumulátor musí mít zápornou elektrodu o větší kapacitě, aby po úplném nabytí zůstala část aktivní hmoty nenabitá. Je to z toho důvodu, že při přebíjení se na kladné elektrodě uvolňuje kyslík, a záporná elektroda musí být schopna ho po přechodu přes separátor redukovat. Dále se na záporné elektrodě nevytváří vodík, a článek může být hermetizován.

Výhody NiMH akumulátorů

Ve srovnání s NiCd jsou hlavními přednostmi NiMH akumulátorů:

- větší kapacita získaná z článku shodných rozměrů
- menší zátěž pro životní prostředí (na rozdíl od NiCd akumulátorů ty

- metalhydridové neobsahují kadmium)
- absence tzv. paměťového efektu

V porovnání s lithiovými akumulátory mají metalhydridové tyto výhody:

- malý vnitřní odpor (který může být až $10\times$ nižší)
- v některých případech možnost použití společného nabíječe s NiCd akumulátory.

Nevýhody NiMH akumulátorů

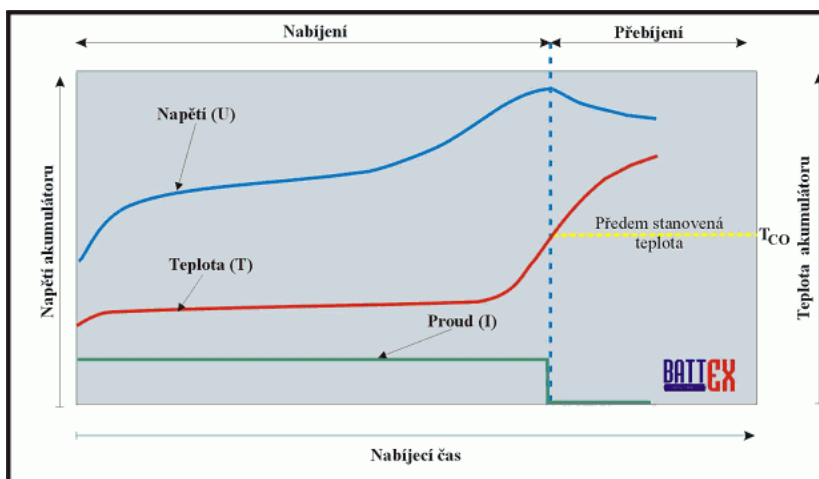
- menší rozsah klimatických a mechanických odolností
- větší samovybíjení (lehce větší než u NiCd akumulátorů a výrazně větší než u akumulátorů Li-Ion), avšak jsou již speciální výrobní řady NiMH akumulátorů s malým samovybíjením, označované jako RTU baterie.
- větší vnitřní impedanci – základní typy nejsou vhodné pro velmi rychlé nabíjení a extrémně velké vybíjecí proudy, opět však jsou speciální výrobní řady například pro akumulátorové nářadí
- vyšší hmotnost ve srovnání s NiCd a Li- ale ve srovnání s gravimetrickou kapacitou jsou na tom NiMH akumulátory lépe než NiCd
- vyšší cena ve srovnání s NiCd, ale tato nevýhoda se pomalu smazává

NiMH akumulátory v podstatě vytěsnilly NiCd akumulátory z trhu, a používaly se v těch aplikacích, kde dříve našly uplatnění NiCd články. Daly se nabíjet ve stejných nabíječkách jako NiCd akumulátory, neobsahovaly kadmium a měly vyšší kapacitu.

Metody nabíjení jsou v podstatě totožné s nabíjením NiCd akumulátorů. Jde o nabíjení normálním proudem, kdy se baterie nabíjí po dobu 12 až 16 hodin proudem 0,1It. Další metoda je udržovací konzervačním proudem. Používá se pro již nabitou baterii a má za úkol udržet ji v nabitém stavu. Dále jde o metodu trvalého dobíjení, která má ale negativní účinek na životnost baterie.

Metoda, při které se nabíjení ukončí v závislosti na teplotě článku se nazývá $\Delta T/\Delta t$. Tato metoda ukončí nabíjení při překročení teplotního nárůstu za předem definovanou dobu. Obvykle to bývá $0,5 - 1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Doporučuje se nabíjecí proud 0,3 It. Tento způsob nabíjení byl velice oblíbený, ale měl své nedostatky např. při odpojení nabitého telefonu s ještě zahřátou baterií a opětovném nabíjení se baterie přebíjela vlivem neschopnosti reakce teploty na přebytí.

Metoda T_{CO} je metoda odpojení baterie při předem definované teplotě, většinou 45°C . doporučuje se do kapacit 2Ah proudem $0,5 - 1\text{ It}$. Tato metoda je funkční pouze u baterií se standardním teplotním průběhem, jinak se baterie přebíjí, nebo u teplejších nedobíjí.



Obr. 2.6: Nabíjení NiCd akumulátorů – Metoda “ T_{CO} ” převzato z [7]

2.3.4 Lithium – iontové akumulátory Li –ion

Tyto články se začaly vyvíjet v polovině sedmdesátých let, kdy kladnou elektrodou byly sulfidy kovů a zápornou elektrodou kovové lithium. Tehdy ovšem docházelo ke korozi a pasivaci elektrod. Dále při nabíjení malým proudem $\approx 0,05 \text{ It}$ se na povrchu lithia tvořily jehličky a protrhávaly separátor a docházelo ke zkratům. A v neposlední řadě lithium tvořilo vysoce reaktivní houbovitou hmotu a docházelo k nepředvídatelným teplotním pochodům. V začátcích pokusů se experimentovalo s různými sloučeninami lithia jako materiálu záporné elektrody a u kladné elektrody to byly sloučeniny například vanadu, wolframu, niobu, apod. Pokrok přinesla až studie firmy Sony v roce 1990. Tehdy představili novou technologii, která využívala jako aktivní materiál pro zápornou elektrodu směs grafitu (uhlíku) obohaceného lithiem a polyolefinů.

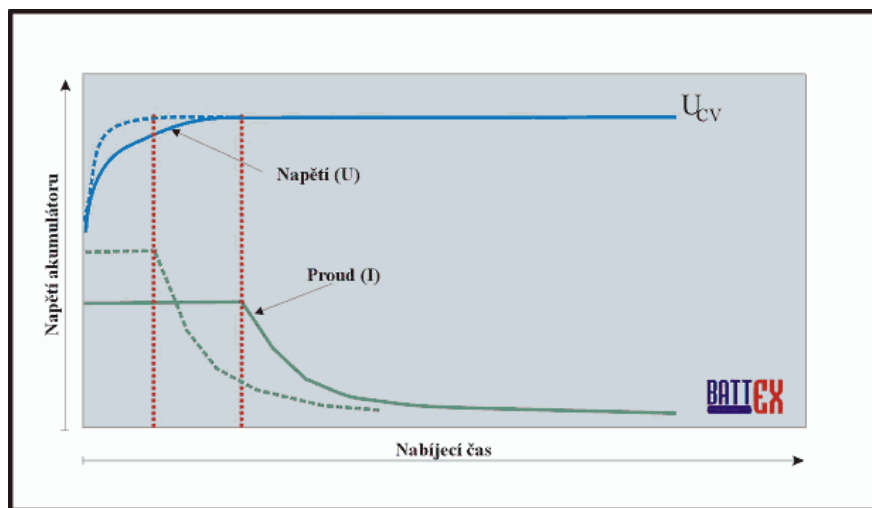
V dnešní době se jako aktivní hmota kladné elektrody osvědčily materiály jako LiCoO_2 , LiMn_2O_4 , LiNiO_2 a LiV_2O_5 , popřípadě i jiné. Co se týká elektrolytu, používá se dnes LiPF_6 rozpuštěný v nepolárním rozpouštědle.

Výhody – Vysoké napětí, typické jmenovité je 3,6 V, ale může se v závislosti na použité technologii lišit. Vysoká energie, Li-Ion 4/3AF – 7200 mWh (2000 mAh/3,6 V) nízká hmotnost, dlouhá životnost (až 1500 cyklů), nízké samovybíjení (8% za měsíc), nemají paměťový efekt, dobrá bezpečnost, nezávadnost pro životní prostředí.

Nevýhody – Omezený nabíjecí proud ($1,5 \text{ It}$), maximální vybíjecí proud je jen 2 It , v průběhu vybíjení dochází k poklesu napětí, velký vnitřní odpor u nejběžnějších typů, pracovní teplota je jen do -20°C , lithiové akumulátory jsou velice náchylné na přebíjení a podvybíjení, vysoká prodejní cena – avšak ceny každým rokem klesají.

Lithiové baterie se můžou nabíjet metodou časového ukončení, kdy se nabíjí například proudem $0,5 \text{ It}$, dokud se nedosáhne předem stanoveného napětí a poté ještě dvě hodiny. Tato metoda se používá jen v zařízeních, kde se nepředpokládá výměna baterie. Nejběžnější metoda nabíjení je metoda napěťového nabíjení, metoda CCCV (Constant Current followed by Constant Voltage). Při této metodě se baterie nabíjí

konstantním proudem do té doby, než se dosáhne předem stanoveného napětí, a poté se nabíjí konstantním napětím. Nabíjení se pak ukončí při poklesu proudu na stanovenou mez. Při nabíjení Li-Ionových článků, pokud je správně nastaveno konečné nabíjecí napětí, nedochází k přebíjení akumulátorů tak, jako tomu je u NiCd a NiMH akumulátorů. [7]



Obr. 2.7: Nabíjení lithiových akumulátorů převzato z [7]

2.3.5 Lithium – polymerové akumulátory Li-pol

Je to relativně nový typ akumulátoru, v dnešní době se hojně používá v mobilních telefonech, fotoaparátech, noteboocích, RC modelech, atd. Jejich vývoj je založen na základu Li-ion baterií, a zlepšují jejich vlastnosti (nízká hmotnost, relativně vysoká kapacita, minimální samovybíjení a velká výkonnost).

Kladná elektroda je zhotovena z LiCoO_2 nebo LiMn_2O_4 , jako elektrolyt je použit vodivý polymer polyethyleneoxid, a záporná elektroda je složena z lithia nebo ze sloučeniny uhlíku a lithia.

Výhody

- Velká kapacita na malém rozměru
- Bez paměťového efektu
- Minimální samovybíjení (cca 5 % za měsíc)
- Jednoduché a bezproblémové zapojení mnoha článků do série
- Vhodné nominální napětí 3,7 V
- Dlouhá životnost (až 2000 cyklů, až 3 roky)
- Nemusí být nutně zcela vybit před nabitím
- Přijatelný teplotní rozsah (-10 až 50 °C)
- Rychlonabíjení (1 Ah i za hodinu)

Nevýhody

- Možnost vznícení nebo výbuchu (zejména při zkratování - nutná interní ochrana)
- Kapacita klesá i při nepoužívání akumulátoru
- Při poklesu napětí pod 2,7 V může být akumulátor nenávratně zničen
- Vyšší pořizovací cena
- Akumulátor může tzv. "vytuhnout" (i při nízkém samovybíjení, po roce a půl nepoužívání prostě odejde)

Co se týká technologie nabíjení, používá se zde stejná kritéria ukončení nabíjení jako u akumulátorů Li-ion. [8]

3 DC-DC MĚNIČE NAPĚTÍ

DC-DC měnič, neboli stejnosměrný měnič má za úkol přeměnu stejnosměrného napětí na stejnosměrné napětí jiné velikosti. Pro spínání se používají tranzistory a diody, jako zásobníky energie při převodu se používají cívky a kondenzátory, pro galvanické oddělení se používají pulzní transformátory. Jejich využití vzhledem k relativně velké účinnosti, malým rozměrům a nízké hmotnosti je v dnešní době široké. Nacházejí se ve spínaných zdrojích např. v napájecích zdrojích PC, v noteboocích, v mobilních telefonech a v jejich zdrojích, v nabíječkách baterií a v nejrůznější jiné spotřební elektronice. Jsou tedy typickými konvertory používající se u nízkovýkonových aplikací, jako například bateriové napájení, nebo fotovoltaika. [9]

3.1 Rozdělení DC-DC měničů

DC-DC měniče můžeme rozdělit do dvou skupin, a to na měniče:

- S lineárními prvky
- Spínané

3.1.1 Měniče s lineárními prvky

Jejich nežádoucími vlastnostmi jsou zejména schopnost napětí pouze snižovat oproti primárnímu, a jejich nižší účinnost. Dále nejsou tyto měniče schopny invertovat polaritu vstupního napětí. Používají se zejména tam, kde je rozdíl mezi vstupním a výstupním napětím minimální, a účinnost je v případě přibližné rovnosti vstupního a výstupního proudu dána poměrem napětí. Konverze napětí je zde prováděna polovodičovými prvky (jako například tranzistory MOSFET nebo bipolární tranzistory) v jejich lineární části výstupní charakteristiky. [10]

Tab. 3.1: Vlastnosti lineárních měničů převzato z [10]

výhody	nevýhody
obvodová jednoduchost zapojení	nízká účinnost
nízká cena součástek	nutnost užití chladičů
vysoké potlačení vlivu kolísání vstupního napětí	velké rozměry, velká hmotnost
nízká hodnota výstupního odporu (dokonce nulová či záporná)	nemožnost izolace vstup – výstup
nízký šum, potlačení např. o 70 dB	nemožnost konverze nahoru

Vzhledem k jejich malé účinnosti, velkým rozměrům, nutnosti užití chladiče a jiným záporným vlastnostem je ve svém projektu nebudu používat a ani se jimi dále

nebudu zabývat.

3.1.2 Spínané DC-DC měniče

Odlišností regulace napětí těchto měničů od klasických lineárních je jejich nespojitost. Impulsní regulace (obr. 5.9) umožňuje výrazně redukovat výkonovou ztrátu na regulačním členu. V tomto případě pracuje regulační prvek (tranzistor) jako řízený spínač. Proud jím tedy prochází pouze po určitý interval pracovního cyklu. To znamená, že proud procházející měničem po dobu aktivní je poté akumulována do akumulačního členu, nejčastěji kondenzátoru, nebo cívky, slouží po dobu pasivního intervalu jako zdroj energie.

Tab. 3.2: Vlastnosti spínaných měničů [10]

Výhody	Nevýhody
Velká energetická účinnost	Zvlnění výstupního napětí
Velké výstupní výkony	Dynamické parametry
Modifikovatelnost regulátorů	Kmitočtové rušení
Výhodné konstrukční parametry	

3.2 Nejčastěji používané topologie měničů

Bez galvanického oddělení

- **Nábojová pumpa** - topologie pro velmi nízké výkony (výhodou je konstrukce bez cívek - používá pouze kondenzátory)
- **Snižovač napětí** – také označovaný jako step-down- nebo buck-converter
- **Zvyšovač napětí** - také označovaný jako step-up- nebo boost-converter
- **Buck-Boost** - umožňuje zvyšování i snižování napětí, obrací polaritu napětí
- **SEPIC** - výstupní napětí může být vyšší nebo nižší než vstupní, polarita zůstává stejná

S galvanickým oddělením

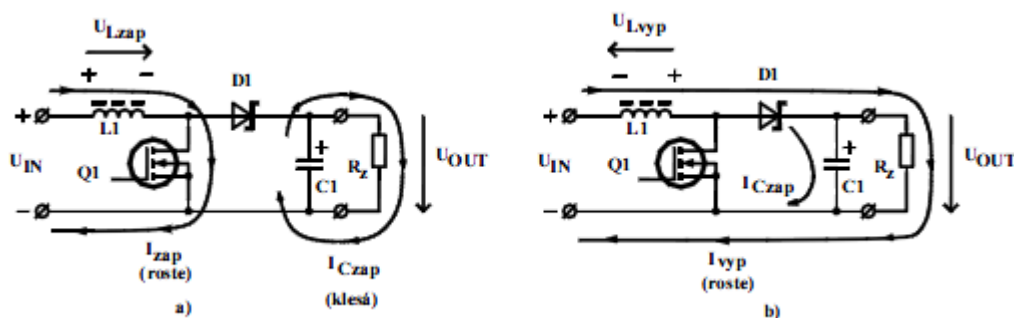
- **DC-DC měnič flyback** – topologie pro nízké výkony (do 250W), malý počet součástek, používá transformátor se vzduchovou mezerou
- **DC-DC měnič half-forward** – vyšší výkon (do 500W), používá trafo bez vzduchové mezery s pomocným vinutím

- **DC-DC měnič push-pull** - pro výkony okolo 1 kW
- **DC-DC měnič half bridge** - pro výkony 100 až 500 W
- **DC-DC měnič full bridge** - pro výkony nad 300 W

Vše [9]

3.3 Boost konvertor

Neboli zvyšující měnič, jinak také step-up. Energie je v tomto případě akumulována v magnetickém poli cívky. Princip je názorně popsán na obrázku 3.1.



Obr. 3.1: Zvyšující měnič a) tranzistor Q1 sepnut b) tranzistor Q1 rozeprnut převzato z [10]

Zde je základní forma zapojení zvyšujícího měniče. V čase, kdy je sepnutý tranzistor Q1 se energie akumuluje do cívky L1, a ta se dočasně chová jako spotřebič. Během rozeprnutí tranzistoru proud protéká ze zdroje U_{IN} a z cívky do zátěže. Cívka se v tomto případě chová jako zdroj spojený do série s napětím U_{IN} . Proud v této fázi protéká do zátěže a výstupního kondenzátoru C_1 s těchto do série zapojených zdrojů napětí. Dioda D1 zabraňuje vybíjení výstupního kondenzátoru zpět přes tranzistor v době, kdy je sepnut. Při rozeprnutí tranzistoru si proud procházející cívkou zachová svůj směr, ale obrací polaritu napětí, takže se přechází z režimu spotřebiče do režimu zdroje.

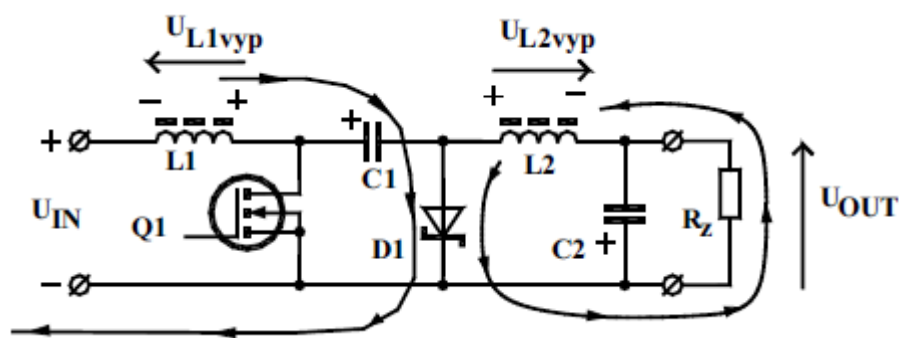
Pakliže uvažujeme, že zdrojem pro výstupní napětí je sériové zapojení U_{IN} a cívky, je výstupní napětí U_{OUT} vždy vyšší, nebo minimálně rovno U_{IN} . [10]

3.4 Buck–boost konvertor

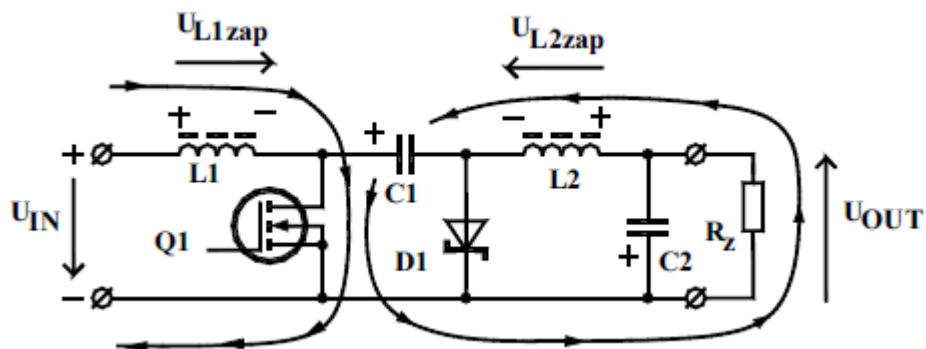
V literatuře je tento typ měniče někdy nazýván „cuk“. Tento typ měniče má tu vlastnost,

že výstupní napětí není závislé na velikosti vstupního napětí v tom smyslu, že vstupní napětí může být větší, nebo menší oproti výstupnímu napětí. Hodí se tedy pro převod napětí ze solárního článku, který pracuje s různým napětím, závislém na jeho osvitu.

Buck – boost konvertor ovšem invertuje polaritu napětí. Tento typ konvertoru má o něco vyšší účinnost než konvertor SEPIC, (až 96 %), SEPIC až 92 %. Na následujících obrázcích si vysvětlíme jeho princip.



Obr. 3.2: První interval, tranzistor Q_1 rozepnut převzato z [10]



Obr. 3.3: Druhý interval, tranzistor Q_1 sepnut převzato z [10]

Prvním intervalem je stav rozepnutého tranzistoru Q_1 . Proud tedy teče přes Napájecí napětí U_{IN} do série spojeného s cívku L_1 a kondenzátor C_1 a diodu D_1 . Kondenzátor se tedy v tomto intervalu nabíjí. Při nedodržení správného intervalu nabíjení kondenzátoru a překročení určité doby se tento kondenzátor začne zpět vybíjet přes cívku do zdroje.

Při druhém intervalu je tranzistor sepnutý a kondenzátor je přes tento tranzistor spojený s obvodem C_1 , L_2 , R_Z , C_2 a může se vybíjet. Proud cívku se v tomto momentu může zvyšovat a cívka se chová jako spotřebič.

Třetím intervalem je stejný proces jako u prvního intervalu s tím rozdílem, že cívka L_2 je již zdrojem energie, takže proud má snahu pokračovat ve stejném směru při opačné polaritě napětí, a to přes diodu, kondenzátor C_2 a zátěž R_Z . [10]

4 VÝBĚR OPTIMÁLNÍCH SOUČÁSTEK A NÁVRH ZAŘÍZENÍ

4.1 Výběr součástek

4.1.1 Výběr Solárního článku

Výběr solárního článku je v této aplikaci velmi omezen rozměry, jelikož se jedná o přenosné zařízení. Měl by mít ale při odpovídajících rozměrech co nejvyšší výkon, což jsou protikladné požadavky. Zvolil jsem solární článek nabízený e-shopem Flajzar.cz. Modul je nanesený na tištěném spoji, povrch tvoří glazura pro venkovní použití. Ze spodu modulu jsou dva pájecí kontakty. Špičkový výkon: 1W – maximální napětí: 5,5 V, maximální proud: 180 mA, rozměry: 90x140x3mm. [13]

4.1.2 Výběr akumulátoru

Vzhledem k možnostem v nabídce dnešních akumulátorů jsem se díky velké kapacitě, absenci paměťového efektu, minimálnímu samovybití a dlouhé životnosti rozhodl použít Lithium – polymerový akumulátor. Zvolil jsem jednočlánekový akumulátor 3,7 V a 1600 mAh vzhledem k navýšení kapacity oproti průměrné kapacitě akumulátorů používaných v mobilních telefonech. Akumulátor též obsahuje ochranu elektroniku. Při výběru jsem využil nabídku internetového obchodu: Repase, výroba, prodej akumulátorů a akupacků [14].

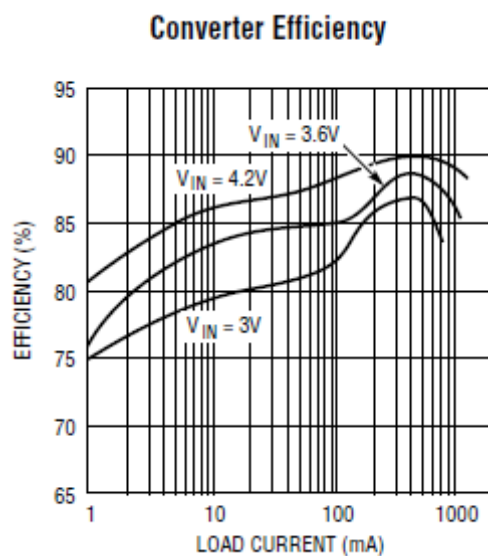
4.1.3 Výběr měničů

Pro mou aplikaci jsem si vybral DC-DC měniče od firmy Linear Technology. Kritéria jsem vybíral podle typu pouzdra s ohledem na možnost ručního pájení. Pro měnič zajišťující napětí pro nabíjení akumulátoru jsem zvolil topologii Buck-Boost díky její nejvyšší potenciální účinnosti oproti například topologii SEPIC. Dále by měnič měl mít maximální vstupní napětí minimálně 5,5 V, jako je nejvyšší napětí solárního panelu, a nejnižší maximálně 3 V, což bylo napětí solárního panelu při osvětlení 1400 Lx a maximálním výkonu. Z nabízených měničů dle tabulky 4.1 jsem vybral obvod LTC 3536EMSE.

Tab. 4.1: Nabídka Buck-Boost měničů firmy Linear technology. Převzato z [12]

Product	Number of Outputs	Vin Min (V)	Vin Max (V)	Output Current (A)	Vout Min (V)	Vout Max (V)	Features	Packages	Switch Current (A)	Topology
Selections		5 vds +	5 vds +	6 vds +	11 vds +	7 vds +			1 vds +	1 vds +
Compare		<=3	>=5	0.3-1.8	<=5	>=5			1.2-7.2	uck-BoostSEPIC
LT13021	3	1.8	5.5	1	1.8	5.25	Burst Mode, Power Good, Soft Start, Output Disconnect	QFN-24, TSSOP-24		BuckBoost, Buck
LT13027	1	1.8	5.5	1	1.8	5.25	Programmable Input Current Limit, Burst Mode, Output Disconnect	QFN-18, MS-12		BuckBoost
LT13030	1	1.8	5.5	0.6	1.8	5.25	Output Disconnect, Burst Mode, Soft Start, Resistor Set Frequency	QFN-18, MS-12		BuckBoost
LT13035	1	1.8	5.5	1	1.8	5.5	Output Disconnect, External Synchronization, Resistor Set Frequency, Burst Mode	MS-12		BuckBoost
LT13039	2	2.2	5.5	1	0.8	5.25	Burst Mode, Resistor Set Frequency, Soft Start, Sequencing, LDO, Output Disconnect	QFN-24		BuckBoost, Buck, LDO
LT13441	1	2.4	5.5	1.2	2.4	5.25	Output Disconnect, Burst Mode, Soft Start, External Synchronization	QFN-12		BuckBoost
LT13032	2	2.4	5.5	0.4	2.2	5.25	Burst Mode, Power Good, Soft Start, Output Disconnect	QFN-10		BuckBoost, Buck
LT13443	1	2.4	5.5	1.2	2.4	5.25	Output Disconnect, Burst Mode, External Synchronization	QFN-12		BuckBoost
LT13032	1	2.4	5.5	0.5	2.4	5.25	Output Disconnect, Burst Mode, Soft Start, Resistor Set Frequency	QFN-18, MS-12		BuckBoost
LT13442	1	2.4	5.5	1.2	2.4	5.25	Output Disconnect, Soft Start, Burst Mode, Resistor Set Frequency, External Synchronization	QFN-12		BuckBoost
LT13034	1	2.4	7	0.5	1.8	7	Burst Mode, Output Disconnect, Soft Start	QFN-18, SSOP-18		BuckBoost
LT13038	1	2.4	5.5	0.8	1	5.5	Output Disconnect, Burst Mode, Soft Start	QFN-8		BuckBoost
LT13440	1	2.5	5.5	0.6	2.5	5.5	Output Disconnect, Burst Mode, Resistor Set Frequency, External Synchronization	MS-10		BuckBoost
LT13444	1	2.7	5.5	0.4	0.5	5	Output Disconnect, Soft Start	QFN-8		BuckBoost

Měnič pro účel převodu napětí z akumulátoru 3,7 V na napětí sběrnice USB 5 V jsem vybral zvyšující měnič LT1308IS8 od téže firmy. Jeho graf účinnosti v závislosti na odebíraném proudu je zobrazena na obr. 4.1.



Obr. 4.1: Účinnost měniče LT1308 v závislosti na odebíraném proudu převzato z [15]

4.1.4 Výběr boxu

Box na záložní zdroj sem vybral ze sortimentu internetového obchodu TME. Jedná se o univerzální hliníkový box o rozměrech 150 x 106 x 32 mm. Má pět horizontálních poloh pro umístění desky plošných spojů. Neobsahuje čela, která budu muset dodatečně vyrobit.

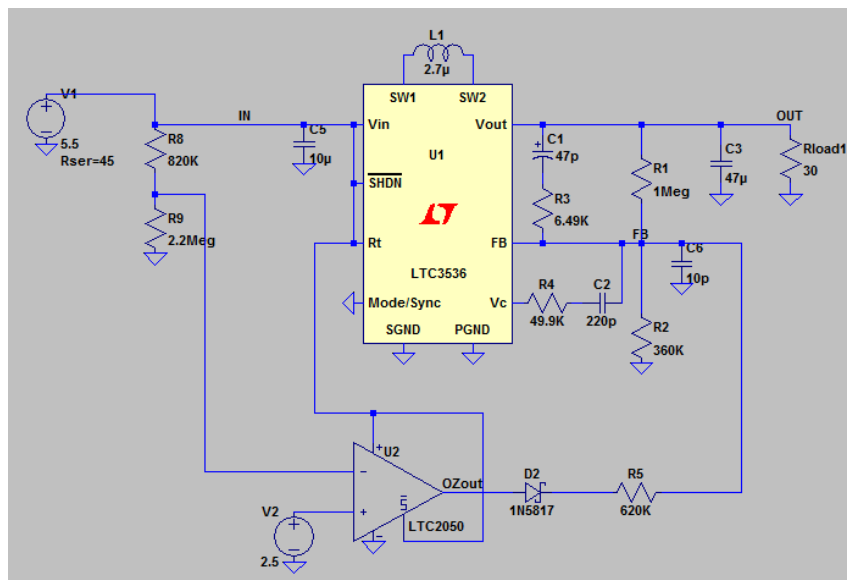


Obr. 4.2: Univerzální box Alubos převzato z [16]

4.2 Návrh zařízení

4.2.1 Nabíjecí obvod

Záložní zdroj napájený solárním článkem by měl mít co největší účinnost, měl by být jednoduché konstrukce vzhledem k možným poruchám a měl by být přiměřené velikosti. Při návrhu nabíjecího měniče jsem vycházel z doporučeného zapojení dostupného z datasheetu měniče LTC3536, pracuje se vstupním napětím 1,8 – 5,5 V využil jsem bezplatného simulačního programu LT spice IV, který je volně ke stažení na stránkách Linear Technology.



Obr. 4.3: Schéma zapojení nabíjecího obvodu akumulátoru [17]

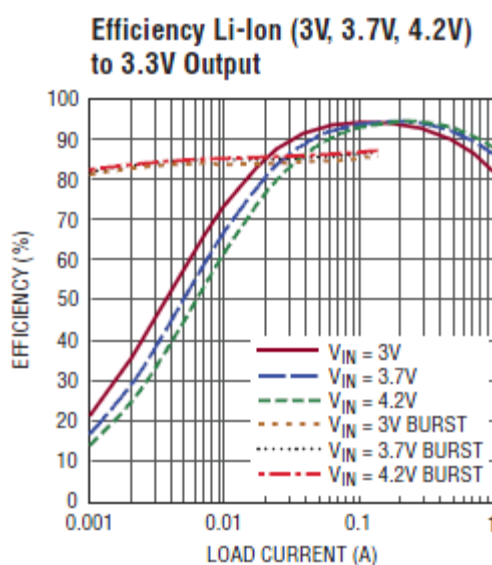
Pro napájení měkkým zdrojem (velký sériový odpor) bylo nutno obvod opatřit zpětnou vazbou. Tato zpětná vazba má za úkol hlídat napětí solárního článku, a to v tom smyslu, že jakmile napětí klesne pod stanovenou mez, komparátor ve zpětné vazbě zvýší napětí na pinu FB, čímž se napětí na výstupu měniče sníží. Napětí na tomto pinu při normálním provozu je 0,6 V. Pro účel porovnávání napětí bylo nutno zapojit k neinvertujícímu vstupu OZ referenční napětí 2,5 V. Pro tento účel jsem použil referenční diodu LM366. Dělič napětí R8, R9 je nastaven tak, aby zpětná vazba reagovala při poklesu U_{IN} pod 3,5 V. Schotkyho dioda D2 má za úkol odpojit větev zpětné vazby v době její nečinnosti.

Odporovým děličem R1, R2 se nastavuje výstupní napětí měniče.

$$V_{OUT} = 0.6 \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) [V] \quad (4.1)$$

Jakmile ale toto napětí uměle zvýšíme, měnič situaci vyhodnotí jako vyšší napětí na výstupu a začne napětí na výstupu snižovat. Tím se výkon odebíraný obvodem sníží a vstupní napětí začne narůstat.

Obvod může pracovat v PWM nebo Burst módu, což se nastavuje zapojením pinu s názvem MODE/SYNC. Podle následujícího grafu můžeme zjistit závislost účinnosti v závislosti na módu a odebíraném proudu. Já jsem zvolil mód PWM vzhledem k jeho menšímu proudovému omezení.



Obr. 4.4: Závislost účinnosti na módu převzato z [18]

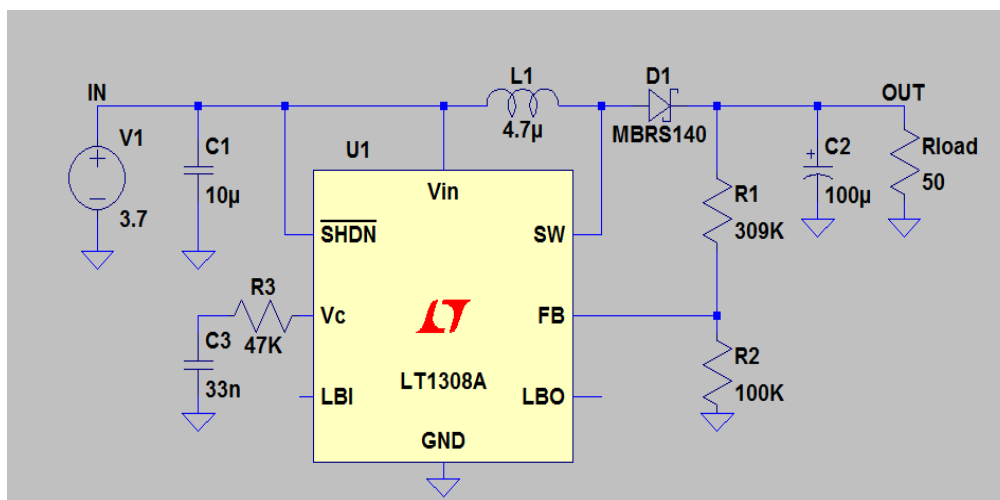
Operační zesilovač pracuje až od 2,7 V, tím pádem by vstupní napětí nemělo klesnout pod tuto mez. Při návrhu je tedy důležité, aby rychlost poklesu výstupního napětí byla taková, při které by napětí na vstupu neklesalo pod tuto mez.

4.2.2 Obvod napájecí USB

Pro tento účel jsem vybral boost konvertor Firmy Linear Technology LT1308IS8. Má výhodu automatického přepínání z PWM módu do Burst módu, který má vyšší účinnost při menším odběru proudu. Je navržen na výstupní napětí 5 V a na maximální odběr 1 A. Při běžném PWM módu je deklarováno minimální zvlnění výstupního napětí. Je používán v mobilních stanicích, videokamerách, pagerech, bezdrátových telefonech a bateriových záložních zdrojích. Spínací kmitočet 600 kHz umožňuje zapojení s malými SMD součástkami. Je dodáván v osmipinovém SO pouzdře. Zapojení znázorňuje následující obrázek. Toto zapojení je převzato z [19].

Výpočet nastavení výstupního napětí pomocí odporového děliče R1, R2.

$$V_{OUT} = 1,22 \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) [V] \quad 4.2$$



Obr. 4.5: Schéma zapojení výstupního měniče do USB

4.3 Kontrolní simulace

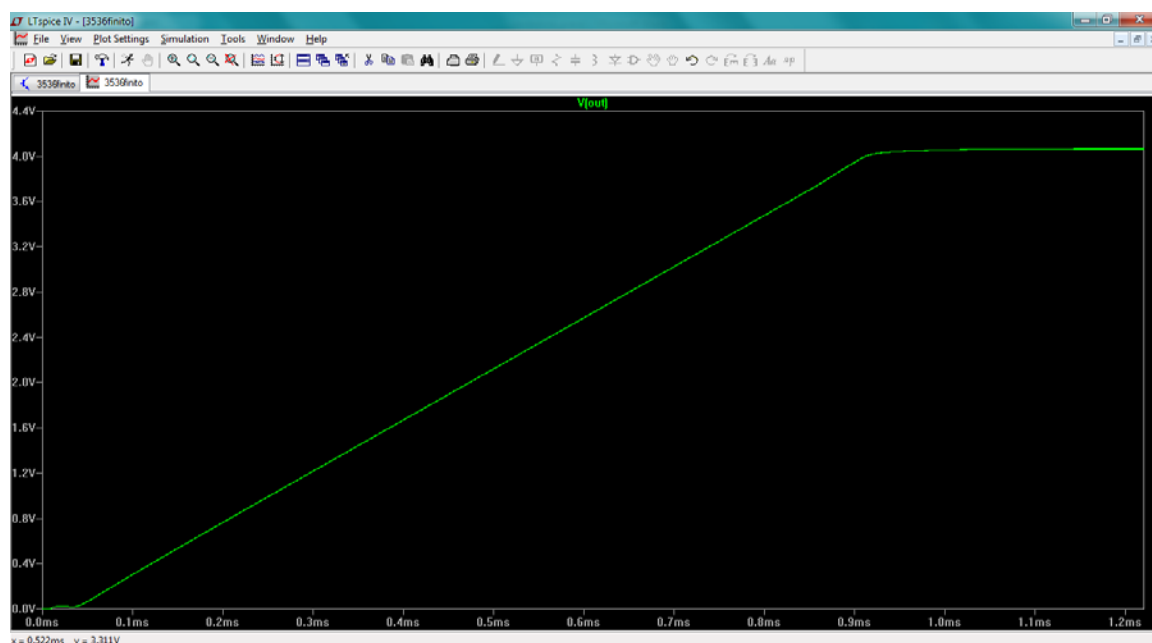
Celou simulaci jsem provedl v programu LTspice, což je program volně ke stažení přímo od firmy Linear Technology s modely všech jejích produktů. Tento program jsem volil, protože jsem používal oba dva měniče i operační zesilovač právě od této firmy.

Při simulaci chování zpětné vazby se projevilo rozdílné napětí (při připojení a odpojení ZV) na výstupu měniče LTC3536, a to o 1 V. Při odpojení obvodu bylo napětí 4,1 V což je maximální povolené nabíjecí napětí Lithiového akumulátoru, a při odpojení obvodu 3,1 V. Tento jev byl pravděpodobně dán paralelní kombinací výstupní impedance operačního zesilovače a rezistoru R7, který má vliv přímo na výstupní napětí měniče. Jak se dále ukázalo, na toto napětí měla vliv i velikost kapacity kondenzátoru C4, který jsem musel připojit k pinu FB pro zabránění vzniku oscilací na tomto pinu. Obvod se takto choval i po zapojení shottkyho diody na výstup operačního zesilovače, která má za úkol odpojit obvod zpětné vazby při její nečinnosti.

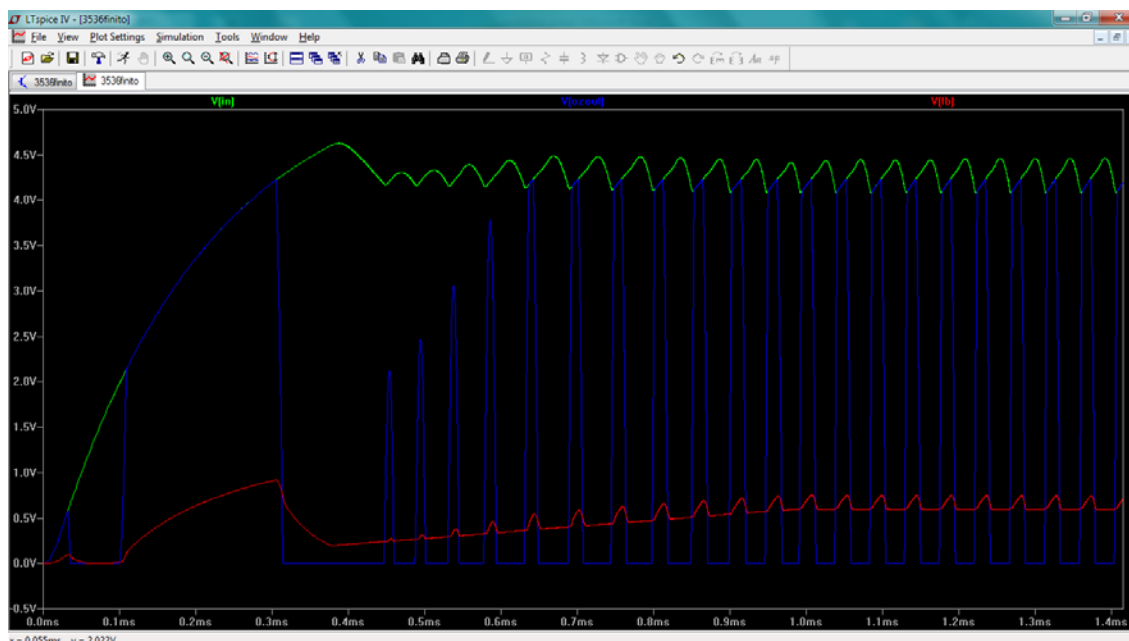
Shotkyho diodu jsem volil vzhledem k jejímu saturačnímu napětí kolem 0,2 V, protože napětí na pinu FB nastavujícím výstupní napětí je 0,6V, a normální křemíková dioda má napětí někdy i vyšší podle konstrukce. Proud shottkyho diodou je ale v závěrném směru vyšší než u diody Si. Za diodu jsem zapojil rezistor o hodnotě 620 kΩ, poněvadž při simulaci se ukázalo, že při menších hodnotách zpětná vazba příliš

snižovala napětí na pinu FB, a při vyšších hodnotách nezvyšovala napětí do té míry, aby obvod fungoval správně, a požadované vyšší napětí nebylo dostatečně vysoké. Zpětnou vazbu jsem nastavil tak, aby spínala při poklesu vstupního napětí pod 3,5 V, což je napětí, při maximálním výkonu, které produkuje solární článek při osvětlení v pokoji za průměrně slunečného dne.

Při postupném doladění těchto parametrů se obvod choval podle očekávaných předpokladů. Jako zatěžovací impedanci při simulaci jsem zvolil rezistor o velikosti 30Ω vzhledem k optimálnímu zatížení měniče. Na následujícím obrázku 4.6 můžeme vidět, že výstupní napětí se ustálí za dobu přibližně 1,1 ms.



Obr. 4.6: Napětí na výstupu nabíjecího měniče



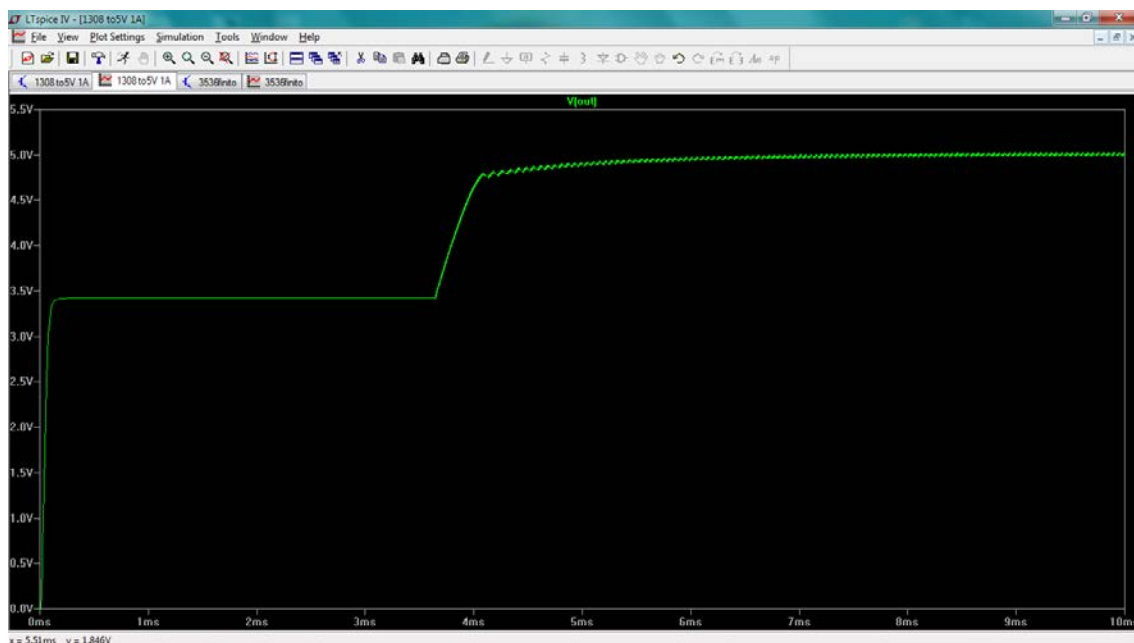
Obr. 4.7: Funkce zpětné vazby v závislosti na vstupním napětí

Funkčnost zpětné vazby je odsimulována se sériovou impedancí zdroje $20\ \Omega$. Pro její přesné doladění jsem před vstup komparátoru zapojil $100K$ trimr, který v simulaci neuvažuju. Na obrázku 4.7 je zobrazen její chod. Při změně osvětlení solárního článku, respektive jeho vnitřního odporu se mění frekvence spínání komparátoru. Při nižší frekvenci se výstupní napětí zvyšuje vlivem delšího času sepnutí výstupního obvodu. Překmity vlivem zpětné vazby na pinu FB tento obvod při poklesu vstupního napětí odpojí.

Napětí na zpětné vazbě je snímáno přímo z výstupu komparátoru, červená charakteristika je snímána přímo na pinu FB.

U výstupního měniče LTC 1308 bylo nastavení výstupního napětí jednodušší. Vycházel jsem taktéž z doporučeného zapojení. Tento snímač pracuje se vstupním napětím $1 - 6\ V$. Maximální výstupní proud jsem nastavil na $1\ ampér$ při napětí $5\ voltů$.

Na obrázku 4.8 je odsimulován start měniče LTC1308. Je zde patrné zpoždění ustálení konečného napětí, což je pravděpodobně způsobeno dobou nabíjení interních kapacit.



Obr. 4.8: Start měniče LTC1308 napětím mezi j

4.4 Návrh plošného spoje

Při návrhu plošného spoje musíme dodržovat určitá pravidla, například izolační vzdálenost mezi jednotlivými spoji. Tato vzdálenost je dána jak maximálním napětím mezi spoji, tak druhem technologie použité při výrobě desky plošných spojů.

Vzhledem k použité vysoké spínací frekvenci měniče je nutno umístit diskretní součástky, které se podílí na nastavení měničů co nejblíže jejich pouzder. Pro návrh DPS jsem volil součástky SMD, které nemají drátkové vývody způsobující parazitní indukčnosti. (Viz. příloha). Dále se ve vývodech můžou indukovat parazitní signály s frekvencí blízkou spínacímu kmitočtu, takže vývody působí jako anténa.

Pro návrh plošného spoje jsem použil program EAGLE 6.0.1

5 OSAZENÍ SOUČÁSTEK A PRAKTICKÁ REALIZACE

Desku plošných spojů jsem si nechal vyrobit ve firmě Pragoboard [20]. Pouzdra rezistorů jsem volil 0603. Osazování jsem prováděl ve školní laboratoři z důvodů, že nedisponuji osciloskopem, laboratorním zdrojem, ani dostačující pájecí stanicí. Po osazení součástkami a po oživení jsem nastavil komparátor ve zpětné vazbě tak, aby spínal při poklesu napětí na solárním článku pod 3,5 V. Při testování obvodu jsem zjistil vyšší proud odebíraný obvodem. Na výstupu jsem detekoval malé napětí kolem 1 V. Proto jsem byl nucen přerušit nabíjecí a napájecí obvod. Ukázalo se, že nabíjecí obvod funguje správně, ale napájecí obvod produkoval jeho maximální napětí místo požadovaných 5 V, a pro první obvod představoval neadekvátní zátěž. Po výměně rezistoru nastavujícím výstupní napětí bylo vše v pořádku.

Dále se ukázalo, že příkon potřebný pro spuštění nabíjecího měniče solární články nedodává, proto jsem zapojil na výstup solárního článku tantalový kondenzátor s kapacitou 220 uF. Při zapnutí solárního článku poté veškerý výkon jde do připojeného kondenzátoru, který pro něj představuje při počátku nabíjení teoreticky zkrat. Poté co se tento kondenzátor nabije, neteče jím žádný proud, a napětí na něm je teoreticky maximální napětí solárního článku. Po tomto ději je již vstupní napětí větší, a měnič začne korektně fungovat.

Následující zjištění bylo, že solární článek naprázdno při plném osvětlení produkuje větší napětí, a to více než 6 V. Výrobce udává 5,5 V. Operační zesilovač má maximální napájecí napětí 6 V, a při překročení tohoto napětí se zničil. Byl sem proto nucen zapojit na vstup nabíjecího obvodu zapojit i přes horší účinnost měniče omezující zenerovu diodu 5,6 V o maximálním ztrátovém výkonu 1,3 W. Po výměně operačního zesilovače zpětná vazba fungovala podle mých předpokladů.

U vstupu micro USB jsem zjistil, že neposkytuje požadované napětí 5 V, ale pouze kolem 100mV. Tento problém jsem odstranil zapojením rezistoru o hodnotě 130 kΩ mezi pin GNG a pin 2. Po osazení tímto rezistorem se na konektoru již objevilo napětí 5 V.

Nicméně po opětovném změření nabíjecího obvodu tento dával na výstupu maximální napětí příslušného měniče, tj. kolem 6,5 V. Domníval sem se, že je chyba někde v děliči nastavujícím výstupní napětí. Prověřil jsem proto oba rezistory R6 a R7, ale byly oba v pořádku. Další možná alternativa je, že měnič přestal fungovat korektně. Spínací cívka spínala, ale shlukově s pausami, a proto si nemyslím, že byla vadná. Nevím, kde se stala chyba, a pro nedostatek času jsem tento problém nedokázal odstranit. Výstupní napájecí obvod do USB funguje správně, ale u nabíjecího obvodu je na výstupu stále vysoké napětí.

6 ZÁVĚR

V této práci jsem se zabýval návrhem záložního zdroje napájeného solárním článkem. V první části byly rozebrány typy solárních panelů a jejich technologický vývoj. Pro účel nabíjení Li-pol akumulátoru byl vybrán panel o špičkovém výkonu 1 W. Vzhledem k tomu, že zdroj má být přenosný, byl výběr limitován rozměry. Napětí při osvětlení v pokoji dále od okna bylo 3,5 V, a pro toto napětí jako minimální byl zdroj konstruován. Jako alternativní zdroj energie jsem zvolil napájení přes sběrnici micro USB pro případ potřeby rychlejšího nabíjení.

Dále jsem se zabíral popisem vlastností různých druhů akumulátorů vhodných do mého projektu. Jako nejvhodnější typ akumulátoru jsem vybral Li-pol akumulátor o kapacitě 1600 mAh při napětí 3,6 V. tento typ akumulátoru má malé samovybití, velkou kapacitu při malých rozměrech a velkou životnost. Použil jsem akumulátor se zabudovaným obvodem pro jeho ochranu.

Pro nabíjecí obvod jsem volil vzhledem k tomu, že napětí na solárním článku může být větší, i menší než je požadované nabíjecí napětí buck-boost convertor doplněný o zpětnou vazbu, která při poklesu vstupního napětí snižuje nabíjecí napětí zvýšením napětí na zpětnovazebním pinu. Tento měnič jsem nastavil na spínací frekvenci 1,2 MHz. Pro obvod napájení konektoru USB jsem zvolil zvyšující měnič pro dosažení napětí o velikosti 5 V. Tento měnič LT1308 je navržen na maximální výstupní proud 1 A. Jeho výhoda je automatické přepínání mezi PWM a Burst mode.

Bohužel zdroj se mi doposud nepodařilo naplno zprovoznit, a proto jsem nemohl uskutečnit potřebná měření. Měl jsem v úmyslu změřit zatěžovací charakteristiku na výstupu, tj. závislost U_{out} na I_{out} . Dále by bylo vhodné změřit závislost účinnosti nabíjecího měniče na dodávaném vstupním výkonu ze solárního článku.

LITERATURA

- [1] SOLARTEC [online]. [cit. 13.11.2012]. Internetové stránky fy. Solartec dostupné na www: <http://www.solartec.cz/>
- [2] Czech RE Agency - Fotovoltaika pro každého [online]. [cit. 13.11.2012]. Dostupné na www: <http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika>
- [3] ISOFENERGY [online]. [cit. 13.11.2012]. Internetové stránky firmy Isofenergy dostupné na www: <http://www.elektřinazestřechy.cz/Slunecni-zareni-v-CR.aspx>
- [4] Energyweb [online]. [cit. 16.11.2012]. Dostupné na www: <http://www.energyweb.cz/web/>
- [5] NOVOTNÝ, V. *Napájení elektronických zařízení*. Skriptum. Brno: FEI, VUT v Brně, 1999.
- [6] Jiří Hammerbauer. Olověné akumulátory [online] [cit. 26.11.2012], Plzeň: fakulta elektrotechnická ZČU, Dostupné na www: <http://www.jergym.hiedu.cz/~canovm/elektro/clanky2/olov.pdf>
- [7] Battex [online]. 2010 [cit. 20.11.2012]. Abeceda baterií a akumulátorů. Dostupné na www: <http://www.battex.info/>
- [8] WIKIPEDIE, *Lithium-polymerový akumulátor* [online]. [cit. 29.11.2012]. Dostupné na www: http://cs.wikipedia.org/wiki/Lithium-polymerový_akumulátor
- [9] WIKIPEDIE, *DC-DC měnič* [online]. [cit. 29.11.2012]. Dostupné na www: http://cs.wikipedia.org/wiki/DC-DC_měnič
- [10] Alexandr Krejčířík, *DC/DC měniče*, 1 vydání, Praha: BEN technická literatura, 2001, 112stran, ISBN 80-7300-045-8
- [11] Jiří Hammerbauer. *Elektronické napájecí zdroje a akumulátory skriptum*. Plzeň: FE, ZČU v Plzni, 1998
- [12] Linear technology [online]. [cit. 3.12.2012] Nabídka firmy Linear technology. Dostupné na www: <http://www.linear.com/>
- [13] Flajzar [online]. [cit. 5.12.2012]. Nabídka internetového obchodu. Dostupné na www: <http://www.flajzar.cz/>
- [14] Repase, výroba, prodej akumulátorů a akupacků. [online]. [cit. 4.12.2012] Nabídka firmy. Dostupné na www: <http://www.repasebaterii.cz/>
- [15] Linear technology Datasheet LT1308 pdf. DC-DC converter [online]. [cit. 6.12.2012]. Dostupné na www: <http://cds.linear.com/docs/Datasheet/1308abfb.pdf>
- [16] TME. [online]. [cit. 7.12.2012] Nabídka internetového obchodu. Dostupné na www:

- <http://www.tme.eu/>
- [17] LT spice IV. Simulační program firmy Linear technology. Dostupný na [www: http://www.linear.com/designtools/software/#LTspice](http://www.linear.com/designtools/software/#LTspice)
- [18] LTC3536 [online]. [cit. 9.12.2012] Datasheet. Dostupný na [www: http://www.linear.com/product/LTC3536](http://www.linear.com/product/LTC3536)
- [19] L1308 [online]. [cit. 11.12.2012] Datasheet. Dostupný na [www: http://www.linear.com/product/L1308](http://www.linear.com/product/L1308)
- [20] Pragoboard s.r.o. [online]. [cit. 24.4.2013]. Nabídka internetového obchodu. Dostupné na [www: http://www.pragoboard.cz/](http://www.pragoboard.cz/)

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

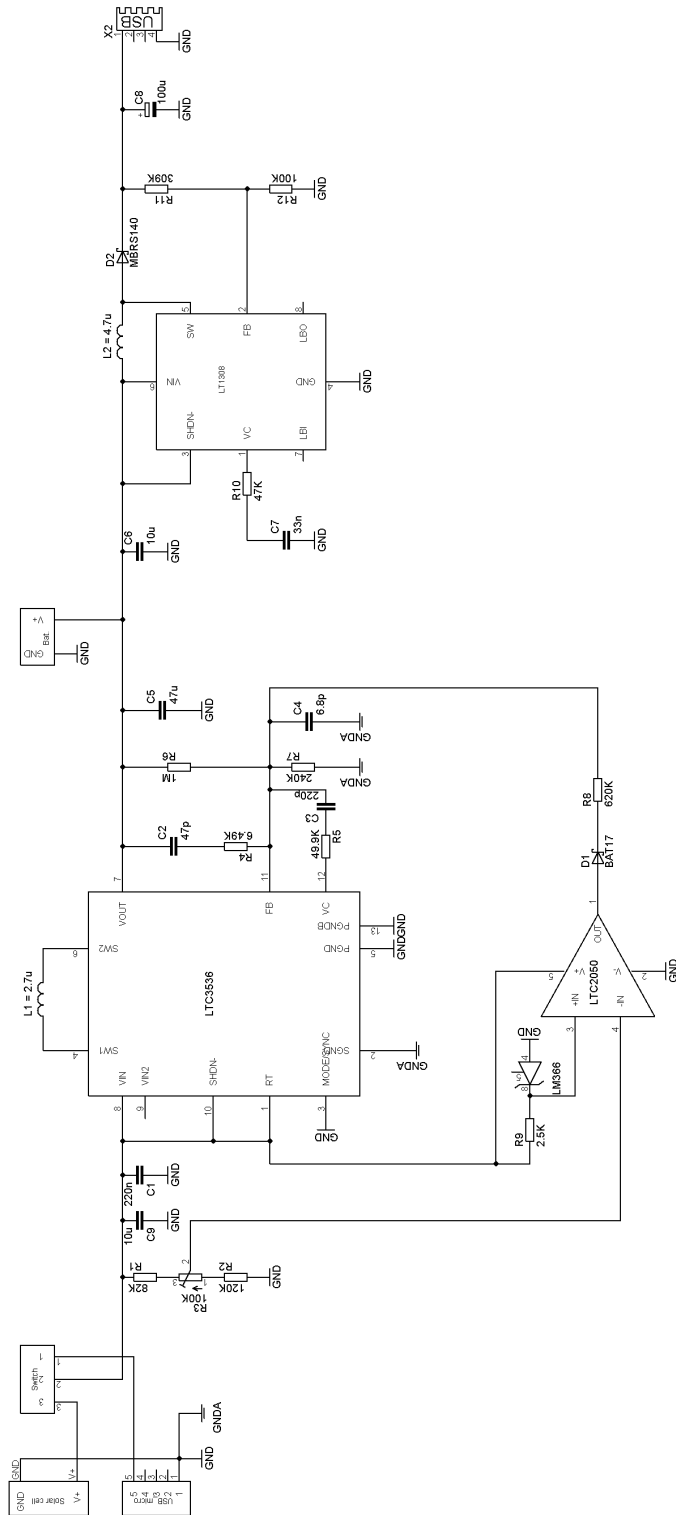
W	jednotka výkonu
W/m ²	jednotka slunečního výkonu
V	jednotka elektrického napětí
Ah	jednotka kapacity akumulátoru
Wh	jednotka kapacity akumulátoru
dV/dt	změna napětí v čase (derivace)
dV ₂ /dt ₂	druhá derivace v čase
T	teplota
t	čas
It	elektrický proud, při kterém se akumulátor vybije za 1 hodinu
-ΔV	metoda odpojení baterie při poklesu jejího napětí
T _{CO}	metoda odpojení baterie při předem definované teplotě
L	cívka
C	kondenzátor
Q	tranzistor
D	dioda
U _{IN}	vstupní napětí
U _{OUT}	výstupní napětí
Lx	jednotka intenzity osvětlení

SEZNAM PŘÍLOH

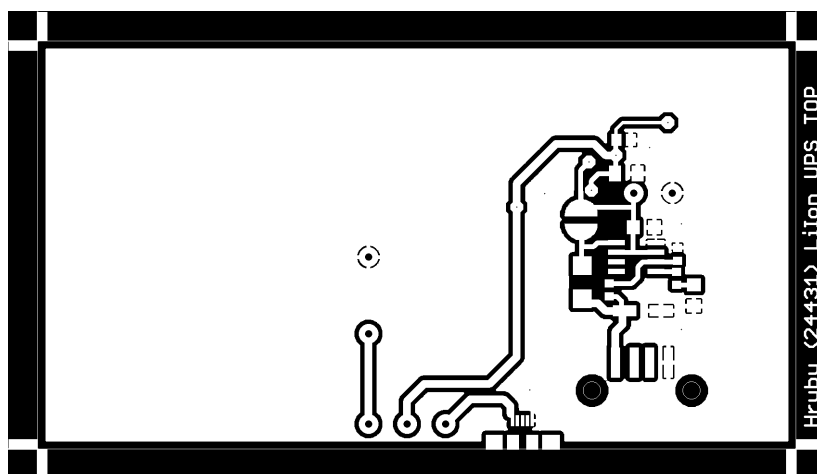
A	Návrh zařízení	35
A.1	Obvodové zapojení.....	35
A.2	Deska plošného spoje – top (strana součástek)	36
A.3	Deska plošného spoje – bottom (strana spojů)	36
B	Seznam součástek	37
C	Fotodokumentace	38

A NÁVRH ZAŘÍZENÍ

A.1 Obvodové zapojení

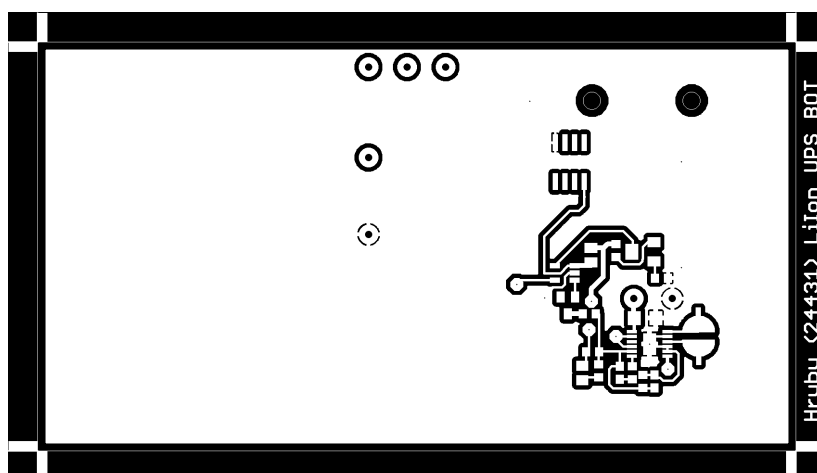


A.2 Deska plošného spoje – top (strana součástek)



Rozměr desky 100 x 54 [mm], měřítko M1:1

A.3 Deska plošného spoje – bottom (strana spojů)



Rozměr desky 100 x 54 [mm], měřítko M1:1

B SEZNAM SOUČÁSTEK

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
R1	82K	0603	Rezistor
R2	120K	0603	Rezistor
R3	100K	0603	Trimr
R4	6,49K	0603	Rezistor
R5	49,9K	0603	Rezistor
R6	1M	0603	Rezistor
R7	240K	0603	Rezistor
R8	620K	0603	Rezistor
R9	2,5K	0603	Rezistor
R10	47K	0603	Rezistor
R11	309K	0603	Rezistor
R12	100K	0603	Rezistor
C1	220n	0805	Keramický kondenzátor
C2	47p	0805	Keramický kondenzátor
C3	220p	0603	Keramický kondenzátor
C4	6,8p	0603	Keramický kondenzátor
C5	47u	1206	Keramický kondenzátor
C6	10u	1206	Keramický kondenzátor
C7	33n	1206	Keramický kondenzátor
C8	100u	Panasonic G	Elektrolytický kondenzátor
C9	220u		Tantalový kondenzátor
L1	2,7u	SMT43	Tlumivka
L2	4,7u	SMT43	Tlumivka
D1	BAT17	SOT23	Shotky spínací dioda
D2	MBRS140T3G	SMB	Usměrňovací dioda
D3	LM336	SO8	Referenční dioda
D4	1SMA5919BT3G	SMA	Zenerova dioda
OZ1	LTC 2050	TSOT23	Operační zesilovač
IO1	LTC 3536	MSOP12	DC/DC měnič
IO2	LT1308	SO8	DC/DC měnič

C FOTODOKUMENTACE



Obr. 6.1: Celkový pohled



Obr. 6.2: Pohled shora



Obr. 6.3: Spodní pohled