

České vysoké učení technické v Praze

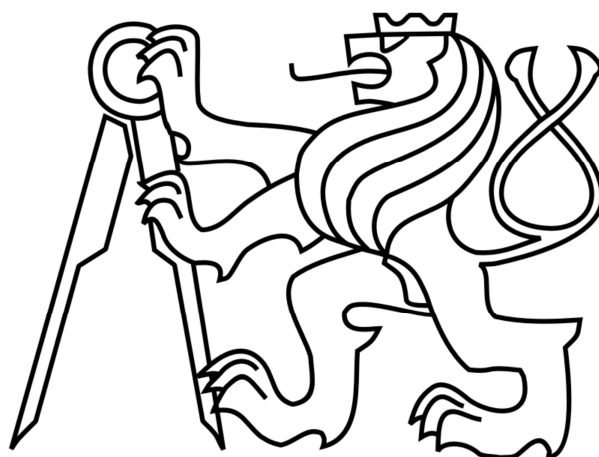
Fakulta elektrotechnická

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2014

Tomáš Morong

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická



Bakalářská práce

Měnič k solárnímu panelu modelu elektromobilu

Autor: Tomáš Morong

Vedoucí práce: Ing. Lubor Jirásek, Csc.

2014

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektromagnetického pole

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Tomáš Morong**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Obor: Komunikační technika

Název tématu: **Měnič k solárnímu panelu modelu elektromobilu**

Pokyny pro vypracování:

1. Prostudujte literaturu týkající se vlastností slunečních panelů a měničů pro konverzi elektrické energie pro využití v zařízení se superkondenzátory.
2. Navrhněte a realizujte měnič pro transformaci elektrické energie ze solárních panelů na úroveň vhodnou pro použití v zařízení se superkondenzátory. Respektujte budoucí pravděpodobné použití panelu jako zdroje v mobilním zařízení (model elektromobilu).
3. Ověřte funkci zařízení.
4. Proveďte ověřovací měření.
5. Vyhodnoťte dosažené parametry.

Seznam odborné literatury:

- [1] Krejčířík, A.: Napájecí zdroje I. - III. BEN, Praha 1997 a pozdější vydání.
[2] Aplikační poznámky firem TI, LT, IR. (www.ti.com, www.linear.com, www.irf.com)

Vedoucí: Ing. Lubor Jirásek, CSc.

Platnost zadání: LS 2014/2015

L.S.

prof. Ing. Miloš Mazánek, CSc.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 13. 2. 2014

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci „Solární zdroj elektromobilu“ 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 23. května 2014

podpis bakalanta

Anotace

Cíl této práce je seznámit se s teorií solárních panelů, měničů napětí a superkondenzátorů. Dále pak se způsobem přenosu elektrického náboje získaného ze solárního panelu do superkondenzátoru. Hlavní část je návrh a realizace vhodného zapojení spínaného zdroje schopného nabíjet superkondenzátor. Superkondenzátor zde slouží jako akumulární prvek potřebný pro napájení elektromobilu či jiného zařízení. Solární zdroj by měl plnit svou funkci jak při nízké, tak při maximální intenzitě záření.

Klíčová slova: Solární panel, měnič napětí, superkondenzátor

Abstract

The aim of this thesis is to study the theory of solar panels, voltage converters and supercapacitors. Furthermore, the mode of transmission of an electric charge resulting from the solar panel to the supercapacitor. The main part is the design and implementation of an appropriate involvement of a switching power which is able to charge the supercapacitor. The supercapacitor is used here as an accumulative element which is necessary for infeed of an electric vehicle or other device. The solar power supply should do its function as a low, so at maximum intensity of radiation.

Key words: solar panel, voltage converter, supercapacitor

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce Ing. Luboru Jiráskovi, Csc. za pomoc při vedení bakalářské práce. Mé poděkování patří též Ing. Adamovi Jánskému a Ing. Jiřímu Buňatovi za poskytnuté elektronické součástky.

Obsah

1	Seznam použitých symbolů a zkratk	10
2	Úvod	12
3	Sluneční energie	12
3.1	Dopad slunečního záření na povrch Země	12
3.2	Intenzita slunečního záření.....	13
4	Fyzikální princip fotovoltaické přeměny.....	14
4.1	PN přechod.....	15
5	Solární články.....	16
5.1	Druhy solárních článků	16
5.1.1	Monokrystalický solární článek.....	16
5.1.2	Polykrystalický solární článek.....	16
5.1.3	Amorfní solární článek	17
5.1.4	Hybridní solární článek	17
5.2	Parametry solárních článků	17
5.2.1	Voltampérová charakteristika.....	18
6	Superkondenzátor	19
6.1	Princip superkondenzátoru.....	20
7	Elektronické měniče napětí	20
7.1	Teorie DC/DC měničů	21
7.1.1	Základní parametry.....	22
7.2	Základní zapojení DC/DC měničů	25
7.2.1	Snižující měnič (Buck).....	25

7.2.2	Zvyšující měnič (Boost)	25
7.2.3	Zvyšující a snižující měnič (Buck-Boost)	26
7.2.4	Akumulující měnič (Flyback).....	28
8	Měnič k solárnímu panelu	29
8.1	Řešení vhodného DC/DC měniče	29
8.1.1	Obvod LM2578A	30
8.1.2	Obvod LTC3108-1	30
8.1.3	Obvod TPS63060	35
9	Volba měničů.....	40
9.1	Zvyšující měnič s LTC3108-1.....	40
9.1.1	Ověřovací měření	41
9.2	Snižující a zvyšující měnič s TPS63060	42
9.2.1	Ověřující měření.....	43
10	Měření parametrů solárního panelu.....	45
10.1	Měření solárního panelu.....	45
11	Závěr.....	47
12	Literatura	48
13	Seznam obrázků a tabulek.....	50
14	Přílohy	51
14.1	Návrh tištěný spoj zvyšujícího měniče.....	51
14.2	Rozmístění součástek zvyšujícího měniče	51
14.3	Tištěný spoj s rozmístěním součástek zařízení TPS63060EVM-619	52
14.4	Návrh plošného spoje proudového zdroje.....	52
14.5	Rozmístění součástek proudového zdroje	53
14.6	Zvyšující měnič.....	53

14.7	Snižující i zvyšující měnič s proudovým zdrojem	54
14.8	Seznam součástí zvyšujícího měniče.....	54
14.9	Seznam součástí snižujícího i zvyšujícího měniče	55
14.10	Seznam součástí proudového zdroje.....	55
14.11	Naměřené hodnoty zvyšujícího měniče	56
14.12	Naměřené hodnoty snižující i zvyšujícího měniče	56
14.13	Měření VA charakteristiky solárního panelu MPT7.2-150	57

1 Seznam použitých symbolů a zkratek

β		zesilovací činitel tranzistoru
λ	m	vlnová délka
η	%	účinnost
a	m	šířka
b	m	délka
C	F	kapacita
c	ms^{-2}	rychlost světla
D		pracovní cyklus zvyšujícího měniče
f	Hz	frekvence
h	Js	planckova konstanta
I_{SC}	A	zkratový proud
I_{IN}	A	vstupní proud
I_{SW}	A	spínací proud
I_{OUT}	A	výstupní proud
I_{B}	A	proud na bázi
I_{C}	A	proud na kolektoru
k	JK^{-2}	boltzmanova konstanta
L_{SEC}	H	indukčnost sekundárního vinutí
LDO		Low Dropout Linear Regulator
m	kg	hmotnost
MPP	W	bod maximálního výkonu
P_{out}	W	výstupní výkon
P_{in}	W	vstupní příkon
PWM		pulsní šířková modulace
R_{P}	Ω	paralelní odpor
R_{S}	Ω	sériový odpor
R_{OUT}	Ω	výstupní odpor

R_I	Ω	vnitřní odpor
U_{0C}	V	napětí naprázdno
U_{IN}	V	vstupní napětí
U_{OUT}	V	výstupní napětí
U_{FB}	V	zpětnovazební napětí
U_{CC}	V	napájecí napětí
t	s	čas
T	K	termodynamická teplota

2 Úvod

Se spínanými zdroji se v dnešní době můžeme setkat téměř v každém odvětví elektroniky. Pod pojmem spínaného zdroje si můžeme představit také měniče napětí, jejichž hlavní funkce je přeměna hodnoty vstupního napětí na vyšší či nižší hodnotu výstupního napětí.

DC/DC měnič je důležitá komponenta při získávání elektrické energie ze solárního článku. K tomu, abychom mohli pracovat se solární energií, je třeba porozumět této problematice již od vyzařování světla ze Slunce až po přeměnu energie ve fotovoltaických panelech. Od toho se odvíjí také volba návrhu DC/DC měniče. V neposlední řadě je důležité znát činnost superkondenzátorů, kterými se v dnešní době dají nahradit typické akumulátorové baterie.

3 Sluneční energie

Slunce jako zdroj energie vyzařuje elektromagnetické záření a nabité částice zvané jako sluneční vítr. Jedná se o hlavní zdroj energie ve sluneční soustavě [1].

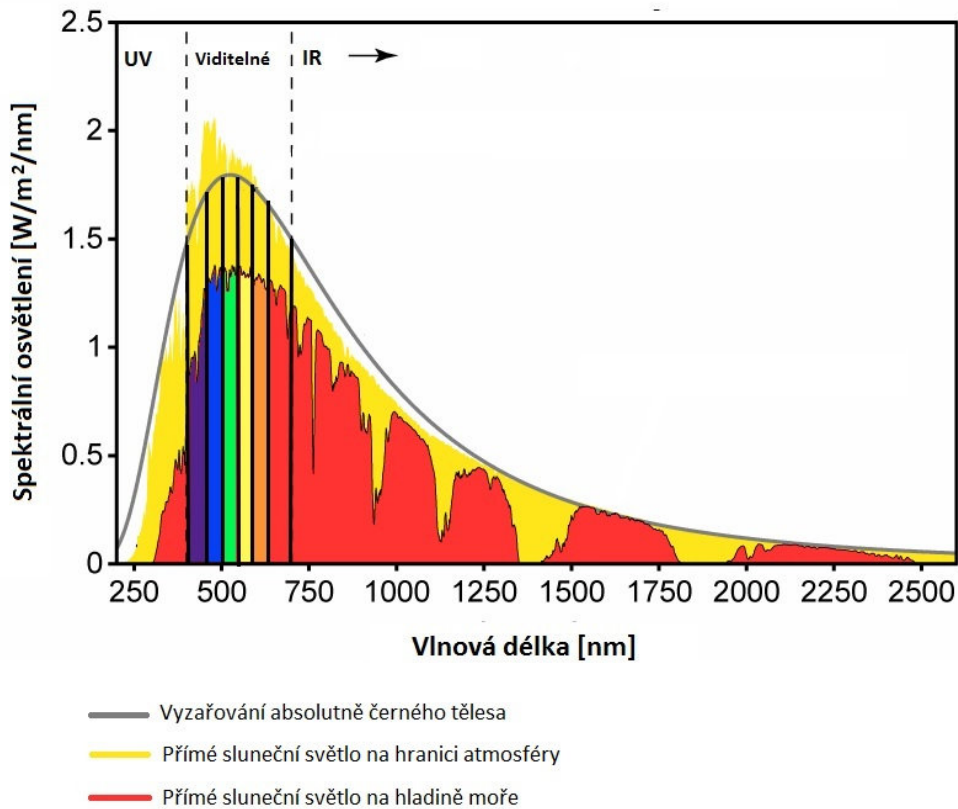
3.1 Dopad slunečního záření na povrch Země

Záření dopadající na Zemi není 100% viditelné. Záření můžeme rozdělit na:

- Ultrafialové záření (vlnová délka menší než 380 nm) - 0 % - 4 %
- Viditelné záření (vlnová délka 380 nm – 750 nm) - 21 % - 46 %
- Infračervené záření (vlnová délka 750 nm – 1200 nm) - 50 % - 79 %

Denní světlo je obecně považováno za bílé. Není to však pravda, jelikož denní světlo má v každou dobu během dne jiné spektrální složení. Barva denního světla závisí na složení atmosféry (vzduchu včetně exhalací).

Spektrum slunečního záření před vstupem do atmosféry je podobné spektru záření absolutně černého tělesa (Obr. 1). Z obrázku je také patrné spektrum záření po průchodu atmosférou [2, 20].



Obr. 1 – Spektrum slunečního záření (převzato z [3])

3.2 Intenzita slunečního záření

Energie slunečního záření dopadající na zemský povrch je udávána jako výkon na jednotku plochy a pohybuje se v rozmezí 1330 Wm^{-2} – 1400 Wm^{-2} v závislosti na vzdálenosti Země od Slunce. Intenzita záření se mimo rovníkovou oblast mění i v závislosti na ročním období. Závisí ještě na dalších věcech (počasí, čas) [1].

Výpočet intenzity záření vyplývá z Planckova vyzařovacího zákona, který je odvozen z Wienova a Stefan-Boltzmannova zákona.

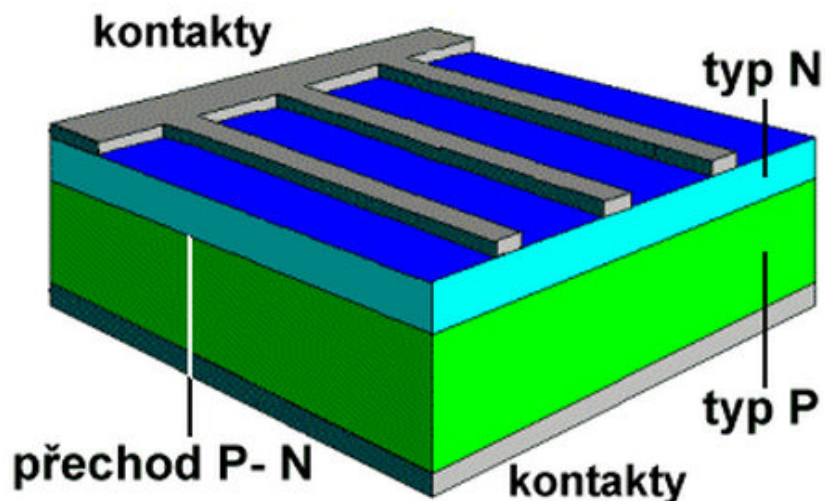
Planckův vyzařovací zákon:

$$f(\lambda, T) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)} \quad (1)$$

kde $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ je rychlost světla, $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$ je Boltzmanova konstanta a T je termodynamická teplota [8].

4 Fyzikální princip fotovoltaické přeměny

Elektromagnetické záření lze přeměnit pomocí fotovoltaické přeměny na elektrickou energii díky polovodičovým fotovoltaickým článkům. Nejběžnější solární články jsou založeny na bázi krystalického křemíku [1]. Funkce solárního článku je založena na přechodu PN. Solární článek je možné si představit, jako velkoplošnou polovodičovou diodu (Obr. 2). Při ozáření článku dochází k fotovoltaickému jevu, pomocí kterého se uvolňují páry elektronů a děr [4].

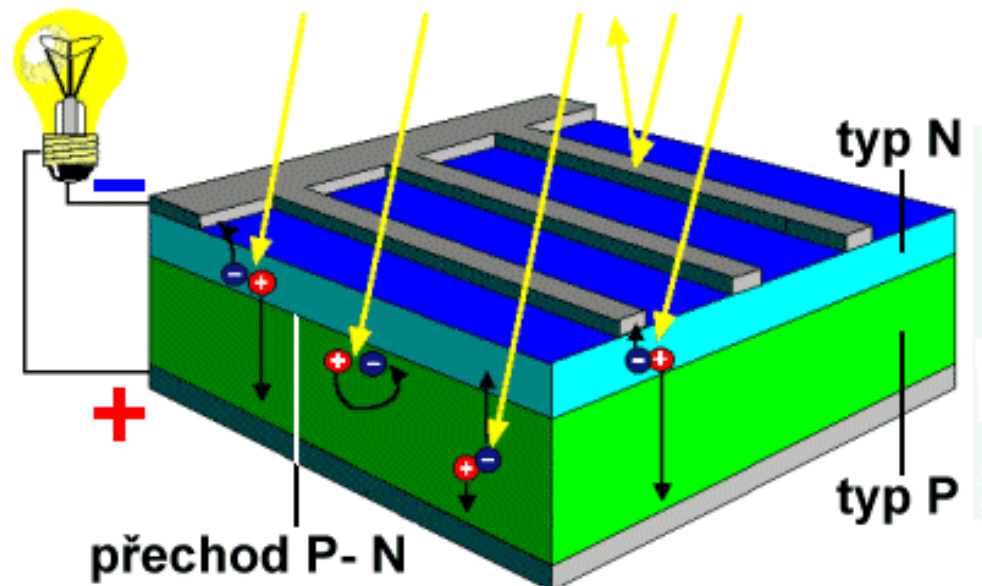


Obr. 2 – Struktura PN přechodu solárního článku (převzato z [4])

4.1 PN přechod

Přechodem PN je nazýván přechod mezi polovodiči s různou vodivostí. Polovodiče se dělí na vlastní a příměsové. Příměsové polovodiče jsou buď typu N (majoritní nosiče náboje jsou elektrony) nebo typu P (majoritní nosiče jsou díry). V okamžiku, kdy dojde ke spojení dvou odlišně dotovaných polovodičů, volné nosiče náboje se snaží uniknout z míst s vyšší koncentrací do míst s nižší koncentrací. Poté se vytvoří oblast prostorového náboje [4,5].

V případě, že na fotovoltaický článek nedopadá sluneční záření, tak je v rovnovážném stavu a ke generování náboje nedochází. (Obr. 2). Pokud ale začne záření, přesněji řečeno fotony na fotovoltaický článek dopadat, budou se generovat páry elektron – díra. Páry děr a elektronů jsou uvnitř PN přechodu elektrickým polem roztrženy. Uvolněné nosiče náboje jsou vedeny ve směru vnitřního pole. Polovodič typu P se nabíjí kladně a polovodič typu N záporně (Obr. 3) [4].



Obr. 3 – Princip PN přechodu (převzato z [4])

5 Solární články

Ve srovnání s ostatními dostupnými zdroji energie má solární energie řadu výhod i nevýhod.

Výhody

- Nevyčerpatelný zdroj energie
- Činností nevznikají škodlivé látky
- Bezhluchý provoz
- Snadná elektronická regulace

Nevýhody

- Nízká průměrná roční intenzita záření
- Použití jen ve dne
- Nízká účinnost přeměny energie

[4]

5.1 Druhy solárních článků

V dnešní době jsou v solární energii nejpoužívanější tři druhy solárních článků. Monokrystalické, polykrystalické a amorfní.

5.1.1 Monokrystalický solární článek

U solárních článků je vyžadována vysoká úroveň čistoty křemíku. Výroba spočívá v přípravě monokrystalického ingotu. Monokrystal křemíku se vyrábí tažením z taveniny tzv. Czochralski-ho metodou. Tímto procesem je monokrystal zároveň čištěn od nečistot. Výsledkem je válcový ingot velmi čistého křemíku s určitou hodnotou koncentrace dotačních příměsí. Z monokrystalu se nařežou křemíkové desky, které jsou dále podrobeny difúzním nebo implantačním procesům, kterými jsou zaváděny příslušné přechody potřebné pro správnou funkci výsledného solárního článku. V současné době mají monokrystalické solární články účinnost až 24,2 % [6].

5.1.2 Polykrystalický solární článek

Polykrystalické solární články jsou nejčastější, jelikož jsou nejméně nákladné. Výroba takového křemíku je realizována roztavením křemíku a jeho postupným

ochlazováním. Výsledné ingoty mají čtvercový tvar. Účinnost je vlivem rekombinačních ztrát nižší než u monokrystalického křemíku a to přibližně 20 % [23].

5.1.3 Amorfni solární článěk

Na rozdíl od předchozích typů článků mají amorfni články několik předností. Vyznačují se značnou flexibilitou, vysokou absorpcí světla a vysokým napětím naprázdno. Jejich nevýhoda je ovšem malá účinnost pohybující se kolem 7 %. Vrstvička křemíku nemá pravidelnou krystalickou strukturu a je zde zastoupen i vodík. Výkon amorfni článků zpočátku klesá a později se ustálí přibližně na 80 % z původní hodnoty [7].

5.1.4 Hybridni solární článěk

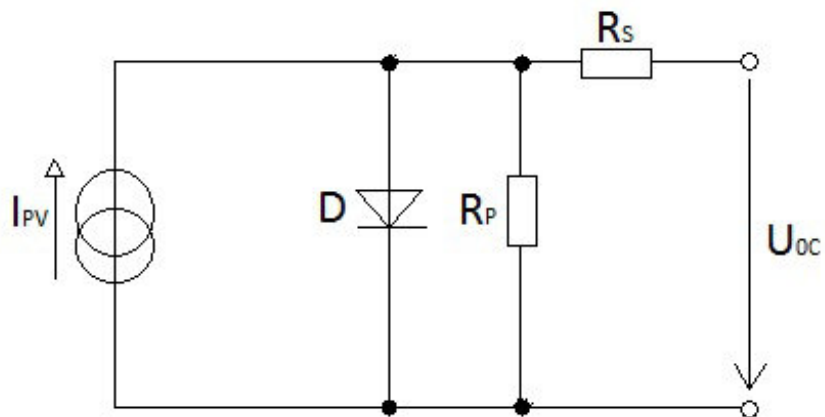
Nejnovějším trendem je tvorba hybridni křemíkových článků. Způsoby jejich výroby spočívají v kombinaci různých materiálů, aby bylo dosaženo vyšší účinnosti. Články mohou být tvořeny například nanesením vrstvy amorfniho křemíku na monokrystalický křemík. U nejnovějši solární článků se k vrstvám křemíku přidávají také nanovlákná. Účinnost takových článků by měla být mnohem vyšší než u předchozích typů. Požadavek je využití i infračerveného záření [11].

5.2 Parametry solární článků

Mezi základní parametry patří:

- Účinnost η udávající kolik procent dopadající sluneční energie je solární článěk schopen převést na elektrickou energii.
- Bod maximálního výkonu MPP
- Zkratový proud I_{SC}
- Napětí naprázdno U_{OC}
- Paralelní odpor R_P
- Sériový odpor R_S

Na níže uvedeném obrázku (Obr. 4) je znázorněno náhradní zapojení solárního článku.

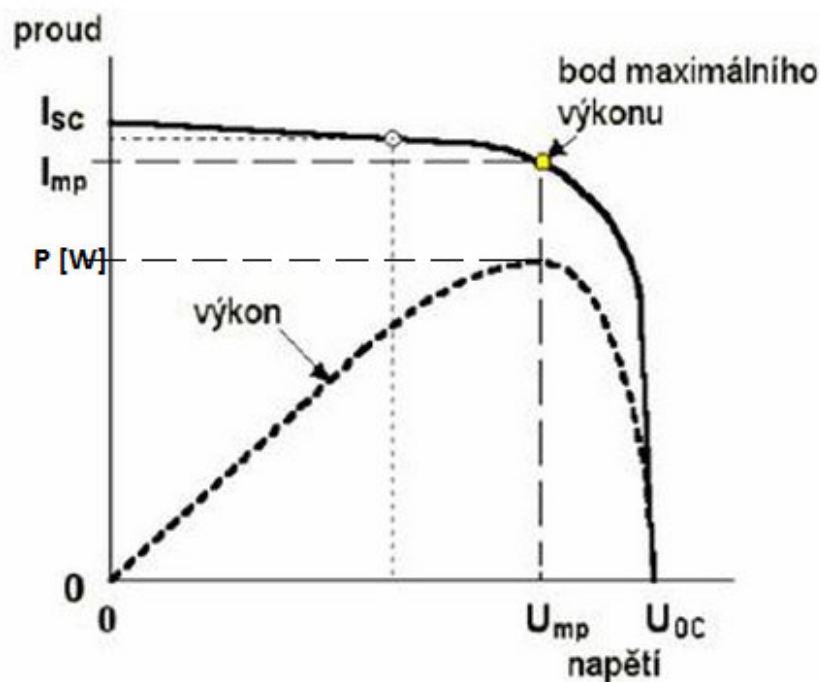


Obr. 4 – Náhradní schéma solárního článku

Solární článek je možné si představit jako zdroj proudu řízený intenzitou záření. Paralelní odpor neboli svodový odpor R_P reprezentuje poruchy uvnitř článku. Sériový odpor R_S udává elektrické ztráty [10].

5.2.1 Voltampérová charakteristika

Základní nástroj pro vyhodnocování parametrů solárních článků je VA charakteristika. Výkon je počítán jako součin proudu a napětí. Jeho hodnota je ovlivněna okolními vlivy, jako jsou: intenzita záření, teplota článku a spektrum světla. Na následujícím obrázku (Obr. 5) je vynesena voltampérová charakteristika společně s křivkou výkonu, která určuje bod maximálního výkonu [9]. Solární článek ne třeba zatěžovat, tak aby se zatěžovací přímka nacházela v pracovním bodě. Tím je dosaženo maximálního výkonu.



Obr. 5 - VA charakteristika (převzato z [9])

6 Superkondenzátor

Superkondenzátor je zařízení schopné akumulovat energii a poté velké množství energie odevzdat. Může se opakovaně nabíjet a vybíjet aniž by to mělo důsledky na jeho funkci, kapacitu a životnost. První superkondenzátor byl vyroben roku 1957 firmou “General Electric“. Cyklus nabíjení a vybíjení superkondenzátoru lze mnohonásobně opakovat (milion a vícekrát) [15, 16].

Výhody:

- Mnohonásobné nabíjení a vybíjení
- Vysoká životnost a účinnost
- Vysoká efektivita nabíjení
- Nízký vnitřní odpor

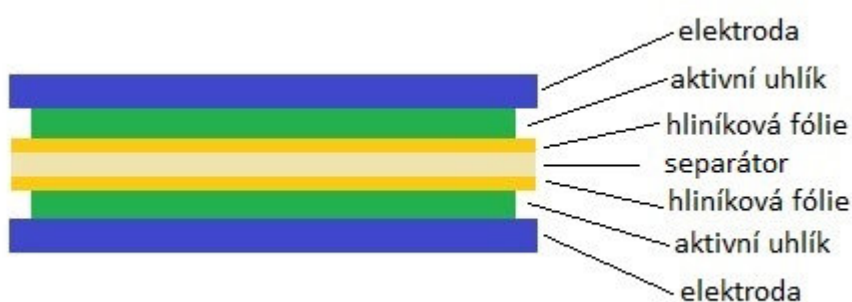
Nevýhody:

- Zatím nízký poměr uložené energie na váhu (vzhledem k akumulátorům)
- Nízká hodnota pracovního napětí

[15, 16]

6.1 Princip superkondenzátoru

Struktura superkondenzátoru (Obr. 6) se skládá z těchto částí: záporná a kladná elektroda z hliníkové fólie, dvě vrstvy aktivního uhlíku, separátor a elektrolyt. Když se superkondenzátor nachází v nenabitém stavu, jsou ionty rovnoměrně rozloženy mezi elektrodami. Pokud je na elektrody přiloženo napětí, začnou se ionty pohybovat ve směru od záporné elektrody ke kladné elektrodě. Na obou elektrodách je poté vytvořena dvouvrstva se zrcadlovým rozložením náboje [15, 16].



Obr. 6 – Struktura superkondenzátoru

7 Elektronické měniče napětí

Abychom využili intenzitu dopadajícího slunečního záření, musíme nastavit podmínky pracovního bodu, abychom dosáhli maximálního výkonu. To znamená, že solární článek je nutné vhodně zatěžovat, a to nejlépe pomocí elektronického měniče. Všechna fotovoltaická zařízení pracují se stejnosměrným napětím. Podle potřeby se ve fotovoltaice používají jak měniče ze stejnosměrného napětí na střídavé napětí, tak měniče ze stejnosměrného napětí na požadovanou hodnotu stejnosměrného napětí.

Cíl je navrhnout a realizovat DC/DC měnič, který bude schopen pracovat s různými hodnotami vstupního napětí, které poskytuje solární panel. Zároveň má dodávat hodnotu výstupního napětí takovou, aby bylo možné nabíjet superkondenzátory různých kapacit.

7.1 Teorie DC/DC měničů

DC/DC měniče jsou samostatná skupina zdrojů. Oblast konstrukce a použití DC/DC měničů je velmi široká. Základní hledisko je výstupní výkon měniče, ten z části určuje konstrukci měniče i oblast jeho nasazení. Měniče mající výstupní výkon okolo 10 W bývají konstruovány jako obvody určené pro montáž na plošné spoje. Jejich výkon je dán jejich účinností a rozptýlením výkonu při zahřívání pouzdra [12].

Skupina těchto měničů je dělena podle principu činnosti na:

- Měniče s lineárními obvody, které obsahují lineární stabilizátory a jsou možné použít jen pro snižování vstupního napětí. Vstup je galvanicky spojen s výstupem. Nevýhoda je malá účinnost kvůli lineárním stabilizátorům, protože se zahřívají.
- Měniče bez indukčnosti neboli měniče se spínanými kondenzátory. Ve většině případů se skládají z integrovaných obvodů v kombinaci s pasivními součástkami. Mezi vstupem a výstupem je opět galvanické propojení. Mohou generovat i více výstupních napětí najednou.
- Měniče s indukčností jsou konstruovány jako typické spínané zdroje. Mají vysokou účinnost a mohou být využívány pro snižování i zvyšování napětí nebo jako invertující měnič. Vstup a výstup je propojen galvanicky a výstupní napětí může být pouze jedno. Z jednoho výstupního napětí lze ovšem získat více nižších napětí, například pomocí zpětnovazebních stabilizátorů.
- Měniče s transformátory jsou skupina nejvíce vyrábějících se obvodů. Mají galvanicky izolovaný výstup od vstupu. Vyznačují se množstvím kombinací výstupních napětí [12].

7.1.1 Základní parametry

Vstupní parametry

- **Účinnost**

Je definována jako poměr výstupního výkonu P_{out} a vstupního příkonu P_{in} .

$$\eta = P_{out} \cdot \frac{100}{P_{in}} \quad (2)$$

- **Pojistka**

Omezuje vstupní příkon a snižuje riziko, že se měnič poškodí.

- **Vstupní napět'ový rozsah**

Udává rozmezí minimálního a maximálního vstupního napětí, při kterém měnič pracuje podle specifikací v katalogovém listu.

- **Vstupní proud**

Je daná hodnota vstupního proudu tekoucí do měniče při dané hodnotě vstupního napětí při zcela zatíženém výstupu měniče.

- **Maximální hodnota vstupního přepětí**

Je taková hodnota vstupního napětí, která může být přivedena na vstup měniče, aniž by ho poškodila.

- **Spínací kmitočet**

Je hodnota základního kmitočtu, na kterém měnič pracuje.

- **Doba sepnutí**

Doba periody spínaného průběhu se dělí na dobu sepnutí a dobu rozepnutí. [12]

Výstupní parametry

- **Převodní charakteristika**

Je graf závislosti výstupního napětí DC/DC měničů na hodnotě vstupního napětí. Graf udává, o kolik procent se mění výstupní napětí při změně vstupního napětí.

- **Zatěžovací charakteristika**

Při konstantním vstupním napětí je výstupní napětí funkcí výstupního proudu. Tato charakteristika obsahuje křivky, které popisují měnič ve všech možných kombinacích jeho činnosti.

- **Odezva na změnu**

Je doba, za kterou se výstupní napětí ustálí na hodnotě specifikované přesnosti vzhledem ke jmenovité hodnotě výstupního napětí po změně výstupního proudu.

- **Výstupní zvlnění**

Výstupní napětí měniče obsahuje společně se stejnosměrnou složkou napětí také střídavou složku periodickou a neperiodickou. První příčina výstupního zvlnění jsou zbytky po zvlnění vstupního napětí frekvencí 50 Hz nebo 100 Hz. Druhou příčinu lze zlepšovat přidávanými kondenzátory.

- **Přepět'ová ochrana**

U měničů s indukčností dochází k napět'ovému překmitu na cívce nebo transformátoru. Tento překmit může poškodit spínací tranzistory a může se i dostat na výstup měniče, kde je schopen poškodit připojené zařízení. Výstup měniče a napájené obvody by měly být chráněny použitím bezindukčních keramických kondenzátorů.

- **Teplotní součinitel výstupního napětí**

Je udáván jako změna výstupního napětí se změnou provozní teploty o jeden Kelvin.

- **Výstupní napětí**

Je nominální hodnota výstupního napětí při nominální hodnotě vstupního napětí a nominální hodnotě zatěžovacího výkonu. [12]

Grafické závislosti DC/DC měničů

$$I_{IN} = f(U_{IN})$$

Křivky výstupního proudu jsou konstantní a ilustrují, jak se vstupní proud mění s hodnotou vstupního napětí.

$$R_{OUT} = R_i = f(f)$$

Vnitřní odpor měniče lze měřit stejnosměrně i při zatížení proměnným výstupním proudem. Tomuto zatěžování pak odpovídá střídavý pokles výstupního napětí a jejich podílem je střídavý výstupní odpor měniče, který lze měřit v závislosti na kmitočtu změn.

$$U_{OUT2} = f(I_{OUT1})$$

Pokud má měnič více výstupních napětí, tak je sledován vliv změn druhého výstupního napětí na změně prvního zatěžovacího proudu. Tento jev se nazývá křížová regulace.

$$\eta = f(U_{IN})$$

Při změně velikosti vstupního napětí se mění pracovní body součástek a dochází ke změnám jejich proudů a účinnosti měniče. Tyto charakteristiky se udávají pro 50 % a 100 % jmenovité výstupní zátěže.

$$\eta = f(I_{OUT})$$

Při změně výstupního proudu dochází k výrazným změnám proudů interních součástek měniče a mění se tak i účinnost.

$$I_{IN0} = f(U_{IN})$$

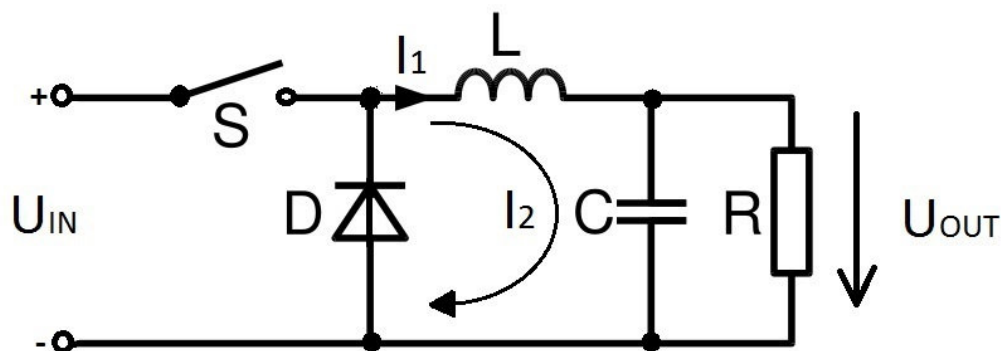
Charakteristika, která udává vstupní proud měniče v závislosti na vstupním napětí bez zatížení měniče. [12]

7.2 Základní zapojení DC/DC měničů

Na základě požadavků pro tvorbu měniče a parametrů jsou uvedeny možné zapojení DC/DC měničů pomocí externích součástek.

7.2.1 Snižující měnič (Buck)

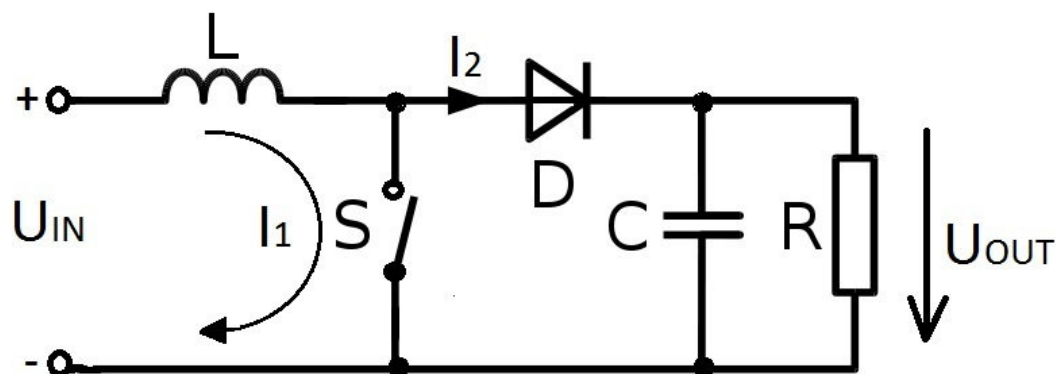
Je zapojení DC/DC měniče, který z vyšší hodnoty vstupního napětí vytvoří nižší výstupní napětí. Nejjednodušší způsob jak snížit hodnotu vstupního napětí je použití lineárního regulátoru. Tyto regulátory, ale mají velmi nízkou účinnost a ztrácejí mnoho energie ve formě tepla. Snižující měniče se ovšem dají vytvořit tak, aby jejich účinnost byla 95 % a více. Jsou to řídicí spínané měniče s indukčností (Obr. 7). Patří do třídy spínaných napájecích zdrojů obsahujících alespoň dva polovodičové spínače (dioda, tranzistor) a alespoň jeden prvek pro ukládání energie (kondenzátor, cívka). K výstupu měniče se přidávají filtrační kondenzátory kvůli snížení výstupního zvlnění [13, 14].



Obr. 7 – Schéma zapojení snižujícího měniče

7.2.2 Zvyšující měnič (Boost)

Měnič s výstupním napětím vyšším než je hodnota jeho vstupního napětí (Obr. 8). Obsazení součástek je totožné jako u předchozího snižujícího zapojení [13].



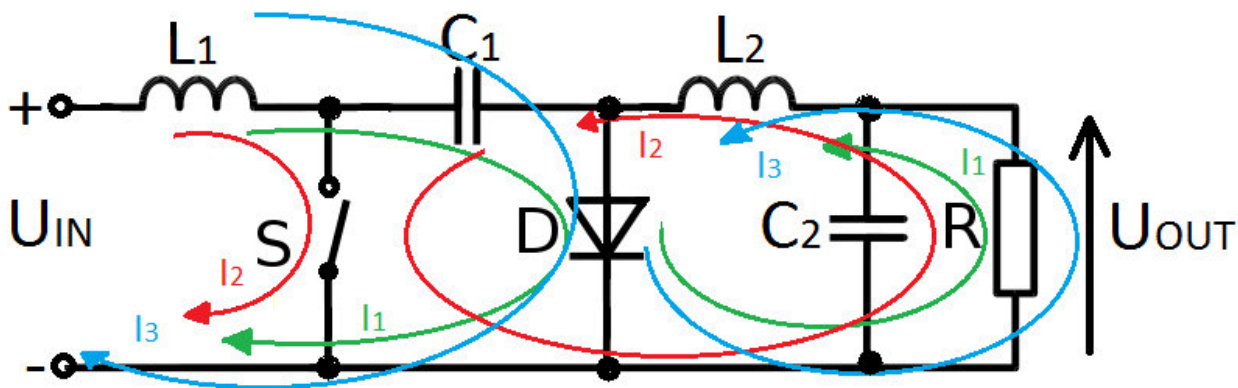
Obr. 8 – Schéma zapojení zvyšujícího měniče

7.2.3 Zvyšující a snižující měnič (Buck-Boost)

Je to typ DC-DC měniče, který má velikost výstupního napětí nižší nebo vyšší než je hodnota vstupního napětí. Využívají se dva typy topologií těchto měničů. Oba tyto typy mohou produkovat rozsah výstupního napětí, a to od napětí téměř nulového až do mnohem vyššího hodnoty napětí [13].

a) Zvyšující a snižující měnič (Cuk)

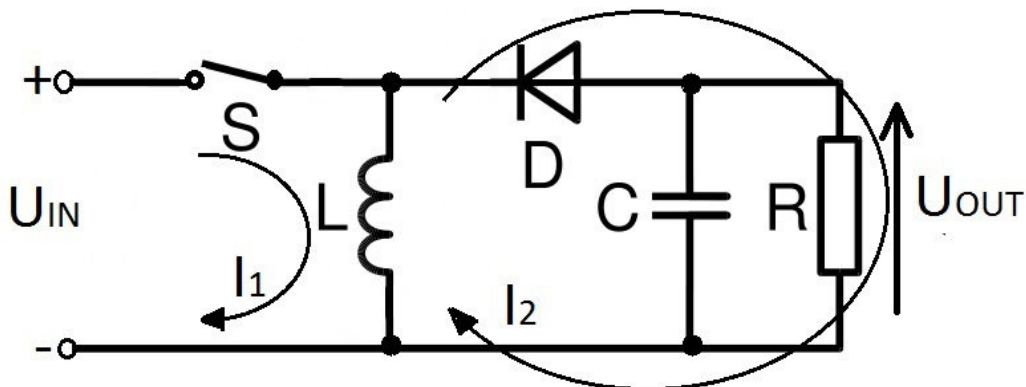
Jedná se o typ měniče, který má hodnotu výstupního napětí vyšší nebo nižší než je hodnota napětí na vstupu. Měnič má opačnou polaritu napětí mezi vstupem a výstupem. Jedná se o složitější zapojení, které se využívá v případech kdy je hodnota vstupního napětí nejdříve vyšší a pak nižší než hodnota výstupního napětí. Zapojení je znázorněno na následujícím obrázku (Obr. 9), kde jsou tři různé barvy pro proudy ve třech intervalech. Zelená barva znázorňuje tekoucí proud v případě rozepnutého spínače, červená je pro případ sepnutého spínače a modrá představuje proud v době dalšího rozepnutí spínače [12].



Obr. 9 – Schéma zapojení zvyšujícího i snižujícího měniče

b) Invertující měnič

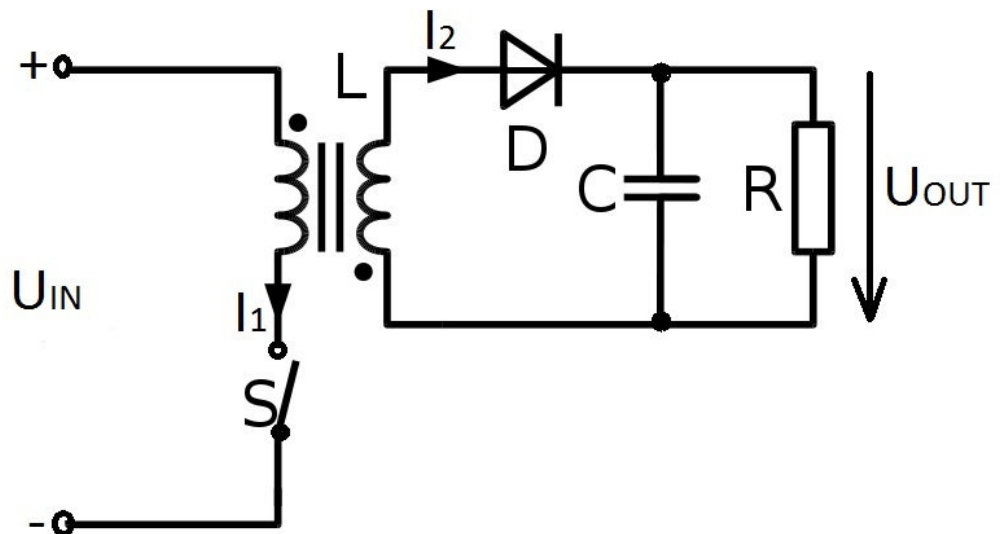
Výstupní hodnota napětí je opačné polarity, než je hodnota vstupního napětí. Jedná se o spínaný zdroj, který se zapojením podobá snižujícímu i zvyšujícímu měniči. Výstupní napětí je nastavitelné na základě pracovního cyklu spínacího tranzistoru. Zapojení (Obr. 10) lze realizovat velmi jednoduše [12, 13].



Obr. 10 – Schéma zapojení invertujícího měniče

7.2.4 Akumulující měnič (Flyback)

Akumulující měnič (Obr. 11) se používá jak pro převod napětí AC/DC tak DC/DC s galvanickým oddělením mezi vstupem a veškerými výstupy. Hodnota výstupního napětí může být vyšší i nižší než hodnota vstupního napětí. Teče-li primárním vinutím proud, je sekundární vinutí polarizováno vzhledem k polaritě výstupní diody tak, že proud neteče. Energie se ukládá v poli transformátoru a ve chvíli, kdy přestane téci proud primárním vinutím, začne téct proud sekundárním vinutím. Primární i sekundární vinutí jsou navinuty stejným směrem. Když teče proud primárním vinutím při sepnutí tranzistoru T, nemůže téci proud současně sekundárním vinutím. Dioda je polarizována závěrně. Nevýhoda je omezený rozsah výstupního výkonu a nutnost ochrany tranzistoru proti průraznému napětí [12, 14].



Obr. 11 – Schéma zapojení akumulujícího měniče

8 Měnič k solárnímu panelu

Pro účel požadovaného měniče jsou vhodné malé solární panely, jejichž napětí naprázdno bývá v rozsahu 100 mV – 12 V. Je důležité brát v úvahu, že intenzita slunečního záření se mění v závislosti na počasí, čase a na ročním období. Proto funkčnost měniče nesmí být omezována v případě, že solární panel dodává i méně než 50 % své maximální energie. Pro co největší využití energie solárního panelu je vhodné použití paralelně zapojeného kondenzátoru. Kondenzátor s dostatečnou kapacitou je pak nabíjen a vybíjen v závislosti na spínání měniče.

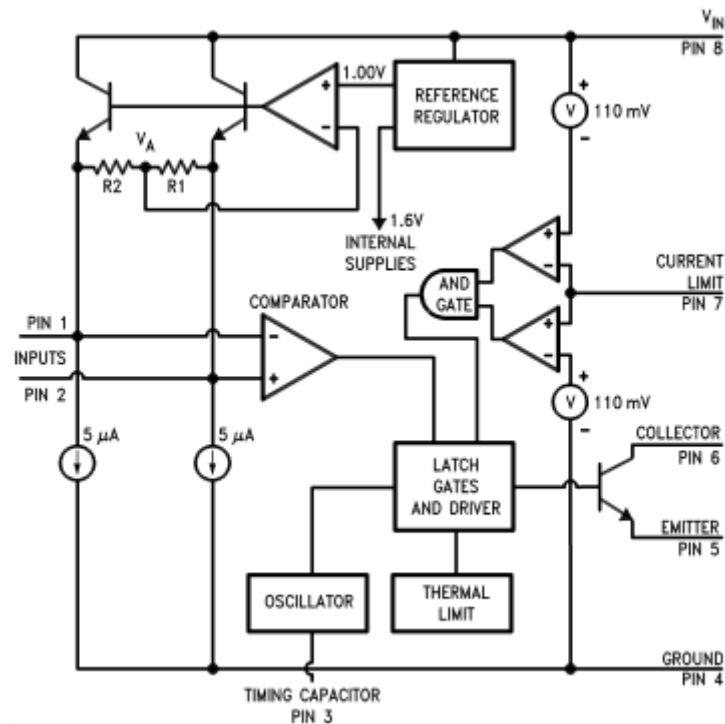
Volba zapojení vhodného měniče k malým solárním panelům je poněkud obtížná. Jak řídicí integrované obvody pro měniče, tak integrované obvody celých měničů fungují pro různé rozsahy vstupního napětí. Většina měničů vhodných pro malé solární články, pracuje buď na velmi nízkých hodnotách vstupního napětí, které dokáží napětí zvyšovat, nebo v rozsahu jednotek až desítek voltů, které je měnič schopen jak zvyšovat, tak snižovat. Tuto skutečnost je možné vyřešit dvěma měniči. Jedním, který by napětí dodávané solárním panelem zvyšoval od velmi nízkých hodnot, a druhým, který by fungoval jako snižující i zvyšující měnič. Výstupní hodnoty napětí musí být takové, aby s nimi dokázali pracovat superkondenzátory. Superkondenzátory větších kapacit (stovek faradů) mají maximální dovolené pracovní napětí 2,5 V – 3 V. Pokud by došlo při nabíjení k překročení dovolené hodnoty napětí, došlo by ke zničení superkondenzátoru. Výstupní hodnota napětí měničů by měla být maximálně 2,5 V, aby je bylo možné použít pro různé superkondenzátory, aniž by došlo k jejich destrukci.

8.1 Řešení vhodného DC/DC měniče

Integrovaných obvodů, které se dají použít jako spínané zdroje je velká škála. Zde jsou znázorněny vlastnosti a parametry třech vybraných.

8.1.1 Obvod LM2578A

Uvnitř obvodu jsou implementovány veškeré důležité prvky pro činnost DC-DC měniče s vynaložením co nejmenšího počtu externích součástek. Obvod je vybaven vnitřním komparátorem, který má vyveden jak invertující, tak neinvertující vstup na přívody pouzdra a navíc obsahuje referenční napětí o hodnotě 1 V pro každý vstup. Obvod je schopen spínat proud až do hodnoty 750 mA. Obvod (Obr. 12) lze zapojit jako snižující, zvyšující, invertující a akumulující měnič a pracuje s hodnotami vstupního napětí 2 V – 40 V. Integrovaný obvod vyrábí firma Texas Instruments [17].



Obr. 12 – Vnitřní schéma zapojení obvodu LM2578A (převzato z [17])

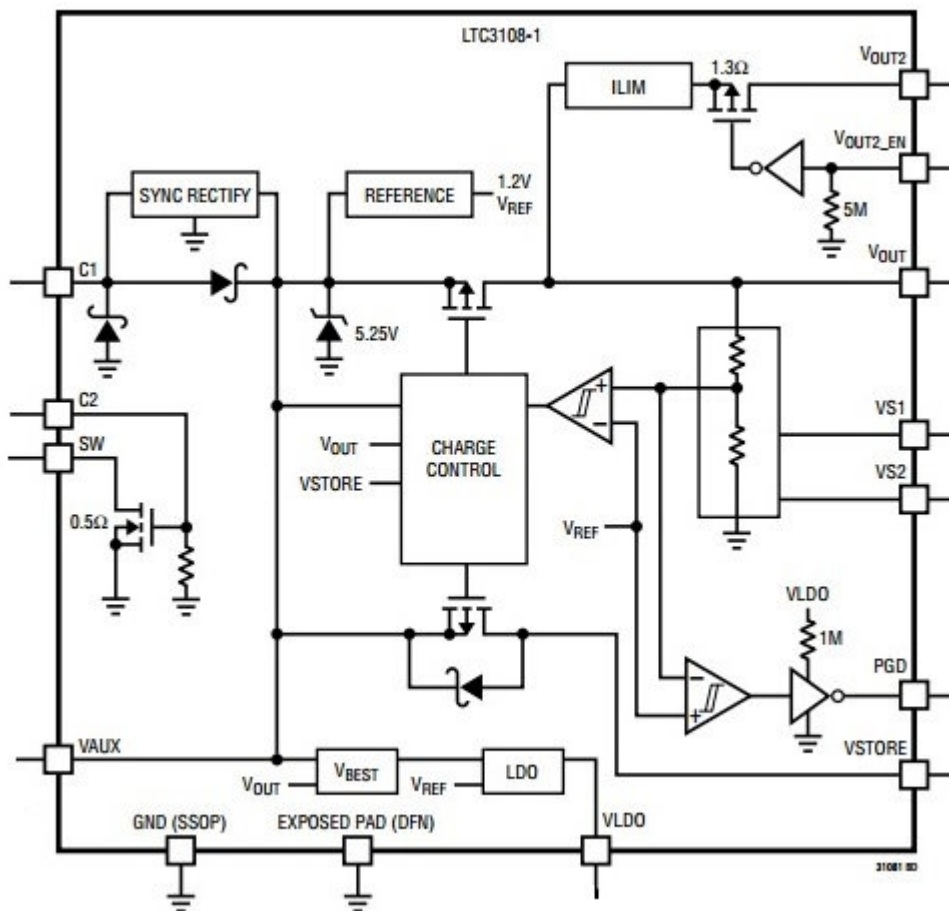
8.1.2 Obvod LTC3108-1

LTC3108-1 (Obr. 13) vyráběný firmou Linear Technology slouží jako zvyšující měnič pracující od velice nízkého vstupního napětí, získaném například z alternativních zdrojů jako jsou malé solární články a termoelektrické generátory [18].

Základní vlastnosti LTC3108-1

- Pracující již od vstupního napětí 20 mV
- Volitelné výstupní napětí: 2,5 V, 3 V, 3,7 V, 4,5 V
- Integrovaný LDO výstup poskytující napětí 2,2 V
- Kontrolní logický výstup
- Indikace stavu Power Good
- Využívání Step-Up transformátoru
- Dostupný v provedení DFN-12 (4x4mm) nebo SSOP-16

[18]



Obr. 13 – Vnitřní schéma zapojení obvodu LTC3108-1 (převzato z [18])

Princip činnosti

Oscilátor

LTC3108-1 využívá MOSFET spínač, který slouží jako step-up oscilátor pomocí externího step-up transformátoru. To umožňuje zvýšit nízkou hodnotu vstupního napětí na dostatečně vysokou hodnotu napětí. Frekvence kmitání je určena sekundárním vinutím transformátoru a typicky bývá v rozsahu 10 kHz až 100 kHz [18].

Usměrňovač

Sekundární napětí vytváří střídavé napětí, které je v integrovaném obvodu usměrněno. Usměrňovací obvod poskytuje napájení kontaktu VAUX a dalších výstupů [18].

VAUX

Přes vývod V_{AUX} jsou napájeny vnitřní aktivní obvody. Výstup by měl být přemostěn kondenzátorem o kapacitě 1 μ F. Větší hodnoty externího kondenzátoru se používají, pokud se změní poměr transformátoru například na 1 : 20. Jakmile napětí na pinu VAUX přesáhne 2,5 V, tak je hlavnímu výstupu povolen start nabíjení [18].

LDO (Low Dropout Linear Regulator)

LTC3108-1 poskytuje výstup s pevným napětím 2,2 V. Tento výstup bývá využíván pro napájení procesorů s nízkou spotřebou nebo jiných obvodů [18].

V_{OUT}

Vývod pro výstupní napětí je nabíjen z pinu V_{AUX} . Hodnotu výstupního napětí lze regulovat pomocí regulačních pinů VS1 a VS2 (Tab. 1) Jakmile hodnota výstupního napětí dosáhne nastavené hodnoty, proud klesne na nulovou hodnotu [18].

VS2	VS1	V _{OUT} [V]
GND	GND	2,5
GND	VAUX	3
VAUX	GND	3,7
VAUX	VAUX	4,5

Tab. 1 – Možnosti regulace výstupního napětí LTC3108-1 (převzato z [18])

Realizace

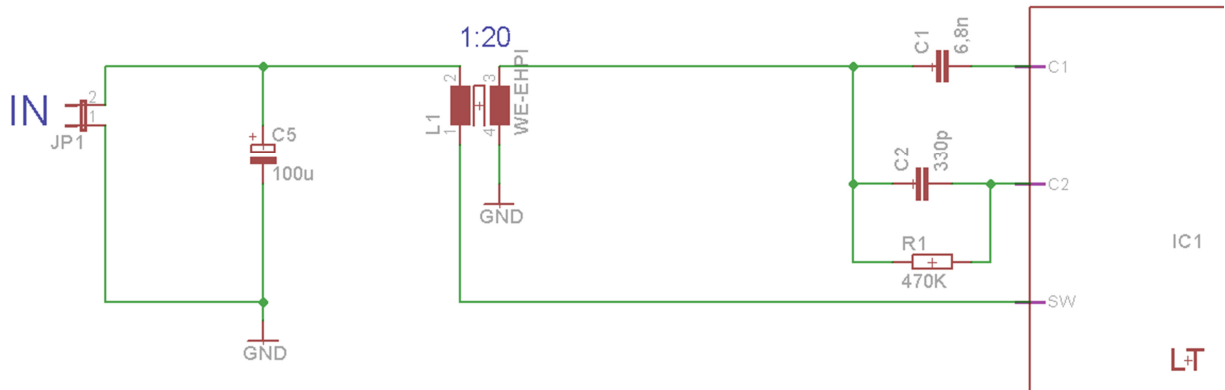
Jak už bylo popsáno, tento měnič má fungovat jako zvyšující měnič od velmi nízkých hodnot vstupního napětí, které by dodával solární panel. Hodnoty vstupního napětí mohou být řádově desítky až stovky milivoltů. To je ovlivněno typem zapojení zvyšujícího transformátoru na vstupní části měniče (Obr. 14).

Zvyšující transformátor určuje hodnotu napětí na vstupu měniče. Pokud je v zapojení použit transformátor s transformačním poměrem 1 : 100, je měnič schopen pracovat v rozsahu napětí získaného ze solárního panelu od 20 mV do 500 mV. V případě menších transformačních poměrů se logicky zvyšují hodnoty vstupního napětí, na kterých je celé zařízení schopno pracovat. Další faktory, které ovlivňují výkon, jsou odpor a indukčnost vinutí. Indukčností sekundárního vinutí je určena rezonanční frekvence oscilátoru podle vzorce

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{sec}C}} \text{ [Hz]} \quad (3)$$

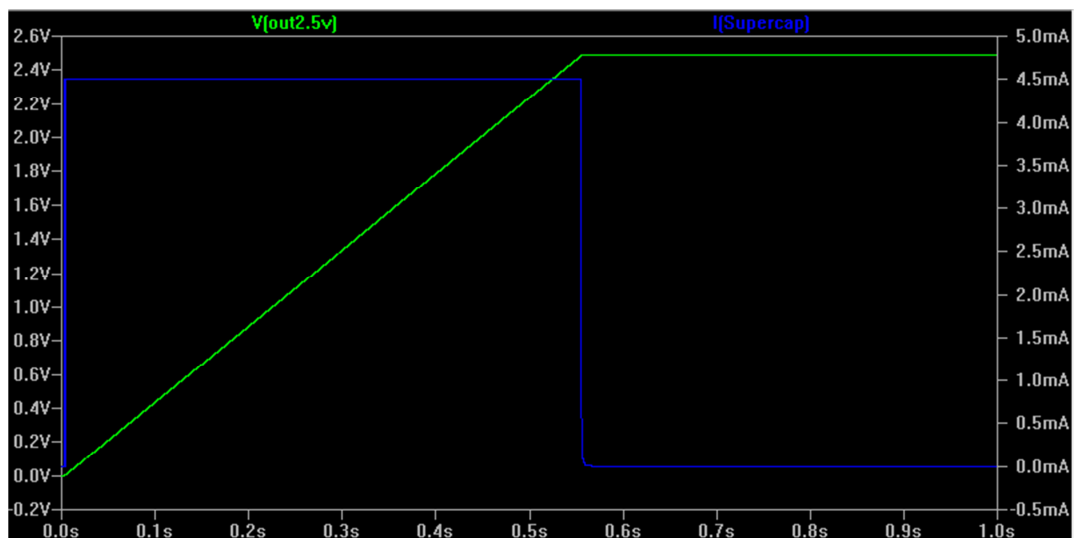
kde L je indukčnost sekundárního vinutí a C je zatěžovací kapacita vinutí. Kapacitou je myšlen kondenzátor připojen k pinu C2, který má typicky kapacitu stovek pF. Doručená rezonanční frekvence je v rozsahu od 10 kHz do 100 kHz. Kondenzátor nábojové pumpy, který je připojen ze sekundárního vinutí k pinu C1, má vliv na vstupní odolnost měniče a maximální proudové zatížení. Minimální hodnota by měla být 1 nF při použití transformátoru s poměrem 1 : 100. Příliš velká kapacita může ohrozit výkon při práci s nízkým vstupním napětím. Použitím transformátoru s menším transformačním poměrem lze kapacitu kondenzátoru C1 zvýšit v řádech jednotek nF. Paralelně připojený odpor ke

kondenzátoru C2 je jakási pojistka pro případ, že by nastal tzv. squegging. Tento jev nastává v případě, že se zastavuje kmitání oscilátoru na mnohem delší dobu, než je doba oscilace [18].



Obr. 14 - Zapojení vstupní části měniče LTC3108-1

Výstupní hodnota napětí je nastavena na 2,5 V. Superkondenzátor připojený na výstup je lineárně nabíjen. V okamžiku, kdy hodnota napětí na superkondenzátoru dosáhne 2,5 V, napětí se ustálí a zdroj proudu se vypne (Obr. 15). Využitelný je také výstup LDO o hodnotě napětí 2,2 V.



Obr. 15 – Průběh výstupních parametrů v simulačním programu LTspice (LTC3108-1)

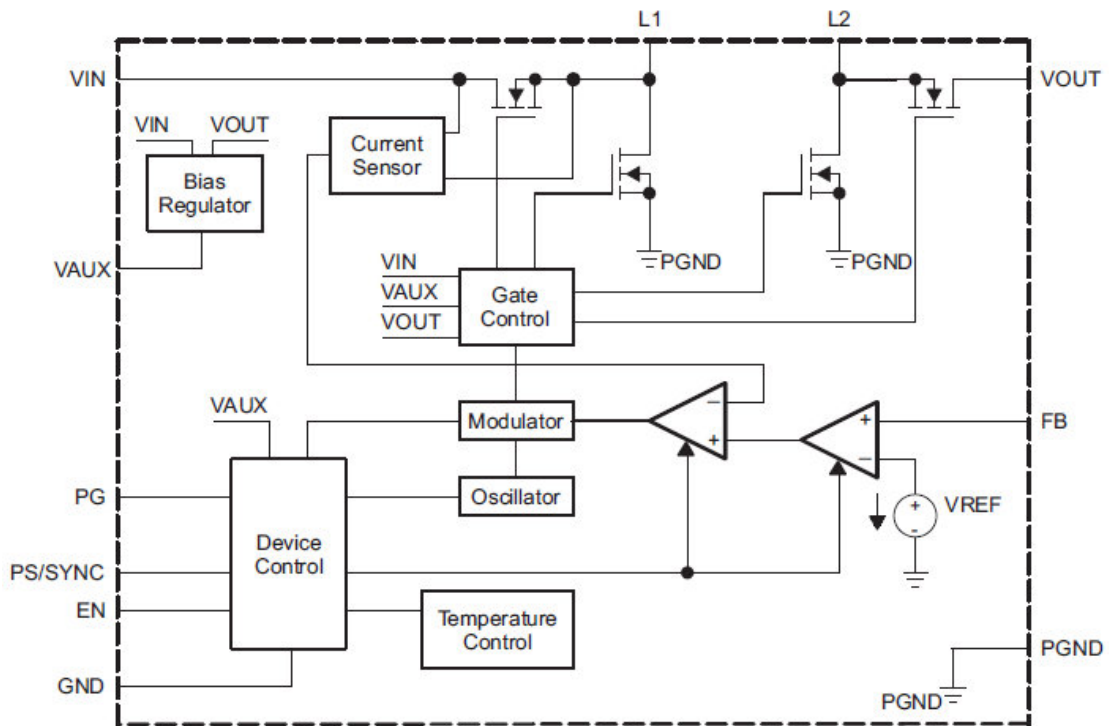
8.1.3 Obvod TPS63060

TPS63060 (Obr. 16) je novější a modernější verze měniče LM2578A a také je vyráběn firmou Texas Instruments. Zvyšující a snižující měnič pracuje na pevné frekvenci. Pulsní šířková modulace (PWM) reguluje pomocí synchronní rektifikace maximální účinnost. Při nízkých proudech zátěže přejde měnič do úsporného režimu, aby udržoval vysokou účinnost v širokém rozsahu zatížení proudu. Úsporný režim lze vypnout a měnič poté pracuje na pevné spínací frekvenci. Maximální průměrný proud spínače je typicky 2,25 A. Výstupní napětí je volitelné pomocí externího děliče napětí nebo pevně uvnitř čipu [19].

Základní vlastnosti TPS63060

- Účinnost až 93 %
- Výstupní proud 2 A / 1 A při hodnotě napětí 5 V ve snižujícím režimu
- Výstupní proud 1,3 A při hodnotě napětí 5 V ve zvyšujícím režimu ($U_{IN} > 4$ V)
- Automatické přepínání mezi snižujícím a zvyšujícím režimem
- Hodnota vstupního napětí 2,5 V – 12 V
- Hodnota výstupního napětí 2,5 V – 8 V
- Úsporný režim pro lepší účinnost při nízkém výstupním výkonu
- Pevná spínací frekvence 2,4 MHz s možností synchronizace
- Power Good výstup
- Teplotní a napěťová ochrana

[19]



Obr. 16 – Vnitřní schéma zapojení obvodu TPS63060 (převzato z [19])

Princip činnosti

Regulační obvod je založen na průměrování proudu v daném režimu měniče. Změny vstupního a výstupního napětí jsou monitorovány a v důsledku se zjištěním odchylky od U_{REF} se dosáhne změny pracovního cyklu v modulátoru. Chyba napětí je poskytována pinem FB. Vývod FB musí být připojen k děliči napětí. Obvod používá čtyři tranzistory MOSFET pro udržení synchronní konverze energie. V důsledku jejich použití je dosažení vysoké účinnosti měniče [19].

Snižující a zvyšující režim

Aby bylo možné regulovat hodnotu výstupního napětí v závislosti na všech možných kombinacích vstupního napětí, přístroj přepíná ze snižujícího režimu na zvyšující měnič a obráceně. Vždy je v činnosti jeden aktivní přepínač, jeden usměrňovací spínač, jeden spínač trvale sepnutý a další trvale vypnutý. Proto je ve snižujícím režimu na výstupu menší hodnota napětí než na vstupu a při zvyšujícím režimu vyšší hodnota napětí než na vstupu.

Neexistuje žádný režim, kdy by byly všechny spínače sepnuté. Ovládání přepínačů ovlivňuje konvertor udržující vysokou účinnost [19].

Realizace

Zařízení s měničem TPS63060 má za úkol zvyšovat a snižovat vstupní napětí v rozsahu 2,5 V – 8 V. Při návrhu je v první řadě volba induktoru. Pro dosažení vysoké účinnosti by induktor měl mít nízký odpor kvůli minimalizaci ztrát vodivosti. Zejména při vysoké spínací frekvenci může docházet ke snížení účinnosti. Při použití malých tlumivek se účinnost snižuje hlavně v důsledku vyšších ztrát v jádře. Hodnota induktoru určuje zvlnění proudu. Čím větší je hodnota indukčnosti, tím menší je zvlnění proudu na induktoru a nižší vodivostní ztráty měniče. Aby se zabránilo saturaci, lze vypočítat maximální proud v ustáleném provozu [19].

$$I_{OUT} = \eta I_{sw}(1 - D) \quad (4)$$

D je pracovní cyklus zvyšujícího režimu je možné ho zjistit následujícím vztahem.

$$D = \frac{U_{OUT} - U_{IN}}{U_{OUT}} \quad (5)$$

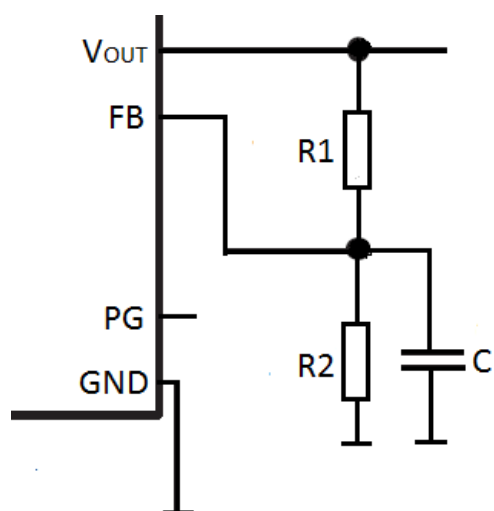
Další vztah udává maximální proud na výstupu.

$$I_{max} = \frac{I_{OUT}}{\eta(1-D)} + \frac{U_{IN}D}{2fL} \quad (6)$$

Spínací frekvence měniče je typicky 2,4 MHz. Ve většině případů je použitý induktor s indukčností 1 μ H – 1,5 μ H [19].

Výstupní napětí je nastaveno napět'ovým děličem (Obr. 17). Odporový dělič musí být připojen na kontakty V_{OUT} , FB a GND. Hodnota napětí na vývodu FB je 500 mV. Hodnota proudu by měla být asi 100 krát větší než je hodnota proudu na pinu FB, která je 0,01 μ A. Doporučená hodnota odporu R2 je nižší než 500 k Ω . Zbývající odpor R1 lze zjistit vztahem

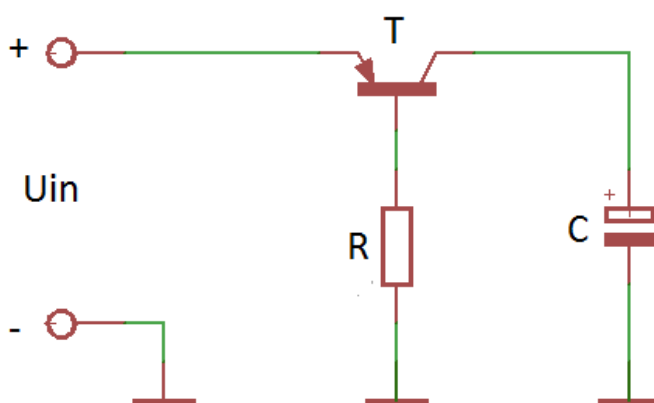
$$R1 = R2 \left(\frac{U_{OUT}}{U_{FB}} - 1 \right) \quad (7)$$



Obr. 17 – Schéma zapojení děliče k výstupní části TPS63060

Paralelně připojený kondenzátor k odporu R2 je využit v případě, kdy se měnič nachází v úsporném režimu. Filtruje a zlepšuje účinnost při nízkém zatížení [19].

Pro nabití superkondenzátorů je však vhodný zdroj proudu, a to v takovém provedení, aby v okamžiku dosažení požadované hodnoty napětí byl tento zdroj vypnut, jinak by došlo ke zničení superkondenzátoru. Důvod využití konstantního zdroje proudu je rychlejší nabíjení superkondenzátoru. Proudový zdroj je navržen pomocí PNP tranzistoru (Obr.18).



Obr. 18 – Schéma zapojení proudového zdroje

Abychom zjistili dobu nabití superkondenzátoru, je třeba nejdříve spočítat proud tekoucí rezistorem.

$$I_B = \frac{U_{cc} - U_{BE}}{R} \quad (4)$$

Poté je možné spočítat kolektorový proud.

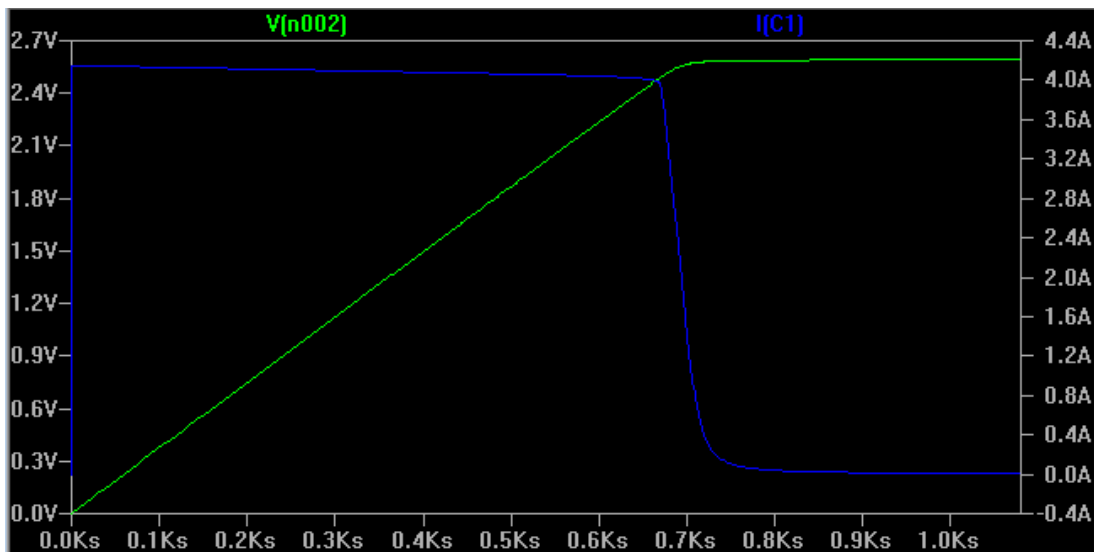
$$I_C = \beta I_B \quad (5)$$

Tímto proudem je nabíjen superkondenzátor na hodnotu napájecího napětí. Dobu, za kterou se superkondenzátor nabije lze vypočítat jako

$$t = \frac{CU_{cc}}{I_C} \quad (6)$$

Superkondenzátory jsou konstruovány pro nízké hodnoty napětí, proto je nutné, správně nastavit hodnotu napětí, na kterou se mají nabíjet v případě, že vstupní napětí zdroje proudu je vyšší. To je možné vyřešit zapojením děliče napětí. Dále je zapojení obohaceno NPN tranzistorem, který slouží jako spínač proudového zdroje pro případ, kdy je superkondenzátor nabitý [21].

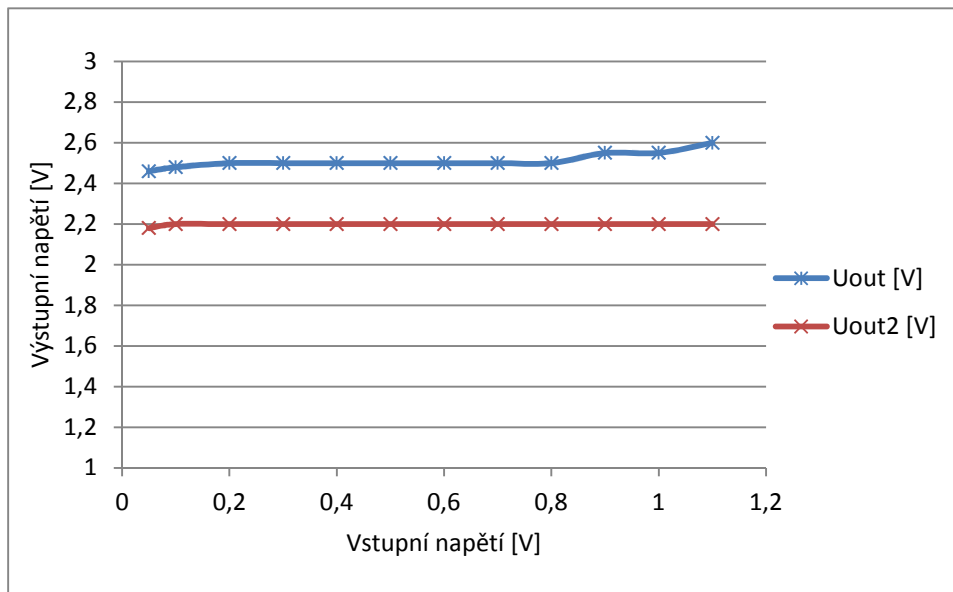
Zapojením měniče s obvodem TPS63060 a uvedeného proudového zdroje je dosaženo požadovaného průběhu napětí a proudu na superkondenzátoru (Obr. 19).



Obr. 19 - Průběh výstupních parametrů v simulačním programu LTspice (TPS63060)

9.1.1 Ověřovací měření

Nejprve bylo provedeno měření závislosti výstupních napětí U_{OUT} a U_{OUT2} na hodnotě vstupního napětí (Obr. 21). Měření bylo provedeno s laboratorním zdrojem, kde byla zvyšována hodnota vstupního napětí. Proudové omezení zdroje bylo nastaveno na 200 mA. Snaha byla napodobit chování solárního článku. Naměřené hodnoty viz. Přílohy.

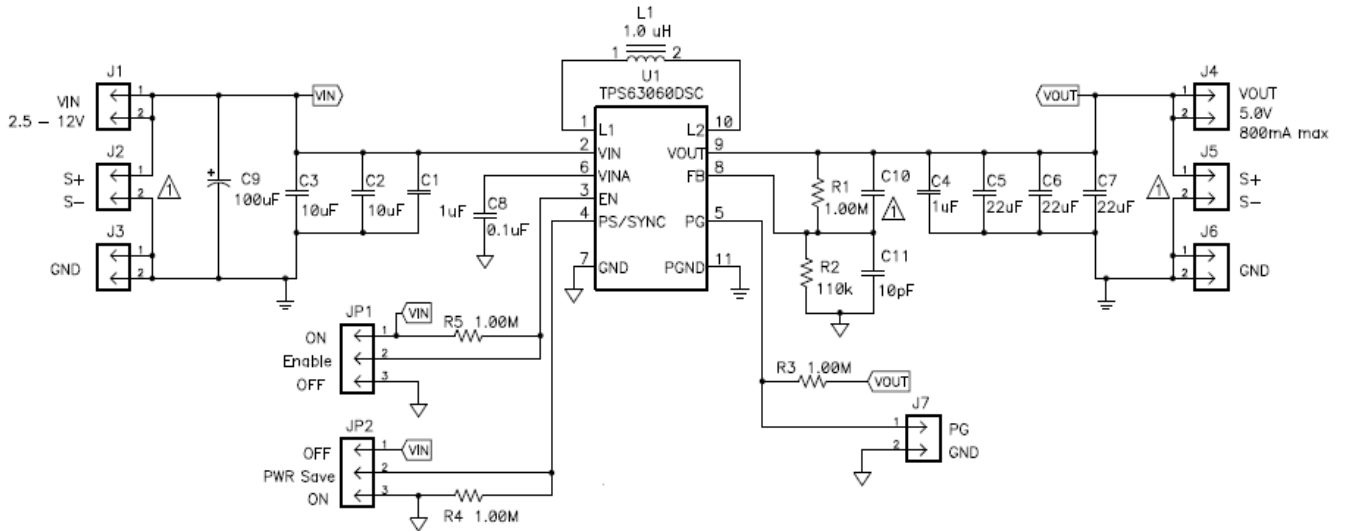


Obr. 21 – Časové průběhy výstupních napětí zvyšujícího měniče

Měnič správně pracuje od vstupní hodnoty napětí 50 mV. Až do hodnoty 1 V je průběh výstupního napětí U_{OUT} téměř konstantní. Pokud hodnota vstupního napětí přesáhne 1 V, výstupní napětí se začne zvyšovat. Hodnota napětí U_{OUT2} je podle předpokladu stále 2,2 V, protože je řízena vnitřním komparátorem. Z uvedené charakteristiky je zřejmé, že výstup U_{OUT} je použitelný v rozsahu vstupního napětí 50 mV – 1V. Zatím se nepodařilo zjistit, proč hodnota výstupního napětí začíná při vyšším napětí na vstupu růst. Naměřená hodnota výstupního proudu je 4,3 mA. Průběh nabíjecího napětí nebyl změřen, protože k dispozici nebyl kondenzátor s vhodnou kapacitou. Doba nabíjení dostupného superkondenzátoru s kapacitou 300 F by podle teoretického výpočtu z rovnice (6) trvala 48 hodin.

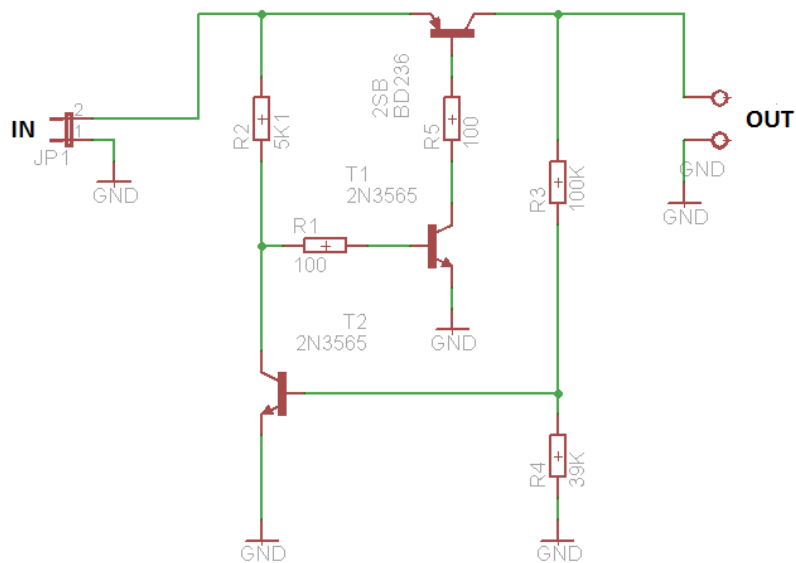
9.2 Snižující a zvyšující měnič s TPS63060

V případě měniče pro nabíjení superkondenzátoru je použito zařízení TPS63060EVM-619 (Obr. 22) dodané výrobcem (Texas Instruments). Hodnota výstupního napětí je nastavena na 5,2 V, z důvodu nejvyšší účinnosti.



Obr. 22 – Schéma zapojení měniče TPS63060EVM-619 (převzato z [22])

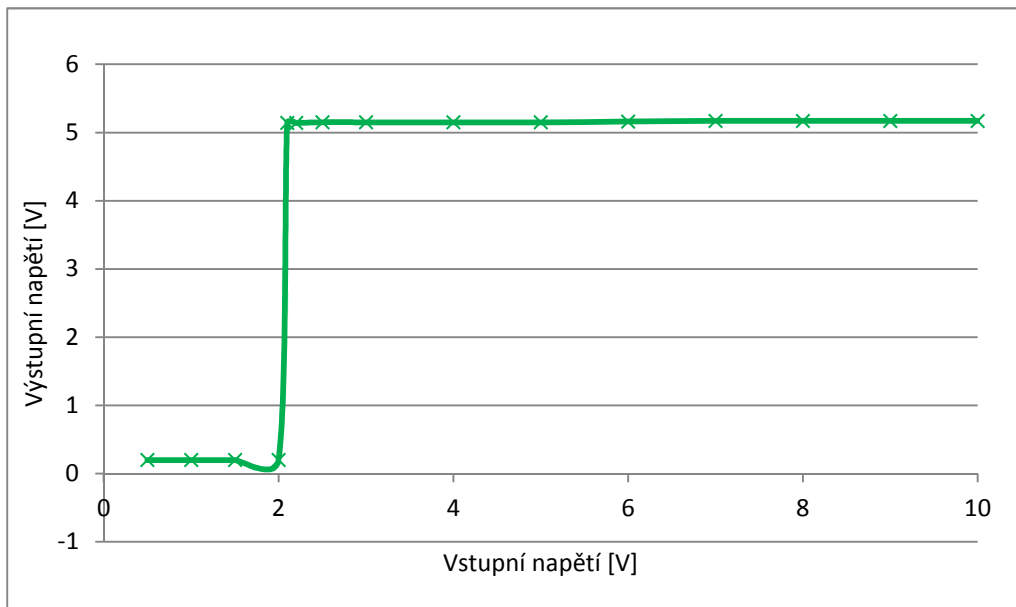
Na výstup tohoto měniče je připojen zdroj proudu s nastavitelnou hodnotou výstupního napětí (Obr. 23).



Obr. 23 – Schéma zapojení proudového zdroje

9.2.1 Ověřující měření

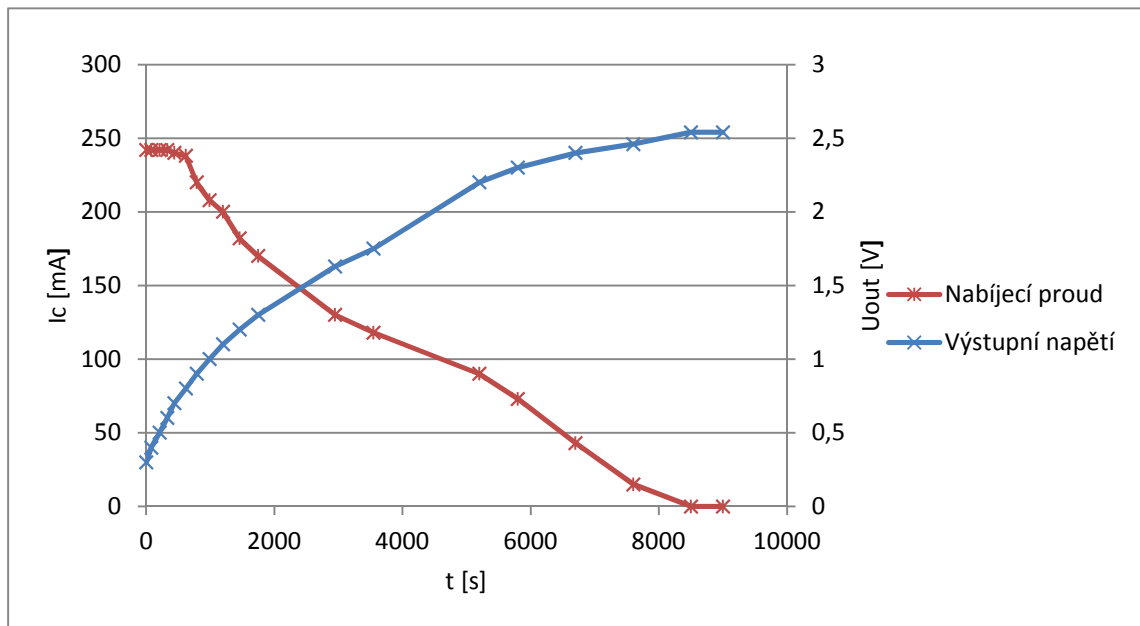
I zde se měřila závislost výstupního napětí na vstupním napětí a jako náhrada solárního panelu byl použit laboratorní zdroj. Tato charakteristika (Obr. 24) je měřena pouze pro samotný měnič bez přidaného proudového zdroje s přepětovou pojistkou. Tabulka naměřených hodnot viz. Přílohy.



Obr. 24 - Průběh výstupního napětí měniče s TPS63060

Měřením bylo zjištěno, že měnič začal spolehlivě pracovat už na hodnotě vstupního napětí 2,2 V. Při zvyšování vstupního napětí je hodnota výstupního napětí stále 5,2 V.

Při druhém měření měniče je k jeho výstupu připojen proudový zdroj s nastavitelnou maximální hodnotou výstupního napětí. Hodnota výstupního napětí je 2,5 V a na výstup je připojen superkondenzátor s kapacitou 400 F. Měřeny byly průběhy výstupního napětí a proudu v závislosti na čase (Obr. 25). Na laboratorním zdroji byla nastavena hodnota napětí 7 V a proudové omezení 150 mA. Naměřené hodnoty viz. Přílohy.



Obr. 25 - Časové průběhy napětí a proudu na superkondenzátoru $C = 400 \text{ F}$

Z charakteristik je patrné, že zařízení nefunguje, jak se očekávalo. Jako klasický zdroj proudu se měnič chová do doby, kdy je superkondenzátor nabitý na hodnotu napětí 0,7 V. Simulace sice ukazuje požadované charakteristiky, ale realita je jiná. Důvody proč zařízení nefunguje jak má, mohou být:

- a) malý rozdíl napětí mezi vstupem a výstupem
- b) sériový odpor předchozího obvodu
- c) odpor ampérmetru

Superkondenzátor byl nabit na hodnotu 2,54 V za 2 hodiny a 20 minut.

10 Měření parametrů solárního panelu

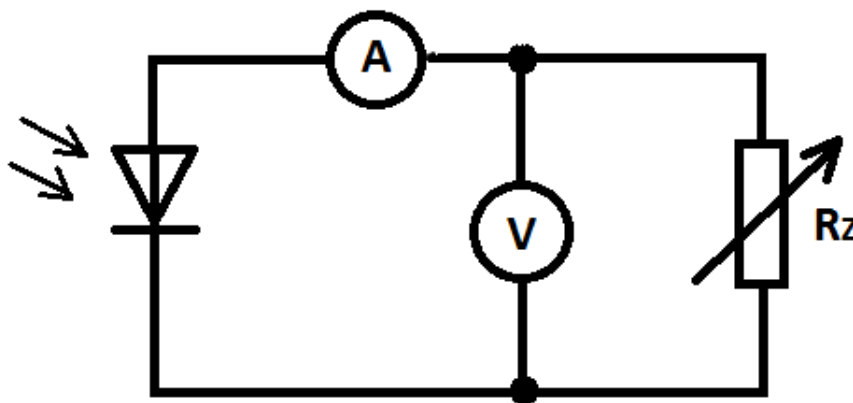
10.1 Měření solárního panelu

Pro solární zdroj je použit solární panel MP7.2-150, jehož parametry jsou:

- Napětí naprázdno $U_{0C} = 10,5 \text{ V}$
- Pracovní napětí $U = 7,2 \text{ V}$
- Výkon $P = 1,44 \text{ W}$
- Zkratový proud $I_{SC} = 150 \text{ mA}$
- Šířka $a = 146 \text{ mm}$
- Délka $b = 253 \text{ mm}$
- Hmotnost $m = 25,9 \text{ g}$

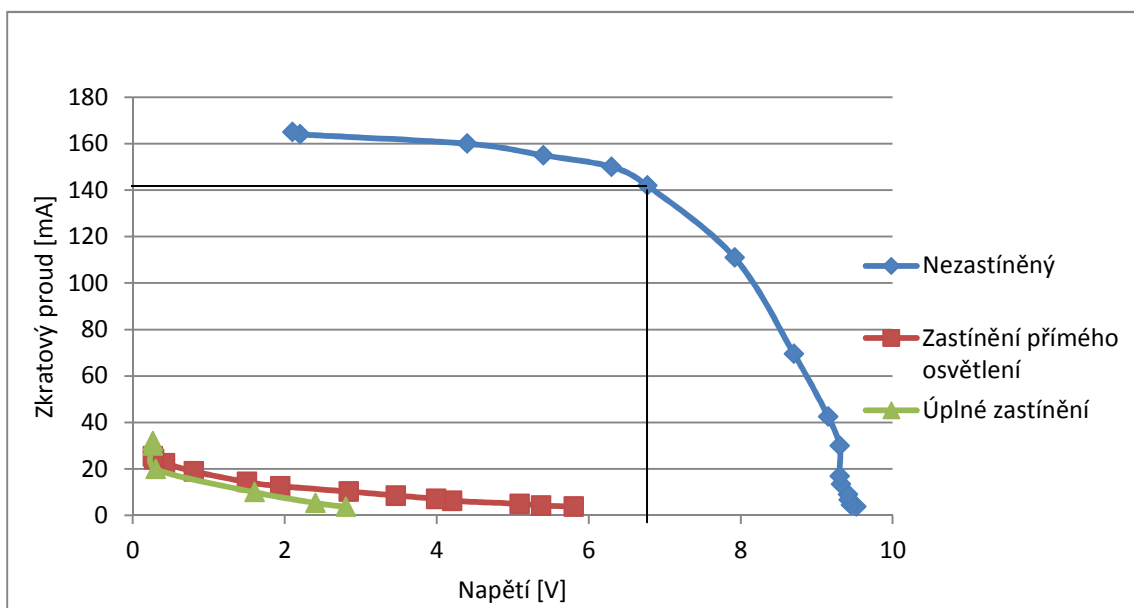
[24]

Měření bylo prováděno 13. března 2014 mezi 11:00 – 12:00 za jasného počasí. Měřena byla VA charakteristika postupným snižováním zatěžovacího odporu (Obr. 26).



Obr. 26 – Schéma zapojení pro měření VA charakteristiky solárního panelu

Voltampérová charakteristika (Obr. 27) byla měřena při nezastíněném i částečně zastíněném solárním panelu. Tabulky naměřených hodnoty viz. Přílohy.



Obr. 27 – VA charakteristika měřeného solárního panelu

Při nezastíněném panelu se bod maximálního výkonu vyskytoval na hodnotě napětí 6,77 V a proudu 142 mA. V tento okamžik solární panel dodával výkon 0,96 W, hodnota odporu zátěže byla 48 Ω . Měřením byly ověřeny teoretické parametry solárního panelu. V případě zastínění přímého slunečního záření byla hodnota výkonu 0,03 W a při úplném zastínění poloviny panelu 0,02 W. Úhel dopadajícího záření byl 58 °.

11 Závěr

Cíl této bakalářské práce byl navrhnout a realizovat solární zdroj k modelu elektromobilu, který se podařilo splnit.

Výsledek je zkonstruovaný jeden zvyšující měnič, který pracuje na hodnotách vstupního napětí 50 mV – 1 V a druhý snižující i zvyšující měnič, který pracuje se vstupními hodnotami napětí 2,2 V – 12 V. Oba měniče mají nastavenou hodnotu výstupního napětí v rozsahu 2,5 V – 2,6 V a jsou schopné nabíjet superkondenzátory.

Nepodařilo se, aby zvyšující měnič byl schopen plnit svojí funkci s maximálním vstupním napětím 2,5 V. Tuto skutečnost, by mělo vyřešit použití transformátoru s nižším transformačním poměrem než je 1 : 50. Ani jedno zařízení tedy není schopné fungovat, v rozsahu vstupního napětí 1 V – 2,2 V. Další nežádoucí jev je nelinearita proudového zdroje, který je na výstupu zařízení TPS63060-EVM. Při měření došlo také ke zničení integrovaného obvodu TPS63060 v důsledku překročení maximální dovolené vstupní hodnoty napětí.

Řešením do budoucna by bylo vhodné navrhnout možnost přepojování měničů podle aktuálního slunečního záření, aby využití solárního panelu bylo co největší. Zlepšit by se dalo schéma zapojení proudového zdroje a dosáhnout tak lepšího průběhu proudu, kterým je superkondenzátor nabíjen.

V případě, že elektromobil poháněný solárním zdrojem je používán pouze venku a při optimálním počasí, stačí využití měniče s obvodem TPS63060. Při použití solárního panelu MP7.2-150 měnič plní svou činnost i při úplné oblačnosti.

12 Literatura

- [1] LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. *Fotovoltaika: teorie i praxe využití solární energie*. ČZU v Praze: ILSA, 2009. ISBN 8090431100.
- [2] Sluneční energie. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. 2001 - 2014 [cit. 2014-04-18]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Slune%C4%8Dn%C3%AD_energie
- [3] Sunlight and the Human Eye. *Why Is The Sky Blue* [online]. 2013 [cit. 2014-04-21]. Dostupné z: <http://www.whyistheskyblue.co/purple.php>
- [4] Solární (fotovoltaické) články. *Skupina ČEZ* [online]. 2004 [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k32.htm>
- [5] Přechod P-N. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. 2001 - 2013 [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/P%C5%99echod_P-N
- [6] 8 Good Reasons Why Monocrystalline Solar Panels are the Industry Standard. *Solar Facts and Advice* [online]. 2010 - 2013 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://www.solar-facts-and-advice.com/monocrystalline.html>
- [7] Druhy solárních článků. *Apolo Solar s.r.o.: Energie vaší budoucnosti* [online]. 2009 [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: <http://www.apolosolar.cz/druhy-solarnich-clanku/>
- [8] Absolutně černé těleso, Planckův vyzařovací zákon, Stefan-Boltzmannův zákon, Wienův posunovací zákon. 2002 [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: <http://aldebaran.cz/~blahova/F1KME/30.pdf>
- [9] Jak fotovoltaická elektrárna funguje. *Slatinsky.eu* [online]. 2008 [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: <http://www.slatinsky.eu/jak-elektrarna-funguje.html>
- [10] Solární články z krystalického křemíku - základní technologie současné fotovoltaiky Zdroj: <http://www.tzb-info.cz/3553-solarni-clanky-z-krystalickeho-kremiku-zakladni-technologie-soucasne-fotovoltaiky>. *TZB - info* [online]. 2001 - 2004 [cit. 2014-05-2]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/3553-solarni-clanky-z-krystalickeho-kremiku-zakladni-technologie-soucasne-fotovoltaiky>
- [11] My Advice: Understand the Advantages, Disadvantages of Different Solar Cells and Who the Market Leaders Are. *Solar Facts and Advice* [online]. 2010 - 2013 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://www.solar-facts-and-advice.com/solar-cells.html>
- [12] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *DC/DC měniče*. Praha: BEN, 2001. ISBN 80-7300-045-8.

- [13] Switched-mode power supply. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. 2001 - 2014 [cit. 2014-03-12]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Switched-mode_power_supply
- [14] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje 1*. Praha: BEN, 1996. ISBN 80-86056-02-3.
- [15] Supercapacitor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. 2001 - 2014 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Supercapacitor>
- [16] *Superkondenzátor - princip, použití*. 2007 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: http://www.dedalebeda.wz.cz/skola/upload/02FM1/super_capacitor.pdf
- [17] TEXAS INSTRUMENTS. *LM2578A/LM3578A Switching Regulator*. 2000 [cit. 2014-04-10]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2578a.pdf>
- [18] LINEAR TECHNOLOGY. *Ultralow Voltage Step-Up Converter and Power Manager*. 2010 [cit. 2014-04-10]. Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/31081fb.pdf>
- [19] TEXAS INSTRUMENTS. *HIGH INPUT VOLTAGE BUCK-BOOST CONVERTER WITH 2A SWITCH CURRENT*. 2011 – 2012 [cit. 2014-04-10]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps63060.pdf>
- [20] Sluneční záření. *FLE.CZU.CZ* [online]. 2010 [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: http://fle.czu.cz/~ulbrichova/Skripta_EKOL/lesazareni/slunecnizareni.htm
- [21] Power Backup system Design and Analysis. *Electronics ReVisit* [online]. 2012 [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: <http://erevisit.blogspot.cz/p/power-backup-system-design-and-analysis.html>
- [22] TEXAS INSTRUMENTS. *TPS63060EVM-619*. 2012 [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ug/slvs442/slvs442.pdf>
- [23] Why are Polycrystalline Solar Cells so Popular?. *Solar Facts and Advice* [online]. 2010 - 2013 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://www.solar-facts-and-advice.com/polycrystalline.html>
- [24] Thin, Flexible Solar Panels. *PowerFilm* [online]. 2013 [cit. 2014-05-21]. Dostupné z: <http://www.powerfilmsolar.com/products/?mp72150&show=product&productID=271544&productCategoryIDs=6573>

13 Seznam obrázků a tabulek

Obrázky

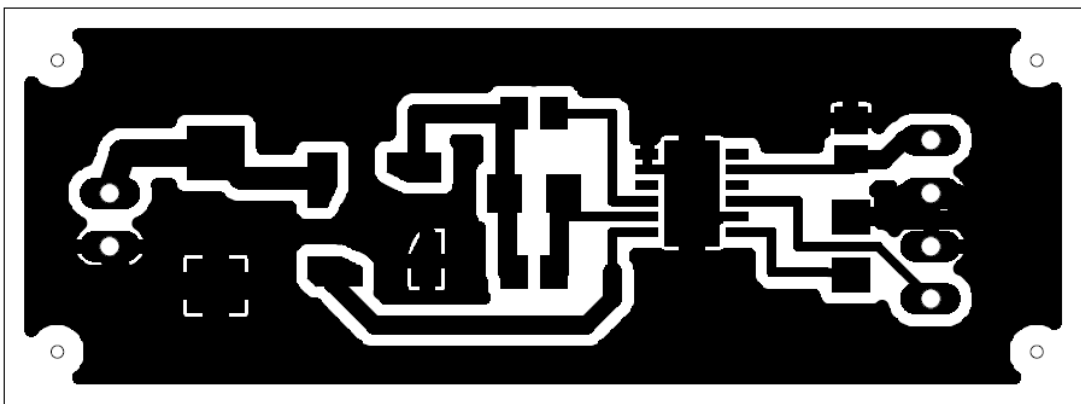
Obr. 1 – Spektrum slunečního záření (převzato z [3])	13
Obr. 2 – Struktura PN přechodu solárního článku (převzato z [4]).....	14
Obr. 3 – Princip PN přechodu (převzato z [4]).....	15
Obr. 4 – Náhradní schéma solárního článku.....	18
Obr. 5 - VA charakteristika (převzato z [9])	19
Obr. 6 – Struktura superkondenzátoru.....	20
Obr. 7 – Schéma zapojení snižujícího měniče.....	25
Obr. 8 – Schéma zapojení zvyšujícího měniče.....	26
Obr. 9 – Schéma zapojení zvyšujícího i snižujícího měniče	27
Obr. 10 – Schéma zapojení invertujícího měniče.....	27
Obr. 11 – Schéma zapojení akumulujícího měniče	28
Obr. 12 – Vnitřní schéma zapojení obvodu LM2578A (převzato z [17])	30
Obr. 13 – Vnitřní schéma zapojení obvodu LTC3108-1 (převzato z [18])	31
Obr. 14 - Zapojení vstupní části měniče LTC3108-1	34
Obr. 15 – Průběh výstupních parametrů v simulačním programu LTspice (LTC3108-1) ...	34
Obr. 16 – Vnitřní schéma zapojení obvodu TPS63060 (převzato z [19])	36
Obr. 17 – Schéma zapojení děliče k výstupní části TPS63060	38
Obr. 18 – Schéma zapojení proudového zdroje.....	38
Obr. 19 - Průběh výstupních parametrů v simulačním programu LTspice (TPS63060).....	39
Obr. 20 - Schéma zapojení měniče s LTC3108 - 1	40
Obr. 21 – Časové průběhy výstupních napětí zvyšujícího měniče.....	41
Obr. 22 – Schéma zapojení měniče TPS63060EVM-619 (převzato z [22])	42
Obr. 23 – Schéma zapojení proudového zdroje.....	42
Obr. 24 - Průběh výstupního napětí měniče s TPS63060.....	43
Obr. 25 - Časové průběhy napětí a proudu na superkondenzátoru $C = 400 \text{ F}$	44
Obr. 26 – Schéma zapojení pro měření VA charakteristiky solárního panelu	45
Obr. 27 – VA charakteristika měřeného solárního panelu	46

Tabulky

Tab. 1 – Možnosti regulace výstupního napětí LTC3108-1 (převzato z [18])..... 33

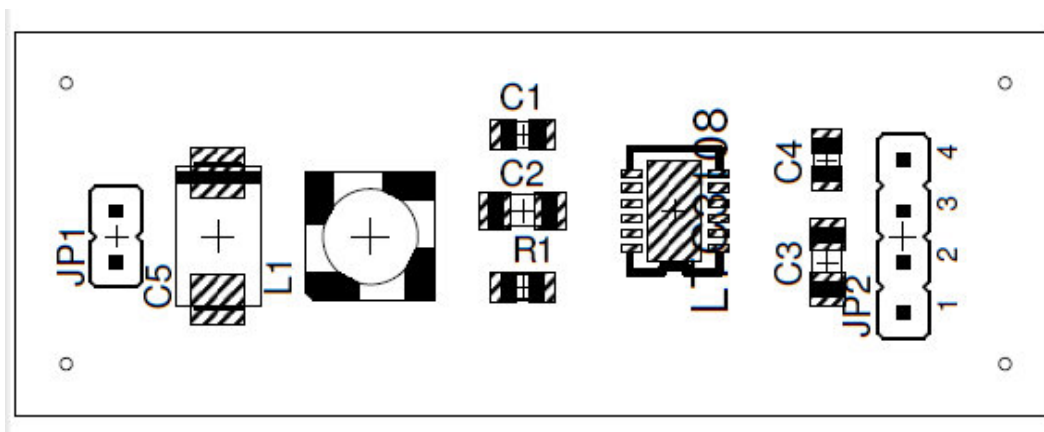
14 Přílohy

14.1 Návrh tištěný spoj zvyšujícího měniče



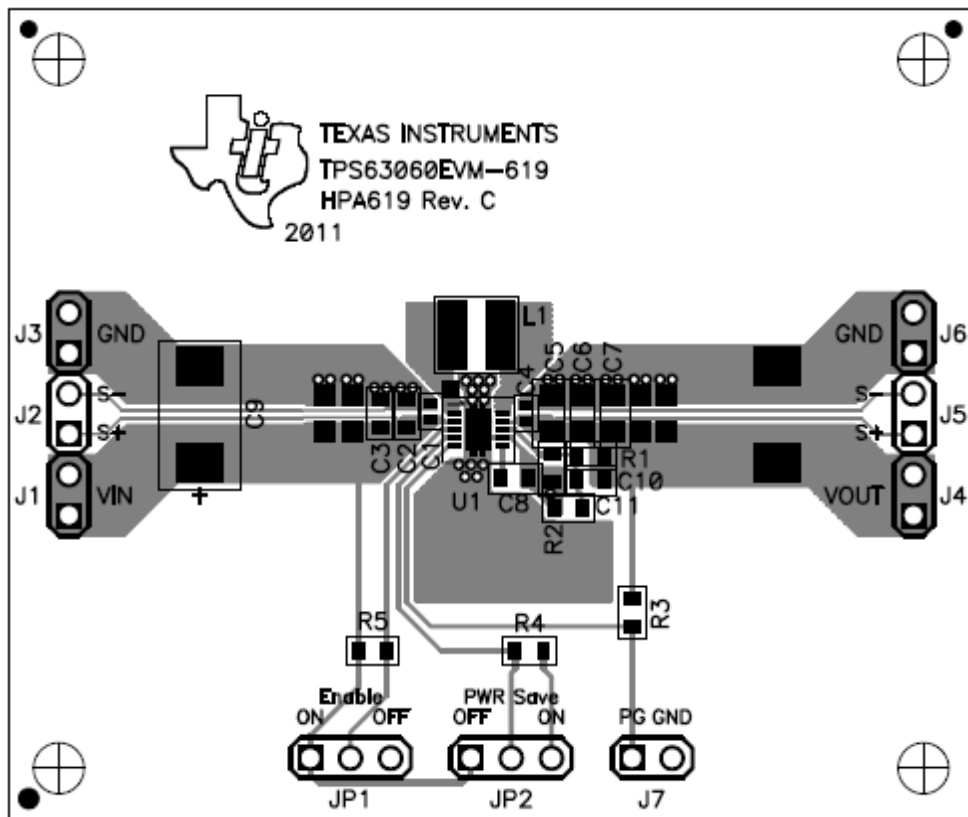
Obr. I

14.2 Rozmístění součástek zvyšujícího měniče



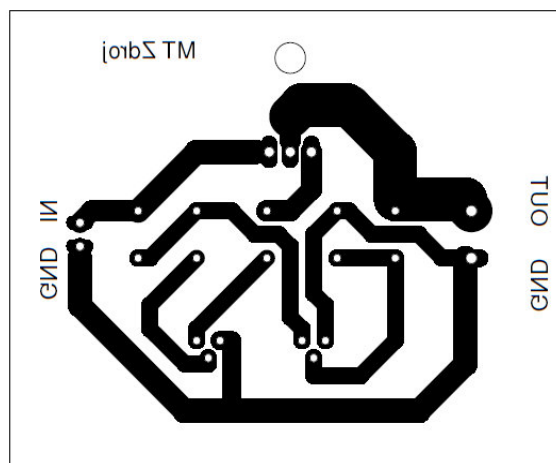
Obr. II

14.3 Tištěný spoj s rozmístěním součástek zařízení TPS63060EVM-619



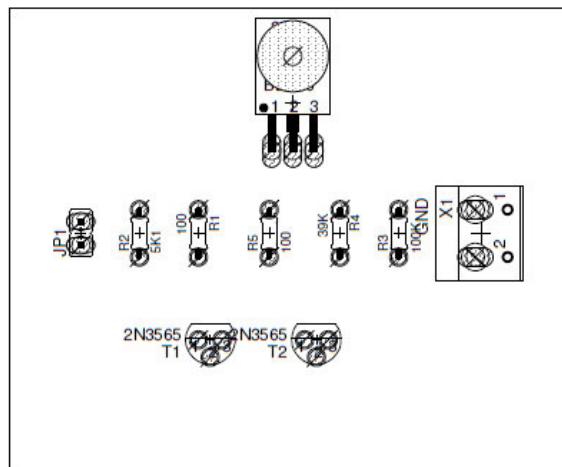
Obr. III (převzato z [22])

14.4 Návrh plošného spoje proudového zdroje



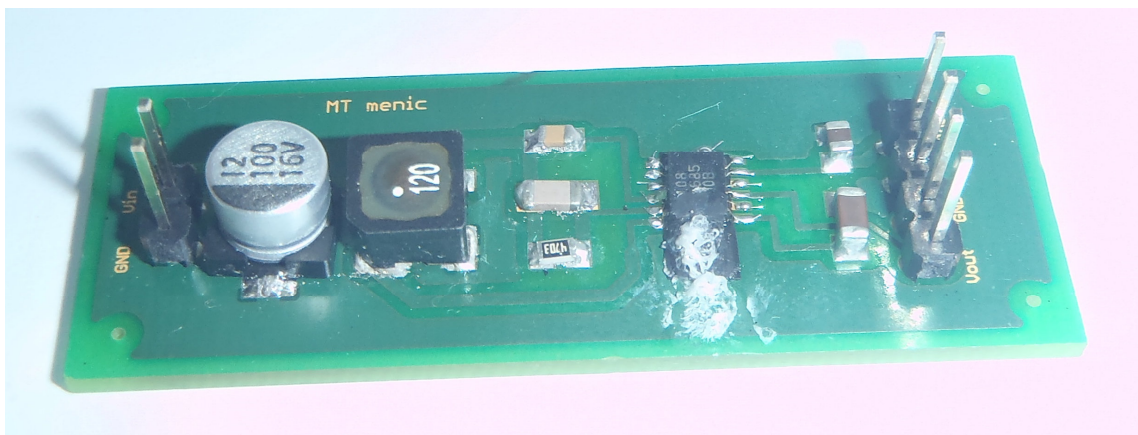
Obr. IV

14.5 Rozmístění součástek proudového zdroje



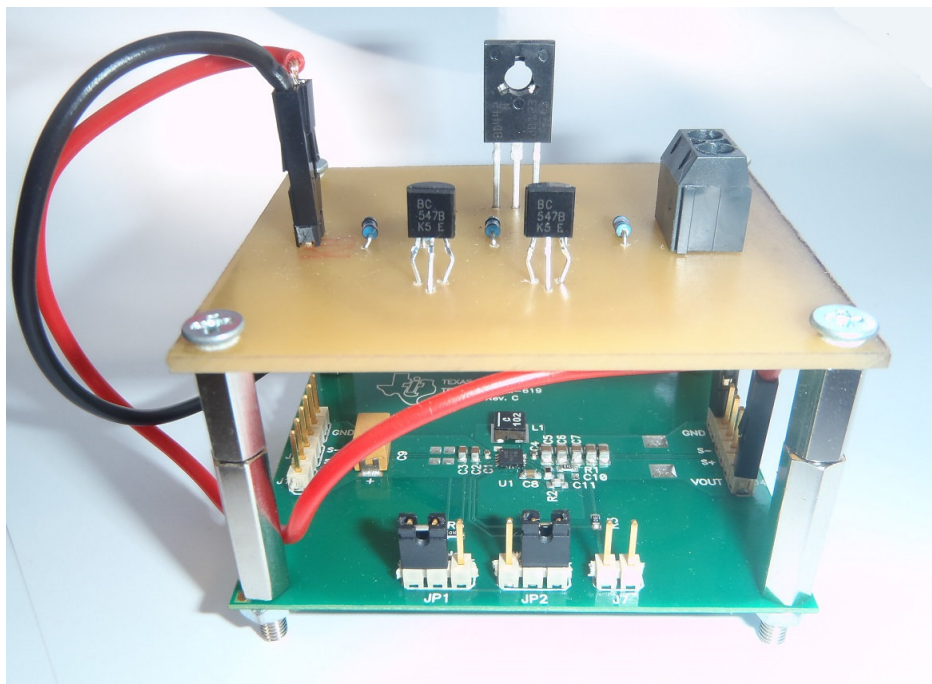
Obr. V

14.6 Zvyšující měnič



Obr. VI

14.7 Snižující i zvyšující měnič s proudovým zdrojem



Obr. VII

14.8 Seznam součástek zvyšujícího měniče

Partlist

Exported from ltc_menic.sch at 23. 5. 2014 3:34:28

EAGLE Version 6.5.0 Copyright (c) 1988-2013 CadSoft

Assembly variant:

Part	Value	Device	Package
C1	6,8n	C-EUC0805	C0805
C2	330p	C-EUC1206	C1206
C3	1u	C-EUC1206	C1206
C4	2.2u	C-EUC0805	C0805
C5	100u	CPOL-EUD/7343-31R	D/7343-31R
IC1	LTC3108	LTC3108	DFN12(DE)
JP1		JP1E	
JP2		JP4E	
L1	WE-EHPI	WE-EHPI	WE-EHPI
R1	470K	R-EU_R0805	R0805

14.9 Seznam součástek snižujícího i zvyšujícího měniče

Part	Value	Device	Package
C1	1uF	Ceramic	402
C4	1uF	Ceramic	402
C8	0.1uF	Ceramic	603
C10	10pF	Ceramic	603
C11	10pF	Ceramic	603
C12, C13, C5, C6, C7	22uF	Ceramic	805
C2, C3	10uF	Ceramic	603
C9	100uF	Tantalum	T491X107K025AT
L1	1uH	Induktor	0.157 x 0.157 inch
R1, R3, R4, R5	1.00M	Resistor	603
R2	110k	Resistor	603
U1 TPS63060DSC	SON-1	Buck-Boost	TPS63060DSC TI

[22]

14.10 Seznam součástek proudového zdroje

Partlist

Exported from zdroj proudu.sch at 23. 5. 2014 4:03:34

EAGLE Version 6.5.0 Copyright (c) 1988-2013 CadSoft

Assembly variant:

Part	Value	Device	Package
2SB	BD236	BD236	TO126
JP1		JP1E	JP1
R1	100	R-EU_0204/5	0204/5
R2	5K1	R-EU_0204/5	0204/5
R3	100K	R-EU_0204/5	0204/5
R4	39K	R-EU_0204/5	0204/5
R5	100	R-EU_0204/5	0204/5
T1	2N3565	2N3565	TO92
T2	2N3565	2N3565	TO92
X1	GND	W237-02P	W237-132

14.11 Naměřené hodnoty zvyšujícího měniče

U_{IN} [V]	U_{OUT} [V]	U_{OUT2} [V]
0,05	2,46	2,18
0,1	2,48	2,2
0,2	2,5	2,2
0,3	2,5	2,2
0,4	2,5	2,2
0,5	2,5	2,2
0,6	2,5	2,2
0,7	2,5	2,2
0,8	2,5	2,2
0,9	2,55	2,2
1	2,55	2,2
1,1	2,6	2,2
1,2	2,7	2,2
1,3	2,8	2,2
1,4	2,9	2,2

Tab. I – Měření výstupních napětí

14.12 Naměřené hodnoty snižující i zvyšujícího měniče

U_{IN} [V]	U_{OUT} [V]
0,5	0,2
1	0,2
1,5	0,2
2	0,2
2,1	5,14
2,2	5,14
2,5	5,15
3	5,15
4	5,15
5	5,15
6	5,16
7	5,17
8	5,17
9	5,17
10	5,17

Tab. I – Měření výstupních napětí

t [s]	U_{OUT} [V]	I_c [mA]
0	0,3	242
80	0,4	242
210	0,5	242
330	0,6	242
440	0,7	240
620	0,8	238
790	0,9	220
990	1	208
1200	1,1	200
1460	1,2	182
1750	1,3	170
2950	1,63	130
3550	1,75	118
5200	2,2	90
5800	2,3	73
6700	2,4	43
7600	2,46	15
8500	2,54	0
9000	2,54	0

Tab. II – Měření průběhu nabíjecího napětí a proudu

14.13 Měření VA charakteristiky solárního panelu MPT7.2-150

t = 11:23 - 11:32			
U[V]	I[mA]	P[W]	R[Ω]
9,52	3,86	0,04	2466
9,45	4,54	0,04	2081
9,42	6,78	0,06	1389
9,41	9,14	0,09	1030
9,32	13,5	0,13	690
9,3	16,9	0,16	550
9,3	30	0,28	310
9,15	42,6	0,39	215
8,7	69,6	0,61	125
7,92	111	0,88	71
6,77	142	0,96	48
6,3	150	0,95	42
5,4	155	0,84	35
4,4	160	0,70	28
2,2	164	0,36	13
2,1	165	0,35	13

Tab. IV – Nezaslíněný panel

t = 11:45 - 11:49			
U[V]	I[mA]	P[W]	R[Ω]
2,8	3,7	0,01	757
2,4	5,4	0,01	444
1,6	10	0,02	160
0,3	20	0,01	15
0,26	30	0,01	9
0,26	32	0,01	8

Tab. VI – Úplné zastínění poloviny panelu

t = 11:34 - 11:40			
U[V]	I[mA]	P[W]	R[Ω]
5,8	3,8	0,02	1526
5,37	4,3	0,02	1249
5,09	5	0,03	1018
4,2	6,3	0,03	667
3,99	7,14	0,03	559
3,46	8,6	0,03	402
2,84	10,3	0,03	276
1,94	12,6	0,02	154
1,5	14,4	0,02	104
0,8	19	0,02	42
0,42	22,5	0,01	19
0,28	24,3	0,01	12
0,26	25,5	0,01	10

Tab. V - Zastínění přímého osvětlení