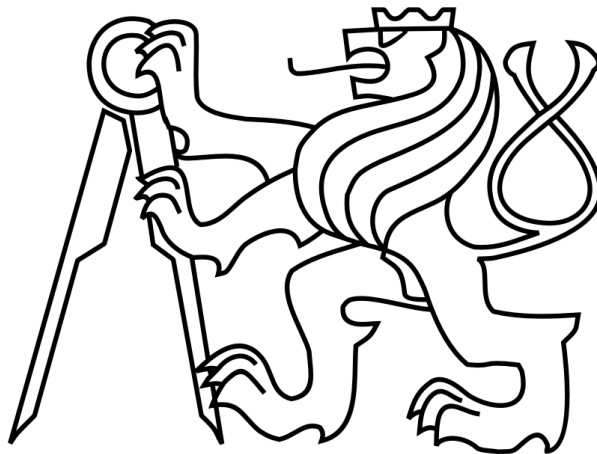


České vysoké učení technické v Praze
fakulta elektrotechnická
katedra mikroelektroniky



Bakalářská práce

**Model řízení přenosu energie ze solárního panelu do soustavy
spotřebičů solárního letadla**

Autor: Martin Čurda

Vedoucí práce: Ing. Lubor Jirásek, CSc.

2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Čurda** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **456956**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektronika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Model řízení přenosu energie ze solárního panelu do soustavy spotřebičů solárního letadla

Název bakalářské práce anglicky:

Model of Energy Management for Solar Aircraft Model

Pokyny pro vypracování:

1. Prostudujte dostupnou literaturu týkající se problematiky řešení napájecí soustavy solárních letadel. Zaměřte se speciálně na optimalizaci zpracování energie ze solárních panelů, možnosti uložení energie a vytvoření napájecí soustavy pro jednotlivé systémy letadla.
2. Na základě podle 1) navrhnete a realizujete napájecí systém modelu solárního letadla s případnou kontrolou z řídicí jednotky.
3. Jako zdroj energie použijte flexibilní solární panel firmy MARS ROCK 19,5 V, 40 W. Zajistěte sledování zásoby energie.
3. Navrhnete postup vhodný pro ověření funkce přístroje.
4. Proveďte ověřovací měření na zařízení.
5. Zhodnoťte dosažené výsledky.
6. Publikování výsledků dosažených v této práci je možné pouze se svolením zadavatele.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Husák, M.: Mikrosenzory a mikroaktuátory. Academia, Praha 2008.
- [2] Krejčířík, A.: Napájecí zdroje I.-III. Ben, Praha 1996 a pozdější vydání.
- [3] Katalogové listy součástí a aplikační poznámky výrobců.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Lubor Jirásek, CSc., katedra mikroelektroniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **31.01.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **25.05.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

Ing. Lubor Jirásek, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Řípků, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci „Model řízení přenosu energie ze solárního panelu do soustavy spotřebičů solárního letadla“ 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 17. 5. 2018

Martin Čurda

Poděkování

Děkuji Ing. Luborovi Jiráskovi, CSc. za odborné vedení a cenné rady, které mi při vypracování práce poskytoval.

Anotace

Cíl práce je navrhnout funkční přípravek, zařizující přenos energie z předložených solárních panelů, s hledáním bodu maximálního výkonu, realizovaný pomocí měniče typu SEPIC. Funkce měniče má být řízena z mikrokontroléru, který bude odečítat data z měřicích obvodů. Naměřená data budou odesílána z mikrokontroléru do řídicí jednotky.

Teoretická část je zaměřena na jednotlivé funkční bloky a komponenty, ze kterých jsou tyto bloky realizovány. Část textu je věnována i teoretickému rozboru použitého DC/DC měniče.

Praktická část se zabývá výpočty a popisem funkce přípravku. Dále jsou zde uvedeny naměřené hodnoty a diskuse problémů vzniklých při realizaci přípravku.

Klíčová slova: model solárního letadla, solární panel, MPPT, SEPIC, mikrokontrolér

Abstract

The aim of the thesis is to design a functional prototype allowing the electric energy to be transferred from intended solar panels and to find out the maximum power point, which has been realized by a SEPIC convertor. The changer function is supposed to be controlled from a microcontroller that will be deducting data from measured circuits. All the measured data will be sent from the microcontroller to a control unit.

Theoretical part of the thesis focuses on individually functioning blocks and components used for these blocks. Some part of the text also theoretically analyses a DC/DC convertor that has been used.

Practical part of this paper deals with calculations and a description of the prototype functions. Also all measured values and a discussion of problems, which have occurred during the realization of the prototype, are stated there.

Keywords: solar aircraft model, solar panel, MPPT, SEPIC, microcontroller

Obsah

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE.....	2
Čestné prohlášení	3
Poděkování.....	4
Anotace	5
Abstract	5
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	8
ÚVOD	10
1. Teoretická část	11
1.1 Napájecí soustava solárního letadla	11
1.2 MPPT	12
1.1.1 Princip	13
1.3 SEPIC.....	14
1.3.1 Funkce	15
1.4 Použité integrované obvody.....	17
1.4.1 LTC2945	17
1.4.2 LT3621	18
1.4.3 LT3959.....	19
1.4.4 MCP41100 a MCP41010	22
1.5 Mikrokontrolér	22
1.6 Solární panely	23
1.7 Popis přípravku	24

1.8	Akumulátor	26
1.9	Plošný spoj	26
1	Praktická část	27
2.1	Konfigurace a výpočty	27
2.1.1	LTC2945	27
2.1.2	LT3621	27
2.1.3	LT3959	28
2.1.4	MCP41100 a MCP41010	30
2.2	Řízení měniče typu SEPIC	31
2.3	Firmware	32
2.4	Měření voltampérové charakteristiky solárních panelů	33
2.5	Měření parametrů přípravku	36
3	ZÁVĚR	40
4	Použitá literatura	41
5	Seznam příloh	43

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

C	(F)	Kapacita
D	(-)	Střída
ESR	(Ω)	Ekvivalentní sériový odpor
f	(Hz)	Frekvence
I	(A)	Proud
I_C		Proud kondenzátorem
I_{IN}		Vstupní proud
I_L		Proud cívkou
I_{OUT}		Výstupní proud
I_{sw}		Proud spínačem
ΔI		Zvlněný proud
L	(H)	Indukčnost
P	(W)	Výkon
R	(Ω)	Odpor
U	(V)	Napětí
U_C		Napětí na kondenzátoru
U_D		Napětí na diodě
U_{IN}		Vstupní napětí
U_L		Napětí na cívce
U_{OUT}		Výstupní napětí
U_{REZ}		Napěťová rezerva

U_{RRM}	Opakovatelné napětí v závěrném směru
U_{sw}	Napětí na spínači
U^+	Napětí kladné napájecí svorky
U^-	Napětí záporné napájecí svorky
$\mu C_{HODNOTA}$	Hodnota v programu mikrokontroléru
ADC	Analogově digitální převodník
CS	Výběr čipu
MISO	Master vstup, slave výstup
MOSI	Master výstup, slave vstup
PWM	Pulsně šířková modulace
RC	Rádiem řízený model
RX	Příjem
SCK	Hodinový signál
SPI	Sériové periferní rozhraní
TX	Vysílání

ÚVOD

Přeměna sluneční energie na elektrickou je v současné době poměrně častý způsob získávání elektrické energie. Solární energie se využívá jak v elektrárnách k čerpání energie do sítě, dobíjení autobaterie, tak i v přenosných nabíječkách pro elektronická zařízení jako jsou například telefony.

Využití sluneční energie v RC modelech k dobíjení akumulátoru a prodloužení doby použití je vhodné především u RC letadel, aby byl let bez přistání co nejdelší. A tak letadla Solar Impulse a Solar Impulse II, která používají akumulátory dobíjené solárními panely k letu kolem Země, se stávají hlavní inspirací pro vytvoření RC modelu solárního letadla.

Energii lze ze solárních panelů získávat více způsoby. Některé způsoby jsou účinné a jiné méně. Tato práce je zaměřena na způsob vyhledávání bodu maximálního výkonu s využitím měniče typu SEPIC a uchování energie v akumulátoru s možností kontroly z řídicí jednotky.

1. Teoretická část

1.1 Napájecí soustava solárního letadla

Napájecí soustava solárního letadla se skládá ze zdroje energie, elektroniky, která přečerpává energii ze zdroje do uložistiště a poté samotné uložistiště energie.

Funkci zdroje energie u solárního letadla obstarávají solární panely, těch může být vícero druhů, jak je popsáno v kapitole 1.6. Pro tuto práci byly určeny solární panely od firmy MARS Rock.

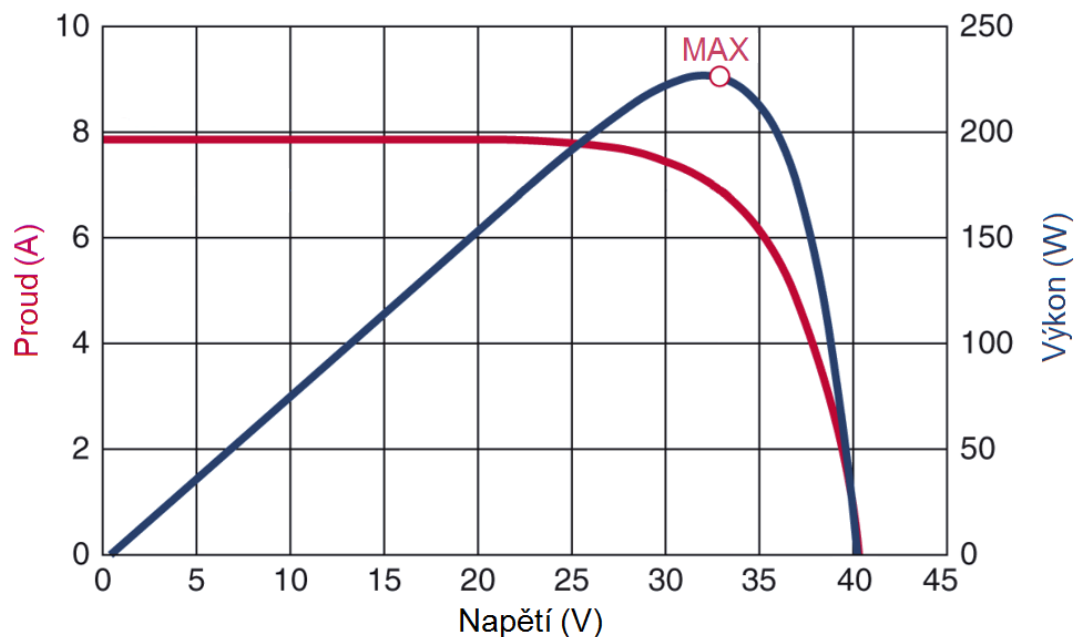
Elektronika solárních letadel sestává z obvodů, které čerpají energii ze solárních panelů. Jako základ přístroje slouží měnič napětí, který hledá bod maximálního výkonu solárního panelu a logické obvody, které tento úkon řídí a zařizují, aby nedocházelo k přebíjení akumulátoru. V dnešní době již existují integrované obvody, které všechny tyto funkce zajišťují, nicméně v této práci byla zvolena jiná cesta, kdy funkci měniče bude obstarávat měnič typu SEPIC řízený procesorem. Procesor bude získávat informace o výkonu z měřicích obvodů, které bude dále zpracovávat a odesílat do řídicí jednotky. Toto řešení bylo zvoleno jednak z důvodu rozšíření znalosti spínaných obvodů a možností jejich řízení a také z důvodu procvičení programování mikrokontrolérů.

Získaná energie může být ukládána do akumulátorů nebo superkondenzátorů. Výhoda superkondenzátorů a Li-Pol akumulátorů proti běžným akumulátorům je ta, že mohou dodávat větší proud než běžné akumulátory, což je vhodné pro akceleraci elektromotoru. Proto byl zvolen akumulátor typu Li-Pol, o němž je hovořeno v kapitole 1.8.

U modelu solárního letadla, pro který bude přípravek realizovaný v této práci určen, není reálné, aby byl poháněný pouze z energie získané ze solárních panelů umístěných na křídlech letadla. Jednak je to kvůli účinnosti solárních panelů, která se pohybuje kolem 20 % a také je to kvůli tomu, že by musela plocha pokrytá solárními panely mít velké rozměry. Proto u modelu solárního letadla budou solární panely sloužit k dobíjení akumulátoru.

1.2 MPPT

MPPT (Maximum Power Point Tracking) neboli „sledování bodu největšího výkonu“ je algoritmus zařizující vytěžení maximálního výkonu z fotovoltaických panelů za jakýchkoliv podmínek. Maximální výkon panelu se mění s osvětlením, teplotou panelu a teplotou okolí [1]. Regulátor s MPPT sleduje napětí na panelu a proud tekoucí z panelu. Z těchto dvou veličin určí výkon dodávaný panelem. Na základě voltampérové charakteristiky přizpůsobí napětí na panelu a proud tekoucí z panelu tak, aby jejich součin neboli výkon byl maximální, viz Obrázek 1.



Obrázek 1: Voltampérová charakteristika solárního panelu, křivka maximálního výkonu [2]

Při změně osvětlení se mění i VA-charakteristika panelu, a tak maximální výkon bude dosažen pro jiné napětí a proud. Takovéto změny by měl být MPPT měnič schopen zjistit a přizpůsobit parametry obvodu.

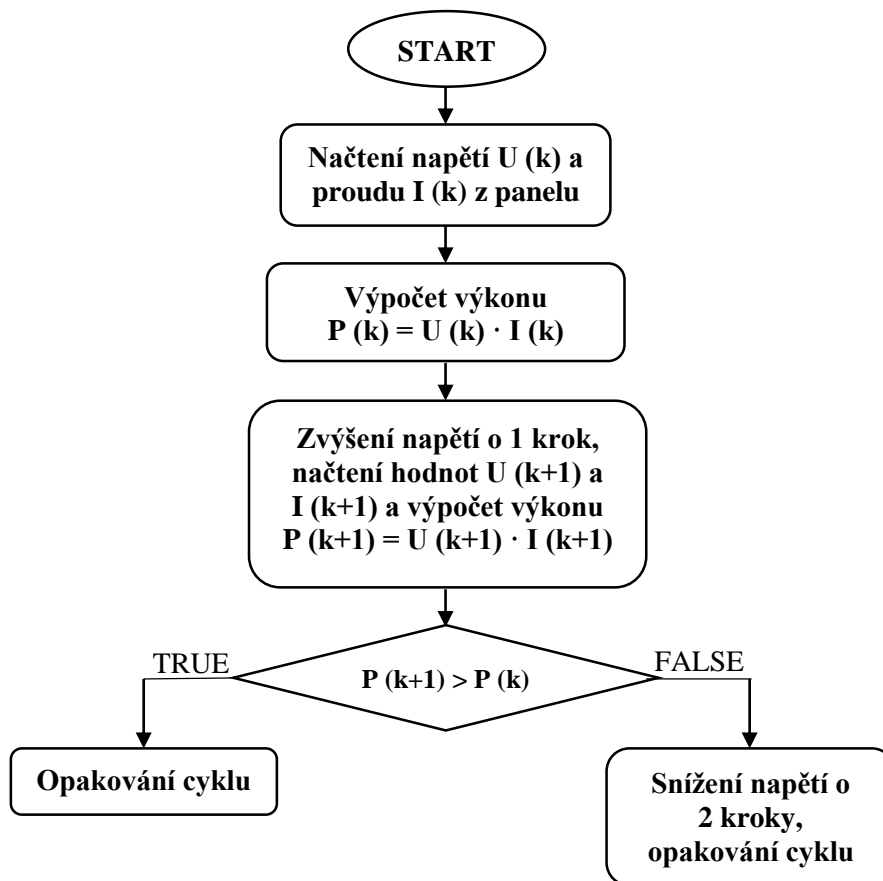
Pokud by byl solární panel, který má napětí naprázdno například 40V (bude-li se vycházet z voltampérové charakteristiky viz Obrázek 1), připojen k akumulátoru bez použití měniče, bude panel zatížen natolik, že klesne jeho napětí na aktuální napětí akumulátoru, což například u olověného akumulátoru, jehož nominální napětí je 12 V činí 11,8 V ve vybitém stavu a v nabitém stavu to je 12,8 V. Proud se v této oblasti příliš nemění, tudíž se dá uvažovat proud 8 A. Při napětí 11,8 V je výkon 94,4 W a při napětí 12,8 V, kdy je akumulátor více nabitý, je výkon 102,4 W. Jenže maximum energie, kterou je panel schopen dodat leží v bodě MAX, což [Martin Čurda]

je cca 33 V při proudu 7 A je výkon roven 231 W. Což dokazuje, že MPPT regulátor dosáhne v tomto případě až dvojnásobné účinnosti [3]. V popsaném příkladu bylo neefektivně zvoleno nominální napětí akumulátoru. Při využití dvou akumulátorů v sérii by byla efektivita větší.

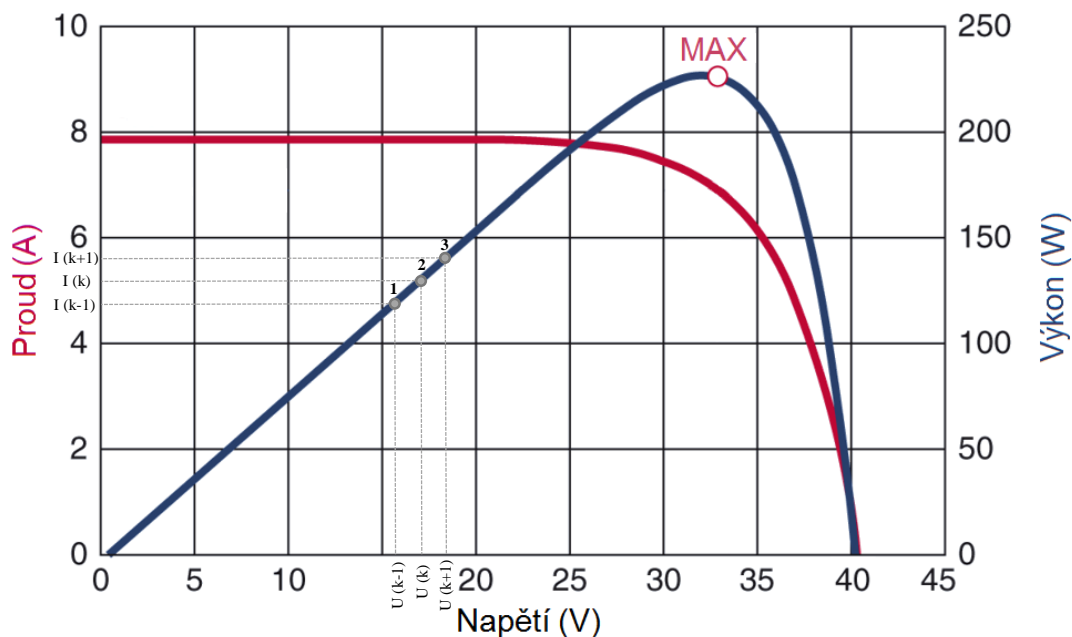
Použití levných měničů, které nevyhledávají bod maximálního výkonu, má za následek, že bude odebíraný výkon, a tím i účinnost, větší než bez měniče. V nejlepším případě, při použití MPPT měniče, je však účinnost o 30 až 50 % vyšší než u obyčejného měniče.

1.1.1 Princip

Výpočet maximálního výkonu v této aplikaci probíhá dle blokového schématu viz Obrázek 2. V úvahu bylo vzato napětí $U(k)$ a proud $I(k)$ tekoucí z panelu.



Obrázek 2: Blokové schéma funkce MPPT



Obrázek 3: VA-charakteristika při napětí $U(k)$ [2]

Na základě VA-charakteristiky (viz Obrázek 3) bude napětí na panelu $U(k)$ a panel bude dodávat odpovídající proud $I(k)$. Obě tyto hodnoty se načtou a vypočítá se z nich výkon $P(k)$, který je znázorněn bodem 2. Dále se zvýší napětí o jeden krok a načte se proud $I(k+1)$ a napětí $U(k+1)$, z těchto hodnot je vypočten výkon $P(k+1)$, bod 3. Pokud se výkon zvýší, opakuje se stejný postup. Pokud by se výkon snížil, sníží se napětí o dva kroky na $U(k-1)$ a začne se od začátku. Tímto způsobem by mělo být dosaženo bodu maximálního výkonu na voltampérové charakteristice. Důsledkem toho, že tento algoritmus bude vykonáván pořád dokola, je zaručeno, že bude odebírána maximální výkon z panelu i při snížení osvětlení nebo jiných změnách pracovních podmínek.

1.3 SEPIC

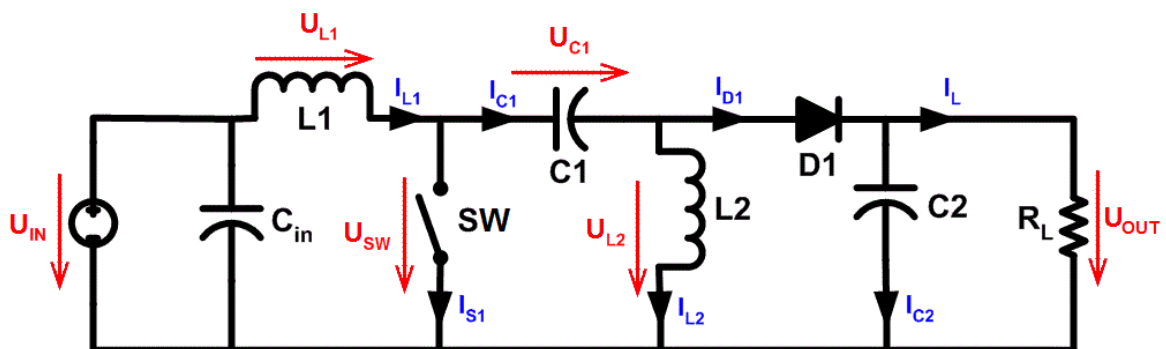
Funkci regulace napětí na solárním panelu v této práci obstarává měnič typu SEPIC. SEPIC (single-ended primary inductance converter) je topologie DC/DC měniče, jenž poskytuje regulované výstupní napětí, přičemž vstupní napětí může být nižší nebo vyšší než napětí výstupní. Tento typ konverze je užitečný v případě, kdy návrhář využívá neregulované vstupní napětí. Topologie SEPIC využívá dva induktoři, což zvětšuje plochu napájecího zdroje na desce plošných spojů. Nicméně existuje možnost dvou induktorů na jednom jádru, tzv. spojené

induktory. Nejen, že zabírají méně místa na DPS, ale dosahují stejného zvlněného proudu při poloviční indukčnosti v porovnání se dvěma samostatnými induktory [4].

SEPIC je v podstatě zvyšující měnič, za nímž je měnič snižující, tudíž je podobný tradičnímu buck-boost měniči, ale má výhodu například v tom, že výstup není invertovaný (polarita výstupního napětí je shodná s polaritou vstupního napětí).

1.3.1 Funkce

Podobně jako ostatní DC/DC měniče, SEPIC vyměňuje energii mezi kondenzátory a induktory k dosažení požadovaného napětí. Množství vyměněné energie je řízeno spínačem, který je realizován MOSFET tranzistorem.



Obrázek 4: Schéma měniče typu SEPIC [5]

SEPIC je v kontinuálním módu pokud proud cívky L_1 neklesne k nule. V ustáleném stavu je napětí na kondenzátoru C_1 rovno vstupnímu napětí. Jelikož kondenzátor C_1 blokuje stejnosměrný proud, je jeho průměrný proud roven nule, což způsobuje, že induktor L_2 je jediný zdroj stejnosměrného proudu. Tudíž průměrný proud tekoucí induktorem L_2 je stejný jako průměrný proud tekoucí zátěží a je tedy nezávislý na vstupním napětí. Vstupní napětí je rovno:

$$U_{IN} = U_{L1} + U_{C1} + U_{L2} \quad (1)$$

Jelikož průměrné napětí na kondenzátoru C_1 je rovno vstupnímu napětí, pak:

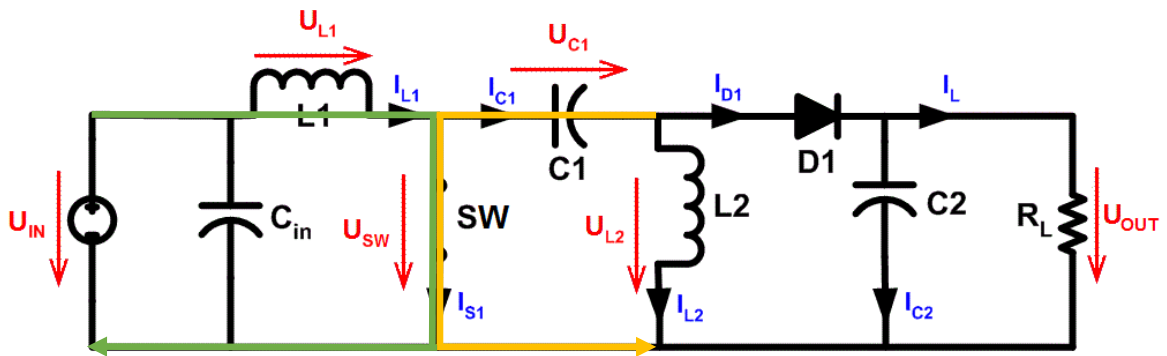
$$U_{L1} = -U_{L2} \quad (2)$$

Z čehož vyplývá, že oba induktory mohou být navinuty na společném jádře. Přestože napětí mají stejnou amplitudu, jejich vzájemná indukčnost bude rovna nule, za předpokladu, že

polarita jejich vinutí je správná. Přestože napětí induktorů má shodnou amplitudu, bude mít shodnou amplitudu i jejich zvlněný proud. Průměrné proudy mohou být vypočteny jako:

$$I_{D1} = I_{L1} - I_{L2} \quad (3)$$

Když je spínač SW v sepnutém stavu, proud cívkou L_1 roste a proud cívkou L_2 nabývá záporné hodnoty. Energie zvyšující proud cívkou L_1 přichází ze vstupu. Okamžité napětí na induktoru L_1 je skoro stejné jako vstupní napětí a U_{L2} je přibližně rovno $-U_{C1}$. Tudiž kondenzátor C_1 dodává energii, jež zvyšuje amplitudu proudu I_{L2} , a tím se zvyšuje energie uložená v induktoru L_2 .

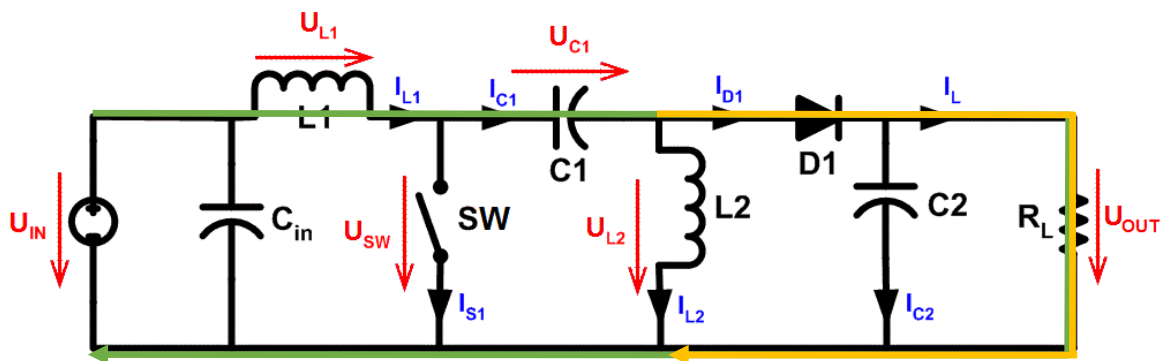


Obrázek 5: Spínač je v sepnutém stavu [5]

Jakmile je spínač rozeprtý, proud kondenzátorem C_1 se vyrovná proudu cívkou L_1 , jelikož induktor neumožňuje okamžitou změnu proudu. Proud induktoru L_2 stále teče v opačném směru a přidává k proudu cívky L_1 , jenž teče do zátěže. Proud tekoucí diodou lze poté zapsat jako:

$$I_D = I_{C1} - I_{L2} \quad (4)$$

Z toho vyplývá, že pokud je spínač v rozeprtém stavu, energie je do zátěže dodávána z obou induktorů. Současně je dobíjen kondenzátor C_1 , jenž v následujícím cyklu, když je spínač sepnutý, dodává energii induktoru L_2 .



Obrázek 6: Spínač v rozepnutém stavu [5]

Induktor L_1 a spínač SW společně tvoří zvyšující měnič, který generuje napětí U_{SW} , jenž je vyšší než vstupní napětí a jehož velikost je určena střídou spínacího signálu. Jelikož průměrné napětí kondenzátoru C_1 je rovno vstupnímu napětí, výstupní napětí poté bude:

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

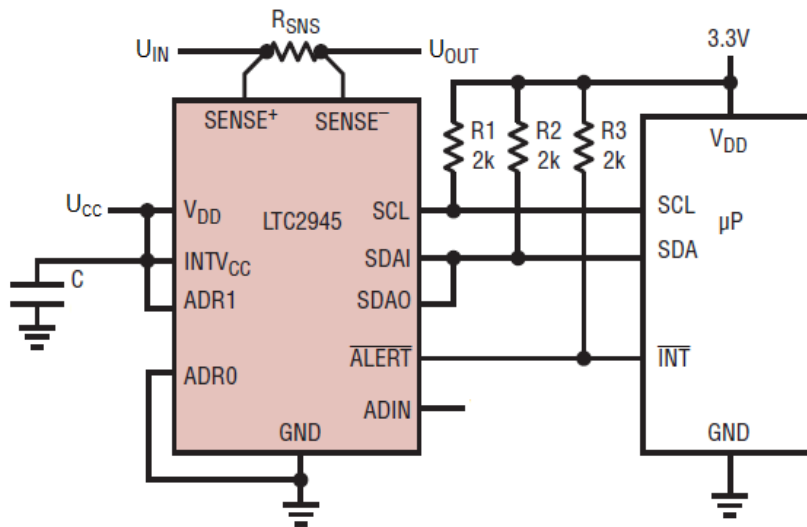
Pokud je napětí na spínači menší než dvojnásobek vstupního napětí, bude výstupní napětí menší než vstupní. Naopak, když je napětí na spínači větší než dvojnásobek vstupního napětí, bude výstupní napětí větší než vstupní [7].

1.4 Použité integrované obvody

1.4.1 LTC2945

Integrovaný obvod LTC2945 je určen k měření proudu, napětí a výkonu pracující v širokém pásmu napájecích napětí od 2,7 V do 80 V s možností napájení i z větších zdrojů napětí. Rozsah napětí měřených na rezistoru určeném pro měření proudu od 0 V do 80 V. V obvodu je integrovaný 12 bitový analogově-digitální převodník (ADC). Na rezistoru R_{SNS} je měřen úbytek napětí, z kterého je poté vypočítán proud a zároveň je na svorce SENSE⁺ měřeno napětí vůči společnému vodiči. Vnitřní logika automatiky generuje 24 bitovou hodnotu výkonu, jenž je digitálně vypočítávána z naměřených 12 bitových hodnot proudu a napětí [8]. Naměřená data jsou posílána přes sběrnici I²C.

V této práci byl obvod LTC2945 použit v konfiguraci dle Obrázek 7.



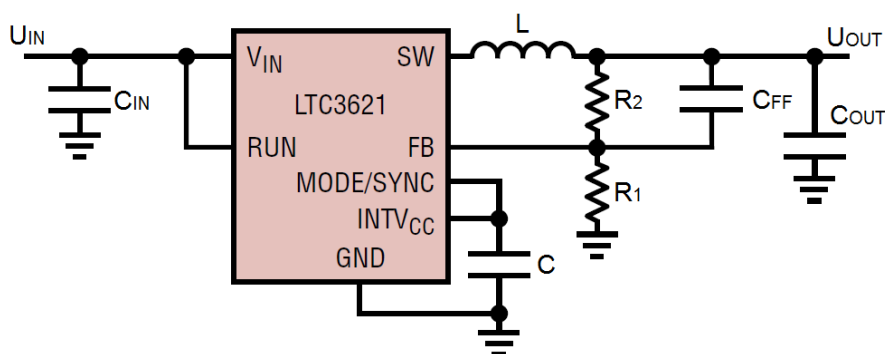
Obrázek 7: Zapojení obvodu LTC2945 [8]

Adresa zařízení pro sběrnici I²C se volí zapojením vývodů ADR0 a ADR1 do vývodu INTV_{CC}, společného vodiče nebo se vývody nechají plovoucí.

1.4.2 LT3621

Obvod LT3621 je snižující DC/DC měnič s vysokou účinností a konstantní frekvencí 1 MHz nebo 2.25 MHz. Obvod může být synchronizován také k externímu zdroji hodinového signálu. Vstupní napětí se může pohybovat od 2,7 V do 17 V a výstupní napětí může být od 0,6 V do U_{IN}. Proud dodávaný na výstup měniče dosahuje hodnoty 1 A.

Obvod je konfigurován dle Obrázek 8.



Obrázek 8: Zapojení obvodu LT3621 [9]

Výstupní napětí měniče se nastaví děličem napětí dle následujícího vztahu:

$$U_{OUT} = 0,6 \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (6)$$

Vstupní kondenzátor o hodnotě 10 μF je dostačující ve většině aplikací. Je třeba ho umístit blízko vodiče U_{IN} .

Výběr výstupního kondenzátoru je ovlivněn hodnotou ESR, jež minimalizuje zvlněné napětí, při různých úrovních zatížení, a tak zaručuje stabilitu zpětnovazební smyčky. Kapacita výstupního kondenzátoru o hodnotě 22 μF je dostačující pro většinu aplikací.

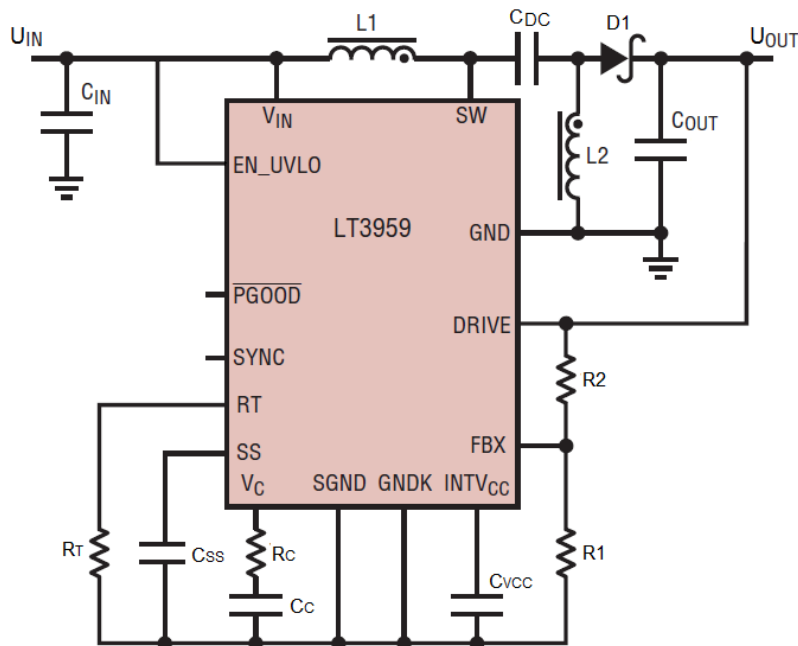
Na základě hodnot vstupního a výstupního napětí, frekvence spínání a zvlnění proudu, jež představuje 40 % maxima výstupního proudu, vypočítáme indukčnost cívky [9]:

$$L = \frac{U_{OUT}}{f \cdot \Delta I_{L(MAX)}} \left(1 - \frac{U_{OUT}}{U_{IN(MAX)}}\right) \quad (7)$$

1.4.3 LT3959

Obvod LT3959 je DC/DC měnič pracující ve zvyšujícím, SEPIC nebo invertujícím módu s velkým rozsahem vstupních a výstupních napětí. V obvodu je integrovaný „low side“ N - kanálový MOSFET pro napětí do 40 V a maximální proud 6 A. Měnič je schopen pracovat se vstupním napětím od 1,6 V do 40 V. Spínací frekvence je programovatelná od 100 kHz do 1 MHz nebo je možné ji synchronizovat s externím zdrojem pulsů.

Zapojení obvodu LT3959 viz Obrázek 9.



Obrázek 9: Zapojení obvodu LT3959 [10]

Konfigurace obvodu LT3959 v SEPIC módu umožňuje nižší, stejné nebo vyšší vstupní napětí než je požadované výstupní napětí. Převodní poměr je funkcí střídy pulsů:

$$\frac{U_{OUT} + U_D}{U_{IN}} = \frac{D}{1 - D} \quad (8)$$

Střída spínacích pulsů tranzistoru je závislá na výstupním napětí, vstupním napětí a napětí na diodě. Střída dosahuje svého maxima, pokud je na vstupu minimální napětí. Výpočet střídy dle vztahu:

$$D_{MAX} = \frac{U_{OUT} + U_D}{U_{IN(MIN)} + U_{OUT} + U_D} \quad (9)$$

Výstupní napětí je dáno napět'ovým děličem zapojeným mezi výstupním napětím, vstupem zpětné vazby a společným vodičem. Dělič musí být konfigurován tak, aby napětí mezi vstupem zpětné vazby a společným vodičem bylo napětí 1,6 V při požadovaném napětí na výstupu. Hodnoty rezistorů určíme následovně:

$$U_{OUT} = 1,6 \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (10)$$

Rezistor R_1 se nachází mezi vstupem zpětné vazby a společným vodičem, rezistor R_2 je mezi vstupem zpětné vazby a výstupem.

Ke správné funkci obvodu jsou požadovány dva induktory. Ty mohou být oddělené nebo navinuty na společném jádře, jelikož se na jednotlivých cívkách shodují napětí v průběhu spínacího cyklu. Proud tekoucí skrz cívku L_1 je vstupní proud měniče. Pokud budeme uvažovat, v ideálním případě, že vstupní výkon se rovná výstupnímu výkonu, pak maximální průměrný proud induktoru L_1 a L_2 získáme jako:

$$I_{L1(MAX)} = I_{IN(MAX)} = I_{OUT(MAX)} \cdot \frac{D_{MAX}}{1 - D_{MAX}} \quad (11)$$

$$I_{L2(MAX)} = I_{OUT(MAX)} \quad (12)$$

Pro výpočet indukčností L_1 a L_2 :

$$L_1 = L_2 = \frac{V_{IN(MIN)}}{0,5 \cdot \Delta I_{SW} \cdot f} \cdot D_{MAX} \quad (13)$$

Ke zvýšení účinnosti je třeba použít diodu určenou k rychlému spínání s nízkým úbytkem napětí v propustném směru. Je doporučeno, aby opakovatelné napětí diody v závěrném směru bylo větší než součet výstupního napětí, maximálního vstupního napětí a bezpečné napěťové rezervy.

$$U_{RRM} > U_{OUT} + U_{IN(MAX)} + U_{REZ} \quad (14)$$

Při výběru výstupního kondenzátoru musí být uvažován jeho ESR neboli ekvivalentní sériový odpor, jenž se vypočítá dle vztahu:

$$ESR_{COUT} \leq \frac{0,01 \cdot U_{OUT}}{I_{D(MAX)}} \quad (15)$$

Jeho kapacita se poté vypočte jako:

$$C_{OUT} \geq \frac{I_{O(MAX)}}{0,01 \cdot U_{OUT} \cdot f} \quad (16)$$

Kapacita vstupního kondenzátoru závisí na impedanci zdroje napětí a její hodnota se pohybuje od 10 μF do 100 μF .

Blokovací kondenzátor by měl být určen na napětí vyšší než je maximální napětí na vstupu.

$$U_{CDC} > U_{IN(MAX)} \quad (17)$$

Hodnotou odporu rezistoru R_T se volí frekvence spínání v rozsahu od 100 kHz do 1 MHz [10].

1.4.4 MCP41100 a MCP41010

MCP41100 a MCP41010 jsou digitální potenciometry s 256 nastavitelnými hodnotami odporu od 0 Ω do 100 k Ω a 10 k Ω . Odpor se nastavuje mikrokontrolérem přes SPI sběrnici. Napájecí napětí se pohybuje od 2,7 V do 5,5 V. Pokud se hodnota odporu dynamicky nemění, je odběr proudu 1 μ A [11].

1.5 Mikrokontrolér

K řízení činnosti měniče byl vybrán mikrokontrolér od firmy Microchip ATmega328P. ATmega328P je 8 bitový procesor založený na architektuře AVR RISC, jenž disponuje flash pamětí o velikosti 32 KB s možností současného čtení a zápisu, 1024 bajtovou EEPROM a 2 KB SRAM pamětí. Dále má mikrokontrolér 23 vstupně-výstupních vývodů, šest 10 bitových ADC převodníků, tři čítače [12]. Mikrokontrolér umožňuje interní nebo externí přerušení, komunikaci přes USART, SPI nebo I²C. Pracovní napětí se pohybuje v rozmezí od 1,8 V do 5,5 V.

Mikrokontrolér je naprogramován ve vývojovém prostředí Arduino IDE 1. 8. 5, jednak z důvodu veliké dostupnosti různých návodů pro práci s mikrokontrolérem a jeho periferiemi, množství knihoven funkcí volně dostupných na internetu, tak i z důvodu jednoduchosti programovacího jazyku, jenž nese prvky jazyků C, C++, Wiring a Processing.

Pro účely této práce pracuje mikrokontrolér s napájecím napětím 3,3 V, což je i napětí logické úrovně log.1. Dle katalogového listu je vhodné použít při tomto napájecím napětí, jako zdroj hodinových impulsů, krystal o kmitočtu 8 MHz.

Na vstupních a výstupních vývodech jsou zapojeny vodiče pro SPI a I²C komunikaci, zdroje externího přerušení a jeden vývod je užit jako ADC převodník a jeden jako PWM výstup. Dále jsou využity dva vývody TX s RX pro sériovou komunikaci, čímž bude mikrokontrolér schopen odesílat naměřená data do centrální řídicí jednotky.

K řízení obvodu LT3959 bude využit 16 bitový PWM výstup s frekvencí 244 Hz. Rozlišení 16 bitů umožňuje 2^{16} úrovní výstupního napětí. Tudíž lze zapsat hodnotu od 0 do 65536. Střední hodnota výstupního napětí se poté vypočítá dle vztahu:

$$U_{PWM} = \frac{U^+ - U^-}{2^{16}} \cdot \mu C_{hodnota} \quad (18)$$

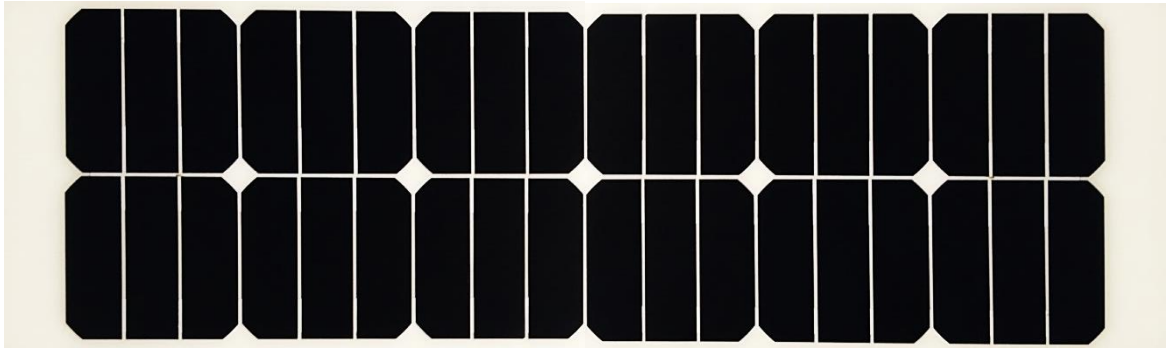
1.6 Solární panely

Solární panel je tvořen několika fotovoltaickými články zapojenými v sérii, které mohou být tvořeny polovodičovými nebo organickými prvky, které mění elektromagnetickou energii světla na energii elektrickou [13].

Solární panely se vyrábí z monokrystalických, polykrystalických nebo amorfních solárních článků. Monokrystalické články jsou z výše uvedených nejsložitější na výrobu, mají vysokou cenu, ale také mají nejvyšší účinnost a dlouhou životnost. Polykrystalické články nejsou tak složité na výrobu, nicméně s účinností nedosahují na monokrystalické články. Třetím typem jsou amorfní články, ty mají výhodu oproti předchozím, že jsou flexibilní a jednodušší na výrobu [14].

Pro využití solárních panelů v modelu letadla jsou vhodné takzvané flexibilní fotovoltaické panely, jednak jak již název napovídá z důvodu flexibility, ale také nízké hmotnosti a malé tloušťky.

Při výběru solárních panelů pro tuto práci byly zvažovány flexibilní fotovoltaické panely od firmy PowerFilm. Bohužel jmenovaná firma nebyla ochotna komunikovat, proto bylo třeba vybrat náhradu za zmíněné solární panely. Výsledkem hledání jsou dva semiflexibilní křemíkové solární panely od čínské firmy MARS Rock. Rozměry panelu jsou 275 mm x 900 mm, přičemž jeden panel je tvořen z 12 fotovoltaického článku viz Obrázek 10. Tloušťka panelu je 2,5 mm. Výrobce udává elektrické parametry jsou: napětí naprázdno 19,5 V a výkon 40 W.



Obrázek 10: Solární panel MARS Rock 19,5 V, 40 W

1.7 Popis přípravku

Na vstup realizovaného přípravku se budou připojovat solární panely, které budou zapojeny paralelně. Vstupní napětí je předpokládáno, na základě měření, maximálně 25 V, v této hodnotě je zahrnuta i 10 % napěťová rezerva. Proud přiváděný do přípravku je uvažován, na základě měření, 3,5 A s dostatečnou proudovou rezervou. Bude-li se uvažovat, že maximální proud, který je dodáván panelem, při maximálním osvětlení, je 1,44 A, bude proud, při paralelním zapojení dvou shodných panelů, 2,88 A. Takže zbývá dostatečná rezerva.

Proud dále teče do měřicího rezistoru o hodnotě 20 m Ω , na němž je měřeno napětí obvodem LTC2945, z napětí je poté vypočten proud, současně je tím samým obvodem měřeno napětí vůči společnému vodiči. Naměřené hodnoty jsou po sběrnici I²C odesílány do mikrokontroléru.

Proud pokračuje do měniče typu SEPIC realizovaného obvodem LT3959, jehož zpětná vazba je řízena z mikrokontroléru PWM signálem, který je vyhlazen RC článkem. Pokud bude třeba změnit napětí na solárním panelu, je třeba změnit napětí na kondenzátoru, jenž je paralelně připojen k panelu. Pokud bude obvod LT3959 přinucen, aby jeho spínací tranzistor spínal s větší šířkou pulsu, tudíž bude odváděno více náboje ze vstupního kondenzátoru, klesne na něm napětí a také klesne napětí na panelu. V opačném případě, když se zmenší šířka spínacích pulsů, bude odváděno méně náboje a napětí na kondenzátoru a panelu se zvýší.

SEPIC lze přinutit ke změně šířky spínacích pulsů tak, že bude regulována zpětná vazba. Zpětná vazba u obvodu LT3959 by měla být realizována, dle katalogového listu, napěťovým děličem zapojeným mezi výstupním napětím, vstupem zpětné vazby a společným vodičem. Napěťový dělič je počítán tak, aby na vstupu zpětné vazby bylo napětí 1,6 V, když je na výstupu požadované napětí. Této skutečnosti bylo využito a do vstupu zpětné vazby byl umístěn, místo

napěťového děliče, PWM výstup z mikrokontroléru, jenž je vyhlazen integračním RC článkem, čímž je možno spínač ovlivnit. Pokud bude třeba, aby spínač zvětšil střidu spínaného signálu, je na vstup zpětné vazby přivedeno napětí, jež je nižší než 1,6 V. Obvod se poté snaží zvýšit napětí na výstupu, zvětšením střidy spínacího signálu, čímž odebírá více náboje ze vstupu. Z toho vyplývá, že bude odebírat více náboje z kondenzátoru připojeného paralelně k solárnímu panelu a na panelu a kondenzátoru klesne napětí. Analogicky se dá uvažovat, při opačném problému, pokud je přivedeno vyšší napětí než 1,6 V na vstup zpětné vazby obvodu LT3959, obvod LT3959 má vysoké napětí na výstupu, sníží střidu spínacích pulsů, bude odebírat méně náboje ze vstupu a na panelu a vstupním kondenzátoru vzroste napětí. Tímto způsobem, probíhá regulace výkonu, jenž je odebírán ze solárního panelu.

Na výstupu obvodu LT3959 je umístěn měřicí rezistor proudu a měřicí obvod LTC2945, stejný jako na vstupu obvodu. Měřicí obvod zde slouží jednak pro informaci, jaký proud teče do akumulátoru a jaké má akumulátor napětí, tudíž jaký je stav jeho nabití. Ale také se naměřené údaje dají využít k možnému vypnutí obvodu, pokud by bylo příliš vysoké nebo nízké napětí na akumulátoru a hrozila by jeho destrukce.

Za zmíněným měřicím rezistorem se nachází svorka pro připojení akumulátoru, jenž slouží k uložení energie získané ze solárních panelů a také jako zdroj energie pro samotný přípravek a ostatní spotřebiče solárního letadla včetně řídicí jednotky, pohonné jednotky a motoru.

Hlavním ovládacím prvkem přípravku je mikrokontrolér, který na základě informací z měřicích obvodů nastavuje střidu PWM signálu přiváděného na vstup zpětné vazby obvodu LT3959. Dále je možnost nastavit z mikrokontroléru spínací frekvenci obvodu LT3959 tím, že se z mikrokontroléru odešlou data, která změní odpor digitálních potenciometrů. Tyto potenciometry jsou připojeny k obvodu LT3959, kde změnou odporu mezi vývody RT a SGND dochází ke změně spínací frekvence. K samotnému mikrokontroléru je připojen programovací konektor ICSP s vývody MOSI, MISO, SCK, RESET, UCC a GND. Tento konektor je rozšířen o vývody TX a RX, přes které je možné odečítat změřená data řídicí jednotkou.

Dále jsou k mikrokontroléru připojeny dva zdroje externích přerušení, kde generátory těchto přerušení jsou měřicí obvody LTC2945. Obvody generují přerušení, pokud dojde k překročení nějakého nastaveného limitu. Tyto limity v současné době nejsou nastaveny, přerušení není generováno. Pokud by byl překročen jakýkoliv limit, bude tato informace zjištěna z naměřených

dat. Na vstup ADC převodníku mikrokontroléru je připojen napěťový dělič, pomocí kterého je možno měřit napětí na výstupu obvodu LT3959. Nicméně, napětí na výstupu tohoto obvodu je již měřeno obvodem LTC2945, tudíž je tento ADC převodník v současné době nevyužit. Posledním prvkem, který je na jeden ze vstupů mikrokontroléru připojen, je vývod, s názvem SYNC patřící obvodu LT3959. Tento vývod slouží k synchronizaci obvodů, kdy generováním pulsů z mikrokontroléru je zmíněný obvod synchronizován k náběžné hraně řídicího pulsu. Avšak tato funkce není v současné době využita.

Schéma popsaného zapojení přípravku viz Příloha 2.

1.8 Akumulátor

Nejčastěji používané akumulátory v RC letadlech jsou akumulátory typu Li-Pol. Tyto akumulátory disponují vysokými vybíjecími proudy, které jsou vhodné pro elektromotory. A proto pro uchování energie získané ze solárních panelů byl zvolen tří článkový Li-Pol akumulátor FOXY G2 o nominálním napětí 11,1 V a kapacitě 2600 mAh. Nabíjecí proud je maximálně 5,2 A, vybíjecí proud je 104 A, chvilkově je to maximálně 208 A. Hmotnost akumulátoru je 208 g.

1.9 Plošný spoj

DPS neboli deska plošných spojů se v elektrotechnice používá pro mechanické připevnění a současně pro elektrické propojení elektronických součástek [15].

K návrhu plošného spoje se v dnešní době využívá nejčastěji program. Program usnadňuje práci a kontroluje uživatele při návrhu, aby se nedopustil závažné chyby [16]. Pro návrh výrobku, který je součástí této práce bylo použito prostředí CADENCE OrCAD Lite 16.6, jenž je možné stáhnout z webu výrobce. Lite verze je omezena maximálním počtem padesáti součástek v návrhu.

Plošný spoj, jenž byl navrhnout pro účely této práce, je uveden v Příloha 3, kde se nachází vrstva spojů TOP, vrstva spojů BOTTOM (viz Příloha 4), v Příloha 5 je uvedena soupiska použitých součástek a jejich hodnot.

1 Praktická část

2.1 Konfigurace a výpočty

2.1.1 LTC2945

Obvod LTC2945 byl v této práci použit dvakrát. Jednak pro měření vstupního napětí a proudu a také pro měření výstupního napětí a proudu.

Konfigurace obvodu (viz Obrázek 7) se liší zapojením vývodů ADR0 a ADR1 u jednotlivých zařízení, z důvodu konfigurace I²C adresy.

U vstupního měřicího obvodu je vývod ADR0 připojen ke společnému vodiči a vývod ADR1 je připojen ke vnitřnímu zdroji napětí. Dle katalogového listu určuje tato kombinace adresních vývodů 7 bitovou adresu I²C zařízení jako B1100111.

Výstupní měřicí obvod má adresní vývody ADR0 a ADR1 připojeny ke společnému vodiči. 7 bitová adresa zařízení je B1101111.

Pro získání dat z měřicího obvodu se odešle adresa registru, z něhož budou data vyčtena, na adresu daného měřicího obvodu. Naměřené hodnoty proudu se nachází v registrech Δ SENSE MSB a Δ SENSE LSB, jejichž hexadecimální adresy jsou 14h a 15h. V registru Δ SENSE MSB se nachází osm horních bitů z 12 bitové naměřené hodnoty a v registru Δ SENSE LSB se v horních čtyřech bitech nachází zbylé čtyři bity. Rozlišení měření proudu je 25 μ V, což je váha nejnižšího bitu. Při měření proudu na rezistoru s odporem 20 m Ω je rozlišení proudu 1,25 mA.

Obdobně probíhá měření napětí, kdy naměřené hodnoty jsou uloženy v registrech V_{IN} MSB a V_{IN} LSB. Hexadecimální adresy těchto registrů jsou 1Eh a 1Fh. 12 bitová hodnota napětí je rozdělena v těchto registrech, tak jak tomu bylo u hodnot proudu. Rozlišení měření napětí je 25 mV.

2.1.2 LT3621

Tento obvod byl zvolen pro napájení ostatních obvodů. Pokud se bude uvažovat, že napětí akumulátoru je 11,1 V, na výstupu měniče může být pro účely této práce 5 V nebo 3,3 V. Všechny obvody podporují obě zmíněná napájecí napětí, tudíž bylo zvoleno napětí 3,3 V. Na

základě vztahu (6) byly zvoleny hodnoty rezistorů, které tvoří napěťový dělič tak, aby výstupní napětí odpovídalo požadavkům.

$$U_{OUT} = 0,6 \cdot \left(1 + \frac{300000}{68000}\right) \doteq 3,25 \text{ V}$$

Byly zvoleny rezistory z řady E24 s 1 % tolerancí. Odpor rezistoru R_1 je $68 \text{ k}\Omega$ a odpor rezistoru R_2 je $300 \text{ k}\Omega$. Výstupní napětí obvodu LT3621 bylo vypočteno jako $3,25 \text{ V}$, což pro účely této práce není problém, jelikož mají všechny použité obvody širokou škálu vstupních napětí.

Indukčnost cívky se vypočítá dle vztahu (7), pokud bude uvažováno maximální vstupní napětí $12,6 \text{ V}$, při maximálním napětí $4,2 \text{ V}$ na článku.

$$L = \frac{3,25}{2,25 \cdot 10^6 \cdot 0,4} \left(1 - \frac{3,25}{12,6}\right) = 2,68 \mu\text{H}$$

Byl zvolen induktor s nejbližší hodnotou indukčnosti $2,7 \mu\text{H}$ a pracovním proudem 450 mA , což je pro napájení mikrokontroléru, měřicích obvodů a digitálních potenciometrů dostačující.

2.1.3 LT3959

Výpočty pro tento obvod jsou pouze orientační, protože se vychází ze vztahů uvedených v katalogovém listu, kde se počítá s tím, že se parametry obvodu nebudou v průběhu činnosti měnit. Tudíž je třeba zvolit takzvanou střední cestu, kdy obvod bude fungovat za všech podmínek. To se bude odvíjet například při výběru induktoru, kdy se musí počítat s proměnlivou střídou a induktor musí být schopen pracovat s nízkou i vysokou střídou spínacího signálu. Důsledkem toho jsou některé parametry komponent předimenzovány.

Výpočet maximální střídy měniče typu SEPIC je závislý na minimálním vstupním napětí, výstupním napětí a napětí na diodě. Pokud bude třeba maximální rozsah vstupních napětí, pro případ, kdy bude nízká úroveň osvětlení, tak minimální vstupní napětí obvodu je dle katalogového listu $1,6 \text{ V}$. Nicméně, pokud by se provedly výpočty a navrhly parametry součástek pro případ s minimálním napětím na vstupu, jenž je rovno $1,6 \text{ V}$, výstupní proud by byl maximálně $0,5 \text{ A}$, což není příliš uspokojivá hodnota. Avšak dle měření voltampérové charakteristiky lze vycházet z toho, že bod maximálního výkonu se pohybuje od napětí cca 13 V do napětí cca 19 V při různém osvětlení panelu. Dle těchto naměřených hodnot lze

[Martin Čurda] 28

uvažovat, že se bude napětí na vstupu pohybovat ve zmíněném rozmezí. Jak již bylo řečeno, výpočty jsou orientační, tudíž drobná odlišnost od výsledku je brána v potaz, a proto se může pro lepší počítání zvolit nejnižší vstupní napětí obvodu, jako 11,675 V. Výstupní napětí je dáno součtem napětí tří Li-Pol článků, které jsou zapojené do série. Jmenovité napětí jednoho článku je 3,7 V, tudíž celkové napětí je 11,1 V. Úbytek napětí na Shottkyho diodě B560C-13-F v propustném směru je dle katalogového listu typicky 0,575 V při proudu 5 A a teplotě 25 °C. Dosazením těchto hodnot do rovnice (9) vznikne:

$$D_{MAX} = \frac{11,1 + 0,575}{11,675 + 11,1 + 0,575} = \frac{11,675}{23,35} \doteq 0,5$$

Proud tekoucí do vstupu obvodu, je maximální proud dodávaný solárními panely zapojenými paralelně. Na základě měření voltampérové charakteristiky fotovoltaického panelu při zkratu dostaneme, s dostatečnou rezervou, maximální proud 3,5 A. Proud induktoru L_1 poté lze vypočítat z rovnice (11):

$$I_{L1(MAX)} = 3,5 \text{ A}$$

Spojením rovnic (11) a (12) se dostane vztah pro výpočet proudu druhého induktoru:

$$I_{L2(MAX)} = I_{IN(MAX)} \cdot \frac{1 - D_{MAX}}{D_{MAX}} = 3 \cdot \frac{0,5}{0,5} = 3 \text{ A}$$

Indukčnost obou induktorů se rovná. Pro větší variabilitu obvodu, kdy obvod může pracovat při různých frekvencích, je třeba uvažovat případ největší indukčnosti, který nastane při nejnižší hodnotě frekvence, což je 500 kHz. Obvod by sice mohl pracovat i při nižších frekvencích, avšak induktory by musely mít větší indukčnost, a tudíž větší rozměry.

$$L_1 = L_2 = \frac{11,675}{0,5 \cdot 0,6 \cdot 5 \cdot 10^5} \cdot 0,5 = 38,9 \mu\text{H}$$

Opakovatelné napětí v závěrném směru se počítá dle rovnice (14), napěťová rezerva by se měla pohybovat okolo 10 V, pokud se vychází z měření VA-charakteristiky charakteristiky panelu, mělo by být maximální napětí na solárním panelu 22,7 V. V tomto případě se bude uvažovat maximální vstupní napětí obvodu měniče (napětí na solárním panelu), jako 25 V.

$$U_{RRM} > 11,1 + 25 + 10$$

$$U_{RRM} > 46,1 V$$

Byla zvolena dioda, jejíž opakovatelné napětí v závěrném směru je $U_{RRM} = 60 V$.

ESR výstupního kondenzátoru se vypočte ze vzorce (15):

$$ESR_{COUT} \leq \frac{0,01 \cdot 11,1}{3,5}$$

$$ESR_{COUT} \leq 0,032 \Omega$$

Z důvodu měnitelné frekvence se uvažuje možnost, kdy je frekvence nejnižší, čímž se dostane vyšší hodnota kapacity. Dosazením do vzorce (16) se vypočte hodnota výstupního kondenzátoru:

$$C_{OUT} \geq \frac{3}{0,01 \cdot 11,1 \cdot 5 \cdot 10^5}$$

$$C_{OUT} \geq 54 \mu F$$

Nakonec byl vybrán kondenzátor s kapacitou $560 \mu F$ a $ESR = 15 m\Omega$, určený pro napětí do $25 V$.

2.1.4 MCP41100 a MCP41010

Digitální potenciometry slouží k simulaci rezistoru R_T u obvodu LT3959 a změně jeho odporu. Změnou velikosti odporu tohoto rezistoru je možné měnit pracovní frekvenci tohoto obvodu od $100 kHz$ do $1 MHz$. Kde pro $100 kHz$ by měla být hodnota rezistoru R_T $86,6 k\Omega$ a pro frekvenci $1 MHz$ je to hodnota $6,81 k\Omega$. Digitální potenciometr MCP41100 o rozsahu 0Ω až $100 k\Omega$ s 256 úrovněmi byl uvažován na hrubé nastavení odporu a obvod MCP41010 o rozsahu 0Ω až $10 k\Omega$ také s 256 úrovněmi slouží k jemnému nastavení odporu.

V testovací verzi obvodu mělo ovládání spínací frekvence řídit odebrání náboje ze vstupního kondenzátoru, a tím nastavovat napětí na panelu. Nicméně ovládání zpětné vazby obvodu plní tuto funkci lépe, tudíž se pracuje s konstantní frekvencí a se změnou střídy spínacího signálu. Změna pracovní frekvence může být v budoucnu využita k testování změny účinnosti obvodu, či k jiným funkcím.

Pro práci obvodu LT3959 při frekvenci 500 kHz musí být odpor rezistoru RT roven 16,5 k Ω . Je zvolena tedy nejbližší nižší hodnota u digitálního potenciometru MCP41100 a zbytek je dorovnán potenciometrem MCP41010 zařazeným v sérii.

K nastavení hodnoty odporu se využívá vodičů MOSI, MISO, SCK a CS sběrnice SPI. U obvodu, který má přijímat data, sepne vodič CS do stavu log.0. Dle katalogového listu je odeslán konfigurační bajt, který určuje následující operaci obvodu. Na výběr jsou dvě operace, zápis dat nebo vypnutí obvodu. Tudíž pro zápis dat do obvodu MCP41100 je odeslán konfigurační bajt ve tvaru B00010001 a následně je zapsána hodnota zvoleného odporu v binárním tvaru B00101010, což je 16406 Ω . U digitálního potenciometru MCP41010 je odeslán stejný konfigurační bajt B00010001, jako v předchozím případě, a zapsán binárně odpor B00000010, tj. 78 Ω . Následkem toho, že jsou potenciometry zapojeny v sérii, se odpory sčítají, z toho vychází odpor 16,5 k Ω .

2.2 Řízení měniče typu SEPIC

Jak již bylo napsáno v kapitole 1.7, šířka spínacích pulsů obvodu LT3959 je řízena napětím na vstupu zpětné vazby (FBX). Referenční napětí komparátoru zpětné vazby, který se nachází uvnitř obvodu je 1,6 V. Tudíž řídicí napětí bude vyšší nebo nižší než napětí referenční. Pro větší rozlišení a generování malých změn napětí byl využit 16 bitový PWM výstup mikrokontroléru s frekvencí 244 Hz, za nímž je umístěn integrační RC článek k vyhlazení výstupního napětí. Čím nižší zvlnění bude, tím bude zpětná vazba obvodu LT3959 stabilnější, nicméně pokud bude nastavena hodnota v mikrokontroléru, je možno důsledek nastavené hodnoty vyčíst ze změřené hodnoty napětí a výkonu. Tímto způsobem sice není zajištěna kontrola nastavené hodnoty, ale je zajištěna kontrola způsobené změny, což je důležitější. Z čehož vyplývá, že zvlněné napětí na vstupu zpětné vazby obvodu LT3959 není kritické.

Požadovaná střední hodnota PWM signálu je nastavena hodnotou v mikrokontroléru, v rozmezí od 0 do 65536, což odpovídá napětí od 0 V do 3,25 V. V tomto případě se střední hodnota napětí PWM signálu pohybuje kolem 1,6 V. Tento signál je poté přiváděn na vstup zpětné vazby obvodu LT3959, a tím je řízena střída signálu spínacího tranzistoru.

2.3 Firmware

Firmware řídící správnou funkci obvodu byl programován ve vývojovém prostředí Arduino IDE. K funkci samotného programu byly použity open source knihovny Wire.h a SPI.h. Knihovna Wire.h zjednodušuje programování zařízení, které využívá sběrnici I²C a knihovna SPI.h obsahuje příkazy pro práci se sběrnici SPI.

V úvodu programu jsou importovány zmíněné knihovny funkcí a definovány konstanty a proměnné, s nimiž bude program pracovat. Dále jsou nastaveny funkce vstupních a výstupních vývodů. Je nastavena inicializace sběrnic SPI, I²C a UART. UART slouží k sériové komunikaci a odesílá naměřená data do řídicí jednotky. Rychlost sériové komunikace je nastavena na 115200 baudů. Inicializovány jsou také hodnoty odporů digitálních potenciometrů MCP41100 a MCP41010 k nastavení pracovní frekvence obvodu LT3959.

Hlavní cyklus programu, jenž je vykonáván dokola, začíná proměřením celého panelu. To znamená, že je panel různě zatížen, kdy je na solárním panelu nastaveno napětí od nejvyššího po nejmenší, po čtrnácti hodnotách, a mikrokontrolér zjistí, kde se přibližně vyskytuje maximum výkonu. Po vyhledání největší z hodnot výkonu, mikrokontrolér nastaví odpovídající napětí na panelu.

Poté následuje přesné dohledání maxima, dle algoritmu, jenž je popsán v kapitole 1.1.1 s odlišností v tom, že je změřený výkon průměrován, kvůli potlačení náhodných chyb měření. Nejdůležitější část zdrojového kódu obstarávající tuto funkci je uvedena zde:

```
if (soucetNapeti > soucetNapetiB) {
    if (soucetVykonu > soucetVykonuB ) {
        stav = 1;
    } else if (soucetVykonu < soucetVykonuB) {
        hodnota -= 5;
        stav = 0;
    }
} else if (soucetNapeti < soucetNapetiB) {
    if (soucetVykonu < soucetVykonuB) {
        hodnota += 2;
        stav = 1;
    } else if (soucetVykonu > soucetVykonuB) {
        hodnota -= 1;
        stav = 0;
    }
}
```


Proměnná jménem *soucetNapeti* je hodnota aktuálního napětí, *soucetNapetiB* je napětí v předchozím kroku. To stejné platí i pro hodnoty výkonu. Proměnná *stav* pouze informuje o tom, zda bylo zvýšeno nebo sníženo napětí.

Zbývající část programu obsahuje potřebné metody k vyčítání napětí, výkonu a proudu z měřicích obvodů. Celý firmware, který je nahráný v mikrokontroléru, je uveden v Příloha 6.

2.4 Měření voltampérové charakteristiky solárních panelů

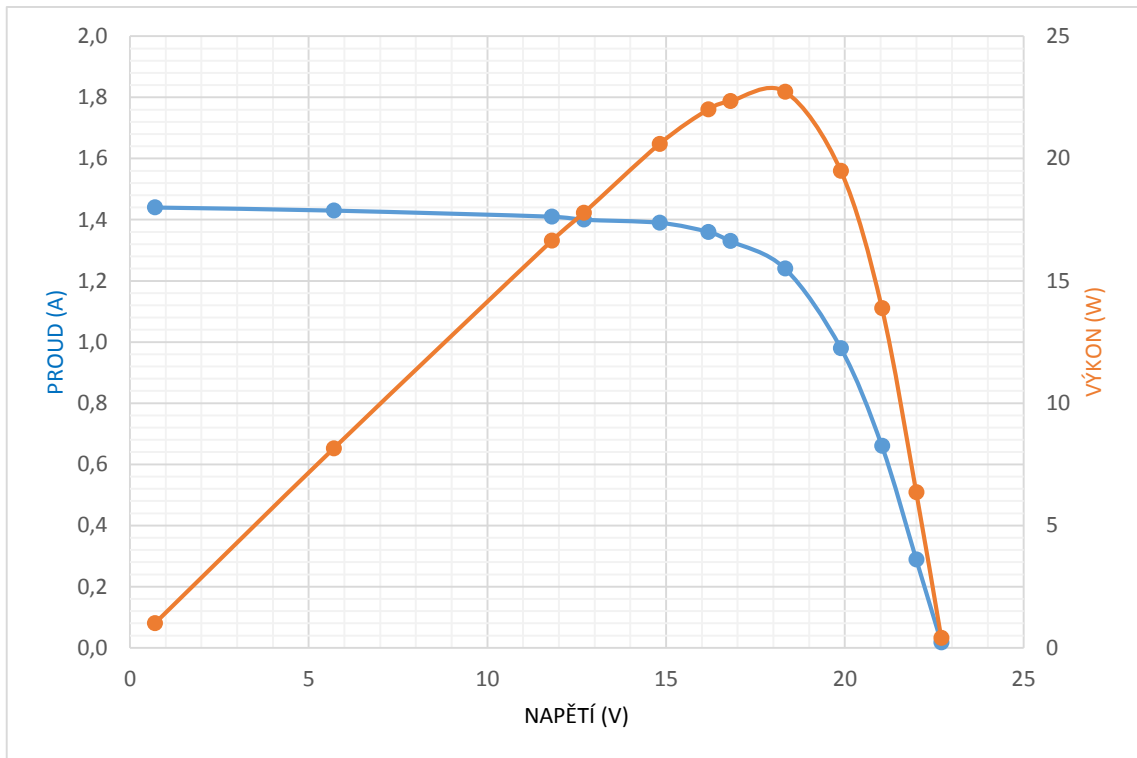
Všechna prováděná měření jsou pouze orientační. Na základě předpokladu toho, že mají oba panely stejné parametry, bylo provedeno měření voltampérové charakteristiky pouze na jednom z panelů. Jelikož se nedá zaručit konstantní osvětlení, při měření na přímém slunci, z důvodu možností zastínění panelu mraky, byla část měření provedena venku a část v simulovaných podmínkách. Při měření venku na přímém slunci byla hodnota osvětlení panelu 12000 lx, obloha byla bez přítomnosti mraků, tudíž se dá považovat tato hodnota osvětlení za maximální. Naměřené hodnoty napětí a proudu, včetně vypočítaného výkonu jsou uvedeny v následující tabulce. Výkon byl vypočítán dle vztahu (19):

$$P = U \cdot I \quad (19)$$

Tabulka 1: Naměřené hodnoty napětí a proudu včetně vypočítaného výkonu při osvětlení 12000 lx

č. měření	Napětí (V)	Proud (A)	Výkon (W)
1	22,7	0,02	0,4
2	22,0	0,29	6,4
3	21,0	0,66	13,9
4	19,9	0,98	19,5
5	18,3	1,24	22,7
6	16,8	1,33	22,3
7	16,2	1,36	22,0
8	14,8	1,39	20,6
9	12,7	1,40	17,8
10	11,8	1,41	16,6
11	5,7	1,43	8,2
12	0,7	1,44	1,0

Závislost proudu na napětí a výkonu na napětí je znázorněna v grafu viz Obrázek 11.



Obrázek 11: Závislost proudu na napětí a výkonu na napětí při osvětlení 12000 lx

V grafu (viz Obrázek 11) je vidět, že bod maximálního výkonu se při daném osvětlení nachází kolem napětí 18 V.

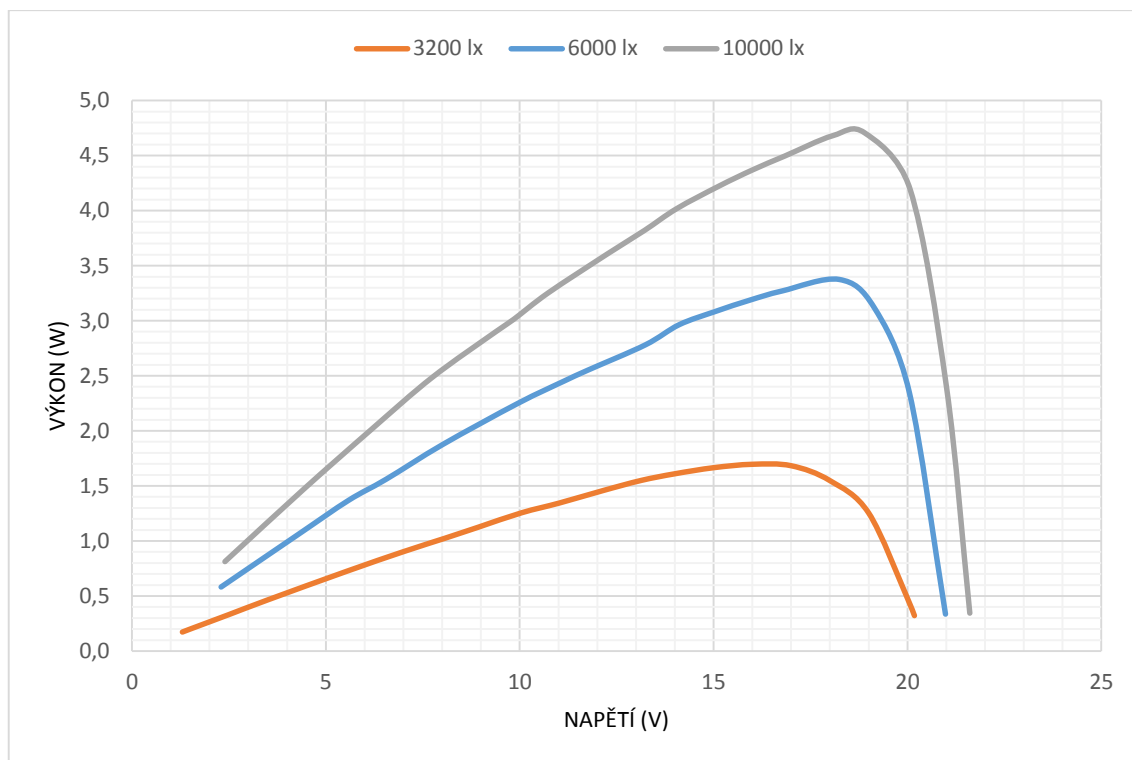
Dále byl požadavek změřit voltampérové charakteristiky solárních panelů při různém osvětlení, což není na přímém slunci jednoduché. Proto byly vytvořeny simulované podmínky, kdy Slunce bylo nahrazeno halogenovou žárovkou s reflektorem o výkonu 1000 W. Svit žárovky byl regulován změnou napájecího napětí pomocí autotransformátoru. Byly naměřeny hodnoty proudu a napětí pro tři různá osvětlení. První měření bylo provedeno pro osvětlení 3200 lx, žárovka byla ve vzdálenosti 106 cm od panelu, tudíž se dá předpokládat, že osvětlení celého panelu bylo homogenní. Pro druhé měření bylo třeba přiblížit žárovku blíže k panelu, aby bylo dosaženo většího osvětlení. Zdroj světla byl umístěn ve vzdálenosti 48 cm od panelu, nicméně osvětlení nebylo stejné po celé ploše. Uprostřed panelu byla hodnota osvětlení 10000 lx, kdežto na krajích bylo osvětlení pouze 4000 lx. Při třetím měření zůstala žárovka na stejném místě, pouze bylo sníženo napájecí napětí a byly změřeny hodnoty pro osvětlení 6000 lx, s tím, že na

kraji panelu byla hodnota osvětlení pouze 2000 lx. Vypočtený výkon z naměřených hodnot napětí a proudu pro tři různá osvětlení panelu je uveden v následující tabulce.

Tabulka 2: Vypočtené hodnoty výkonu pro různá osvětlení solárního panelu

č. měření	Napětí (V)	$P_{3200 \text{ lx}}$ (W)	$P_{6000 \text{ lx}}$ (W)	$P_{10000 \text{ lx}}$ (W)
1	22	-	-	0,35
2	21	-	0,34	2,40
3	20	0,48	2,35	4,19
4	19	1,25	3,12	4,71
5	18	1,55	3,37	4,68
6	17	1,68	3,27	4,50
7	16	1,70	3,19	4,37
8	15	1,67	3,08	4,22
9	14	1,61	2,96	4,02
10	13	1,55	2,78	3,82
11	12	1,46	2,55	3,61
12	11	1,34	2,45	3,25
13	10	1,26	2,25	3,01
14	8	1,02	1,88	2,48
15	6	0,72	1,37	2,01
16	4	0,47	1,05	1,47
17	2	0,20	0,58	0,81
18	1	0,17	-	-

Závislost výkonu na napětí pro různá osvětlení viz Obrázek 12.



Obrázek 12: Závislost výkonu na napětí pro různá osvětlení solárního panelu

Naměřené hodnoty byly ovlivněny jednak nehomogenním osvětlením solárního panelu a také spektrem, které vyzařuje halogenová žárovka. Spektrum této žárovky se liší od spektra slunečního záření, tudíž jsou naměřené hodnoty v simulovaných podmínkách nižší, než by byly naměřeny při stejném osvětlení na přímém slunci. Ale i tak tato část měření potvrdila, že změnou osvětlení panelu se mění křivka výkonu, což musí MPPT měnič hlídat.

2.5 Měření parametrů přípravku

Při ožiování přípravku (viz Příloha 1) bylo zjištěno, že samotný obvod nebude pracovat správně, pokud není připojený k akumulátoru. Přičemž napětí akumulátoru se může pohybovat v rozmezí od 3,3 V do 17 V. Toto rozmezí je dáno obvodem LT3621, který je schopen z maximálního povoleného napětí na vstupu, což je 17 V, vytvořit požadované napětí 3,3 V na výstupu, které slouží jako napájecí pro ostatní obvody. Dolní hranice je dána tím, že tento obvod je snižující měnič, pokud má být na výstupu 3,3 V, musí být na vstupu minimálně tato hodnota.

Připojením akumulátoru k přípravku je zajištěno napájení pro ostatní obvody a mikrokontrolér. Obvod LT3959 je schopen napájet sám sebe ze solárního panelu, nicméně je potřeba, aby byl

zapnutý i mikrokontrolér, protože generuje zpětnou vazbu pro zmíněný obvod. Pokud by tak nebylo, mohlo by dojít k destrukci celého přípravku, jelikož by bylo na výstupu obvodu LT3959 vysoké napětí. Toto napětí by bylo příliš vysoké pro obvod LT3621, čímž by mohlo dojít k jeho průrazu, a tím by se toto napětí dostalo i na jeho výstup. To by nejspíš znamenalo konec i pro ostatní obvody.

Při měření k prokázání správné funkce přípravku, došlo k destrukci obvodu LT3959 měřicím přístrojem. Měřicí přístroj měl mezi měřicími svorkami napětí 3,2 V, které bylo důsledkem neznalosti, přiloženo na jeden ze vstupů zmíněného obvodu, čímž došlo k jeho zničení. Po výměně obvodu LT3959 došlo k jeho další destrukci, při měření osciloskopem. Příčina této destrukce však není známa.

K ověření funkce přípravku byla nakonec zvolena jiná cesta. Mikrokontrolér soustavně odesílá naměřená data po sériové lince, čímž je možno tato data vyčíst. A jelikož naměřené hodnoty v daných částech obvodu souhlasí, dají se považovat za důkaz funkce obvodu. Odečtením naměřených hodnot ze sériové linky lze vidět, že obvod pracuje dle předpokladu. Mikrokontrolérem jsou odesílány informace o vstupním výkonu a napětí a výstupním výkonu a napětí, z nichž lze vyčíst všechny potřebné údaje k dalším účelům. Přípravek změří solární panely při různém zatížení v rozmezí hodnot napětí, při kterých nastává maximum výkonu při různých osvětleních. Zjistí, při jakém zatížení odebíral nejvíce výkonu a poté nastaví tuto hodnotu zatížení. Zmíněné proměření voltampérové charakteristiky solárního panelu trvá přibližně 2 s. Dále dochází k cyklu, jenž trvá 40 s, kdy se přípravek snaží jemně nastavit zatížení pro odběr maximálního výkonu. Použitým algoritmem je způsobeno to, že při neustálém nastavování zatížení dochází občas k přílišnému odebírání náboje anebo nedostatečnému odebírání náboje. Což způsobuje, že se výkon, jenž je odebírán ze solárních panelů, pohybuje kolem maxima. Vzniklými výchyly někdy dojde k tomu, že není zrovna odebírán maximální výkon. Proto bylo uděláno opatření, kdy po každém cyklu jemného nastavování dojde znova ke změření celého solárního panelu, kdyby náhodou došlo v předchozí fázi k vychýlení. Fáze měření a jemného nastavení se střídají pořád dokola v průběhu celého průběhu programu.

```
COM5 (Arduino/Genuino Mega or Mega 2560)
vykon_IN: 1.70 // napeti_IN: 16.18 // proud_IN: 0.104 // vykon_OUT: 1.52 // napeti_OUT: 11.25 // proud_OUT: 0.135
promereni VA-charakteristiky panelu:
Vykon: 1.129 // Napeti: 18.44 // Proud: 0.061
Vykon: 0.753 // Napeti: 19.76 // Proud: 0.038
Vykon: 1.031 // Napeti: 19.41 // Proud: 0.053
Vykon: 1.406 // Napeti: 18.75 // Proud: 0.075
Vykon: 1.817 // Napeti: 16.90 // Proud: 0.108
Vykon: 1.788 // Napeti: 15.30 // Proud: 0.117
Vykon: 1.776 // Napeti: 14.43 // Proud: 0.123
Vykon: 1.669 // Napeti: 13.63 // Proud: 0.123
Vykon: 1.551 // Napeti: 12.23 // Proud: 0.127
Vykon: 1.327 // Napeti: 9.93 // Proud: 0.134
Vykon: 0.798 // Napeti: 5.53 // Proud: 0.144
Vykon: 0.330 // Napeti: 2.50 // Proud: 0.132
Vykon: 0.336 // Napeti: 2.61 // Proud: 0.129
Vykon: 0.395 // Napeti: 2.73 // Proud: 0.145

vykon_IN: 1.56 // napeti_IN: 15.99 // proud_IN: 0.090 // vykon_OUT: 1.36 // napeti_OUT: 11.23 // proud_OUT: 0.121
vykon_IN: 1.51 // napeti_IN: 16.45 // proud_IN: 0.089 // vykon_OUT: 1.39 // napeti_OUT: 11.23 // proud_OUT: 0.124
vykon_IN: 1.49 // napeti_IN: 16.74 // proud_IN: 0.100 // vykon_OUT: 1.42 // napeti_OUT: 11.23 // proud_OUT: 0.126
vykon_IN: 1.62 // napeti_IN: 17.44 // proud_IN: 0.097 // vykon_OUT: 1.50 // napeti_OUT: 11.23 // proud_OUT: 0.134
vykon_IN: 1.62 // napeti_IN: 17.27 // proud_IN: 0.096 // vykon_OUT: 1.46 // napeti_OUT: 11.23 // proud_OUT: 0.130
vykon_IN: 1.64 // napeti_IN: 17.12 // proud_IN: 0.095 // vykon_OUT: 1.43 // napeti_OUT: 11.23 // proud_OUT: 0.127
vykon_IN: 1.64 // napeti_IN: 17.08 // proud_IN: 0.107 // vykon_OUT: 1.46 // napeti_OUT: 11.23 // proud_OUT: 0.130
vykon_IN: 1.66 // napeti_IN: 17.08 // proud_IN: 0.106 // vykon_OUT: 1.43 // napeti_OUT: 11.23 // proud_OUT: 0.127
vykon_IN: 1.68 // napeti_IN: 17.04 // proud_IN: 0.099 // vykon_OUT: 1.49 // napeti_OUT: 11.23 // proud_OUT: 0.132
vykon_IN: 1.68 // napeti_IN: 16.99 // proud_IN: 0.096 // vykon_OUT: 1.45 // napeti_OUT: 11.23 // proud_OUT: 0.129
vykon_IN: 1.66 // napeti_IN: 17.01 // proud_IN: 0.097 // vykon_OUT: 1.49 // napeti_OUT: 11.23 // proud_OUT: 0.132
vykon_IN: 1.68 // napeti_IN: 16.94 // proud_IN: 0.102 // vykon_OUT: 1.46 // napeti_OUT: 11.23 // proud_OUT: 0.130
vykon_IN: 1.69 // napeti_IN: 16.88 // proud_IN: 0.100 // vykon_OUT: 1.49 // napeti_OUT: 11.23 // proud_OUT: 0.132
vykon_IN: 1.71 // napeti_IN: 16.74 // proud_IN: 0.101 // vykon_OUT: 1.49 // napeti_OUT: 11.25 // proud_OUT: 0.132
vykon_IN: 1.70 // napeti_IN: 16.67 // proud_IN: 0.099 // vykon_OUT: 1.46 // napeti_OUT: 11.23 // proud_OUT: 0.130
vykon_IN: 1.69 // napeti_IN: 16.77 // proud_IN: 0.100 // vykon_OUT: 1.47 // napeti_OUT: 11.23 // proud_OUT: 0.131
vykon_IN: 1.70 // napeti_IN: 16.78 // proud_IN: 0.101 // vykon_OUT: 1.46 // napeti_OUT: 11.23 // proud_OUT: 0.130
vykon_IN: 1.70 // napeti_IN: 16.78 // proud_IN: 0.100 // vykon_OUT: 1.49 // napeti_OUT: 11.25 // proud_OUT: 0.132
vykon_IN: 1.69 // napeti_IN: 16.72 // proud_IN: 0.104 // vykon_OUT: 1.52 // napeti_OUT: 11.25 // proud_OUT: 0.135
vykon_IN: 1.71 // napeti_IN: 16.58 // proud_IN: 0.101 // vykon_OUT: 1.50 // napeti_OUT: 11.23 // proud_OUT: 0.134
vykon_IN: 1.70 // napeti_IN: 16.56 // proud_IN: 0.100 // vykon_OUT: 1.49 // napeti_OUT: 11.23 // proud_OUT: 0.132
vykon_IN: 1.69 // napeti_IN: 16.60 // proud_IN: 0.109 // vykon_OUT: 1.45 // napeti_OUT: 11.23 // proud_OUT: 0.129
vykon_IN: 1.71 // napeti_IN: 16.69 // proud_IN: 0.102 // vykon_OUT: 1.52 // napeti_OUT: 11.23 // proud_OUT: 0.135
vykon_IN: 1.69 // napeti_IN: 16.66 // proud_IN: 0.100 // vykon_OUT: 1.49 // napeti_OUT: 11.23 // proud_OUT: 0.132
vykon_IN: 1.69 // napeti_IN: 16.69 // proud_IN: 0.097 // vykon_OUT: 1.46 // napeti_OUT: 11.23 // proud_OUT: 0.130
vykon_IN: 1.69 // napeti_IN: 16.62 // proud_IN: 0.104 // vykon_OUT: 1.48 // napeti_OUT: 11.25 // proud_OUT: 0.131
vykon_IN: 1.69 // napeti_IN: 16.60 // proud_IN: 0.110 // vykon_OUT: 1.52 // napeti_OUT: 11.23 // proud_OUT: 0.135
vykon_IN: 1.71 // napeti_IN: 16.52 // proud_IN: 0.101 // vykon_OUT: 1.50 // napeti_OUT: 11.23 // proud_OUT: 0.134
vykon_IN: 1.70 // napeti_IN: 16.41 // proud_IN: 0.104 // vykon_OUT: 1.52 // napeti_OUT: 11.23 // proud_OUT: 0.135

 Automatické scrollování
Obojí NL & CR 115200 baudů Vymazat výstup
```

Obrázek 13: Naměřená data na jednom solárním panelu

Data odesílaná mikrokontrolérem po sériové lince (viz Obrázek 13) byla změřena při stejných podmínkách, jako bylo provedeno první měření voltampérové charakteristiky solárního panelu, při osvětlení 3200 lx, které je uvedeno v kapitole 2.4. Při měření na přípravku byly vyzkoušeny dva různé typy induktorů o indukčnosti 47 μH a 22 μH . Uvedená data byla změřena při užití induktorů o indukčnosti 22 μH . V tomto měření byl k přípravku připojen pouze jeden solární panel a dle naměřených hodnot, lze vidět, že získaný výkon se pohybuje kolem maxima, což odpovídá naměřenému maximu pro osvětlení 3200 lx, v grafu viz Obrázek 12.

Další měření (Obrázek 14) bylo provedeno při zapojení dvou solárních panelů paralelně. Při předpokladu odebrání maximálního výkonu, by měl být výkon dvou stejných panelů [Martin Čurda]

zapojených paralelně dvojnásobný, než jaký byl v předchozím měření, což ale není. Tato skutečnost je s největší pravděpodobností způsobena tím, že osvětlení na obou panelech nebylo homogenní.

```
vykon_IN: 3.29 // napeti_IN: 16.07 // proud_IN: 0.204 // vykon_OUT: 2.79 // napeti_OUT: 11.35 // proud_OUT: 0.246
vykon_IN: 3.32 // napeti_IN: 16.00 // proud_IN: 0.209 // vykon_OUT: 2.79 // napeti_OUT: 11.35 // proud_OUT: 0.246
promereni VA-charakteristiky panelu:
Vykon: 1.591 // Napeti: 20.20 // Proud: 0.079
Vykon: 0.601 // Napeti: 20.47 // Proud: 0.029
Vykon: 0.915 // Napeti: 20.34 // Proud: 0.045
Vykon: 1.625 // Napeti: 20.15 // Proud: 0.081
Vykon: 2.125 // Napeti: 19.89 // Proud: 0.107
Vykon: 2.673 // Napeti: 19.44 // Proud: 0.137
Vykon: 3.257 // Napeti: 18.29 // Proud: 0.178
Vykon: 3.334 // Napeti: 16.41 // Proud: 0.203
Vykon: 3.381 // Napeti: 15.11 // Proud: 0.224
Vykon: 3.130 // Napeti: 14.19 // Proud: 0.221
Vykon: 2.962 // Napeti: 13.24 // Proud: 0.224
Vykon: 2.706 // Napeti: 11.36 // Proud: 0.238
Vykon: 1.917 // Napeti: 7.57 // Proud: 0.253
Vykon: 0.729 // Napeti: 2.90 // Proud: 0.251

vykon_IN: 3.15 // napeti_IN: 15.52 // proud_IN: 0.207 // vykon_OUT: 2.78 // napeti_OUT: 11.35 // proud_OUT: 0.245
vykon_IN: 3.13 // napeti_IN: 15.29 // proud_IN: 0.223 // vykon_OUT: 2.77 // napeti_OUT: 11.35 // proud_OUT: 0.244
vykon_IN: 3.12 // napeti_IN: 15.19 // proud_IN: 0.207 // vykon_OUT: 2.78 // napeti_OUT: 11.35 // proud_OUT: 0.245
vykon_IN: 3.25 // napeti_IN: 15.44 // proud_IN: 0.207 // vykon_OUT: 2.79 // napeti_OUT: 11.35 // proud_OUT: 0.246
vykon_IN: 3.26 // napeti_IN: 15.50 // proud_IN: 0.205 // vykon_OUT: 2.79 // napeti_OUT: 11.35 // proud_OUT: 0.246
vykon_IN: 3.24 // napeti_IN: 15.59 // proud_IN: 0.202 // vykon_OUT: 2.79 // napeti_OUT: 11.35 // proud_OUT: 0.246
vykon_IN: 3.25 // napeti_IN: 15.63 // proud_IN: 0.209 // vykon_OUT: 2.78 // napeti_OUT: 11.35 // proud_OUT: 0.245
vykon_IN: 3.25 // napeti_IN: 15.62 // proud_IN: 0.204 // vykon_OUT: 2.77 // napeti_OUT: 11.35 // proud_OUT: 0.244
vykon_IN: 3.21 // napeti_IN: 15.60 // proud_IN: 0.205 // vykon_OUT: 2.77 // napeti_OUT: 11.35 // proud_OUT: 0.244
vykon_IN: 3.22 // napeti_IN: 15.58 // proud_IN: 0.200 // vykon_OUT: 2.79 // napeti_OUT: 11.35 // proud_OUT: 0.246
vykon_IN: 3.22 // napeti_IN: 15.67 // proud_IN: 0.201 // vykon_OUT: 2.77 // napeti_OUT: 11.32 // proud_OUT: 0.245
vykon_IN: 3.22 // napeti_IN: 15.73 // proud_IN: 0.219 // vykon_OUT: 2.78 // napeti_OUT: 11.35 // proud_OUT: 0.245
vykon_IN: 3.25 // napeti_IN: 15.74 // proud_IN: 0.204 // vykon_OUT: 2.77 // napeti_OUT: 11.35 // proud_OUT: 0.244
vykon_IN: 3.22 // napeti_IN: 15.69 // proud_IN: 0.204 // vykon_OUT: 2.77 // napeti_OUT: 11.35 // proud_OUT: 0.244
vykon_IN: 3.22 // napeti_IN: 15.70 // proud_IN: 0.202 // vykon_OUT: 2.78 // napeti_OUT: 11.35 // proud_OUT: 0.245
vykon_IN: 3.21 // napeti_IN: 15.77 // proud_IN: 0.199 // vykon_OUT: 2.76 // napeti_OUT: 11.32 // proud_OUT: 0.245
vykon_IN: 3.21 // napeti_IN: 15.80 // proud_IN: 0.226 // vykon_OUT: 2.77 // napeti_OUT: 11.35 // proud_OUT: 0.244
vykon_IN: 3.24 // napeti_IN: 15.75 // proud_IN: 0.204 // vykon_OUT: 2.77 // napeti_OUT: 11.35 // proud_OUT: 0.244
vykon_IN: 3.23 // napeti_IN: 15.69 // proud_IN: 0.205 // vykon_OUT: 2.77 // napeti_OUT: 11.35 // proud_OUT: 0.244
vykon_IN: 3.23 // napeti_IN: 15.68 // proud_IN: 0.201 // vykon_OUT: 2.81 // napeti_OUT: 11.35 // proud_OUT: 0.247
vykon_IN: 3.23 // napeti_IN: 15.85 // proud_IN: 0.199 // vykon_OUT: 2.85 // napeti_OUT: 11.35 // proud_OUT: 0.251
vykon_IN: 3.23 // napeti_IN: 16.05 // proud_IN: 0.210 // vykon_OUT: 2.81 // napeti_OUT: 11.35 // proud_OUT: 0.247
vykon_IN: 3.26 // napeti_IN: 16.36 // proud_IN: 0.194 // vykon_OUT: 2.81 // napeti_OUT: 11.35 // proud_OUT: 0.247
vykon_IN: 3.26 // napeti_IN: 16.61 // proud_IN: 0.190 // vykon_OUT: 2.81 // napeti_OUT: 11.35 // proud_OUT: 0.247
vykon_IN: 3.29 // napeti_IN: 16.67 // proud_IN: 0.197 // vykon_OUT: 2.79 // napeti_OUT: 11.35 // proud_OUT: 0.246
vykon_IN: 3.30 // napeti_IN: 16.57 // proud_IN: 0.196 // vykon_OUT: 2.79 // napeti_OUT: 11.35 // proud_OUT: 0.246
vykon_IN: 3.32 // napeti_IN: 16.41 // proud_IN: 0.199 // vykon_OUT: 2.78 // napeti_OUT: 11.35 // proud_OUT: 0.245
```

Obrázek 14: Naměřená data na dvou solárních panelech

3 ZÁVĚR

Cíl práce, navrhnutí a realizace napájecího systému RC solárního letadla s kontrolou z řídicí jednotky, za využití solárních panelů od firmy MARS Rock, byl splněn dle zadání. Na základě informací o napájecích soustavách solárních letadel byl sestrojen přípravek napájecího systému solárního letadla. Získaná energie je ukládána do akumulátoru typu Li-Pol.

Přípravek funguje dle předpokladů, čerpá energii ze solárních panelů pomocí měniče typu SEPIC, jehož zpětná vazba je řízena z PWM výstupu mikrokontroléru. Energie čerpaná měničem typu SEPIC je ukládána do akumulátoru, čímž je akumulátor dobíjen. Přípravek je možno využít v RC solárním letadle, pro dobíjení akumulátoru. Naměřené hodnoty, mezi nimiž je i údaj o zásobě energie, mohou být odečítány řídicí jednotkou.

K vylepšení v další verzi přípravku by mohlo dojít mezi mikrokontrolérem a zpětnou vazbou obvodu LT3959. Nevýhoda zvoleného řešení je nízká frekvence PWM výstupu, kdy použitý mikrokontrolér vyšší frekvenci nenabízí. Po vyhlazení PWM signálu RC článkem, zůstává výstupní signál příliš zvlněný. Použitím jiného mikrokontroléru s vyšší frekvencí PWM výstupu anebo externího DAC převodníku, jehož výstup by nebyl tolik zvlněný, by mohlo dojít ke zlepšení odečítání nastavených hodnot. Jelikož zvlněný signál na vstupu zpětné vazby obvodu LT3959 občas způsobuje nepřesné odečtení úrovně vstupního signálu a poté dochází k nastavení jiného napětí na solárních panelech, než bylo požadované. Tento problém je vyřešen přenastavením napětí v dalším kroku, takže nemá na funkci přípravku velký vliv, nicméně pro bezproblémový chod přípravku by bylo lepší nepřesnosti v měření kompenzovat.

Výsledek bakalářské práce – přípravek pro přenos energie ze solárních panelů do soustavy spotřebičů solárního letadla

4 Použitá literatura

[1] **(Online)**, dostupné z:

http://www.leonics.com/support/article2_14j/articles2_14j_en.php [cit. 2017-12-13]

[2] **(Online)**, dostupné z: <http://bluesat.com.au/maximum-power-point-tracking/> (**obr.**)

[3] **KOLAŘÍK, Martin**. Dostupné z:

<http://ostrovni-elektrarny.tumblr.com/post/24832727622/jak%C3%BD-je-rozd%C3%ADl-mezi-levn%C3%BDm-pwm-a-dra%C5%BE%C5%A1%C3%ADm-mppt> [cit. 2018-04-13].

[4] **FALIN, Jeff**. Designing DC/DC converters based on SEPIC topology. TEXAS INSTRUMENTS (online). 2008 [cit. 2018-01-14].

Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/slyt309/slyt309.pdf>

[5] **(Online)**, Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Single-ended_primary-inductor_converter#/media/File:SEPIC_Schematic.gif (**obr.**)

[6] **KREJČÍŘÍK, Alexandr**. Napájecí zdroje II. Praha: BEN - technická literatura, 1996. ISBN 80-860-5603-1.

[7] **(Online)**, Single-ended primary-inductor converter. [cit. 2018-03-08]. Dostupné z:

https://en.wikipedia.org/wiki/Single-ended_primary-inductor_converter

[8] **Analog Devices**, dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/2945fb.pdf>

[9] **Analog Devices**, dostupné z: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3621fc.pdf>

[10] **Analog Devices**, dostupné z: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3959fa.pdf>

[11] **Microchip**, dostupné z:

<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/11195c.pdf>

[12] **Microchip**, dostupné z: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P_Datasheet.pdf

[13] **(Online)**, dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Sol%C3%A1rn%C3%AD_panel [cit. 2018-04-06].

[14] **PAVLÍK, Stanislav**. Tester fotovoltaických článků a panelů (online). Brno, 2014 [cit. 2018-04-27]. Dostupné z:

https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=88545.

Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.

[15] **(Online)**, Plošný spoj. Wikipedia. [cit. 2018-03-04]. Dostupné z:

https://cs.wikipedia.org/wiki/Plo%C5%A1n%C3%BD_spoj

[16] **ZÁHLAVA, Vít**. Návrh a konstrukce DPS: Principy a pravidla praktického návrhu.

Praha: BEN, 2010. ISBN 978-80-7300-266-4.

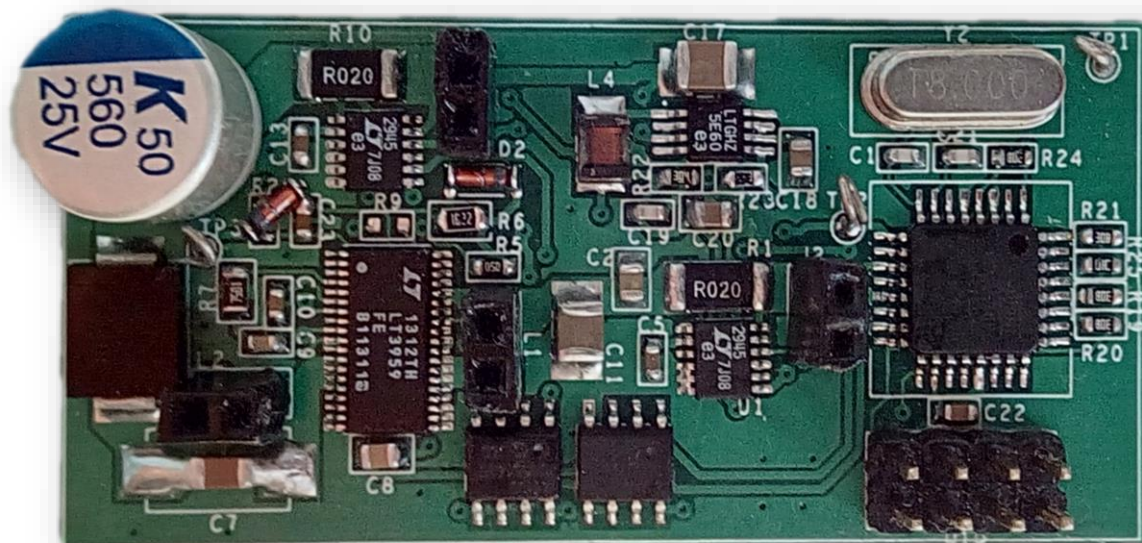
[17] **MACH, Pavel**. Postup při výrobě plošných spojů (online). 2009 [cit. 2018-03-06].

Dostupné z:

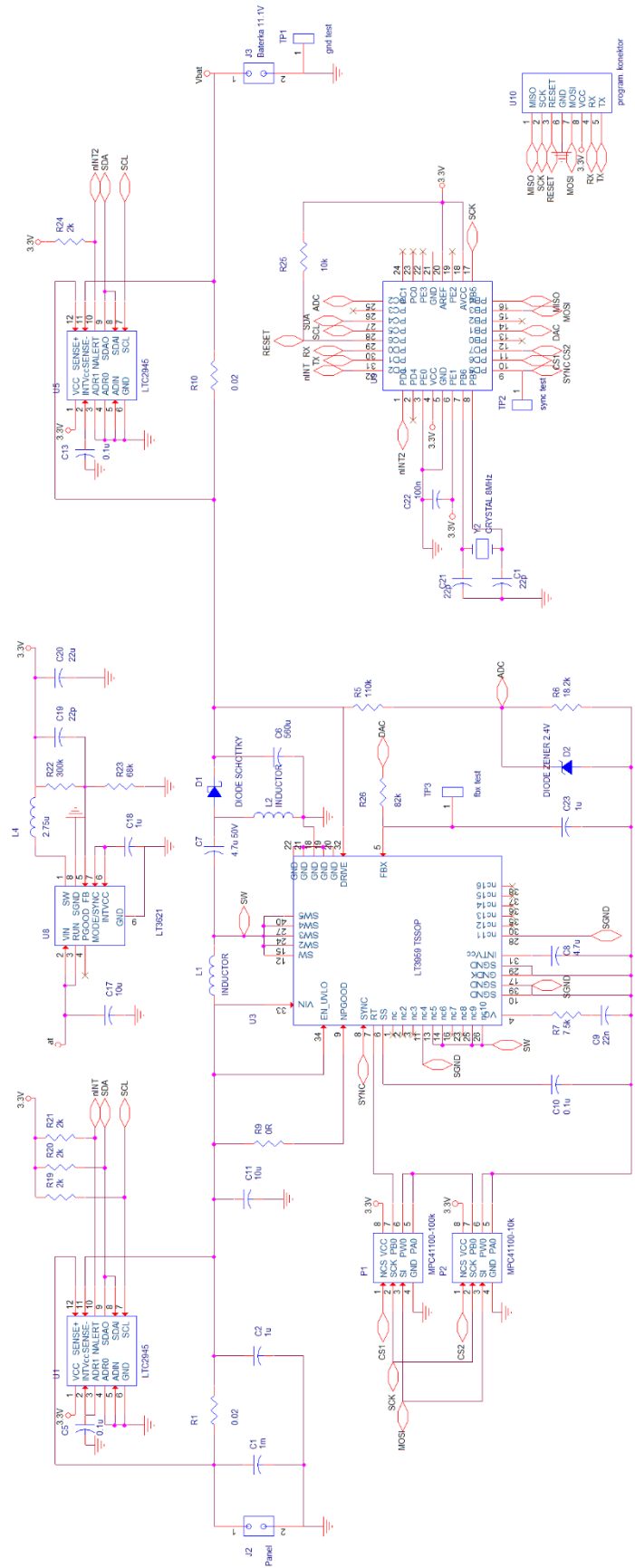
https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/77591/mod_resource/content/1/Vyroba_plosnych_spoju.pdf

5 Seznam příloh

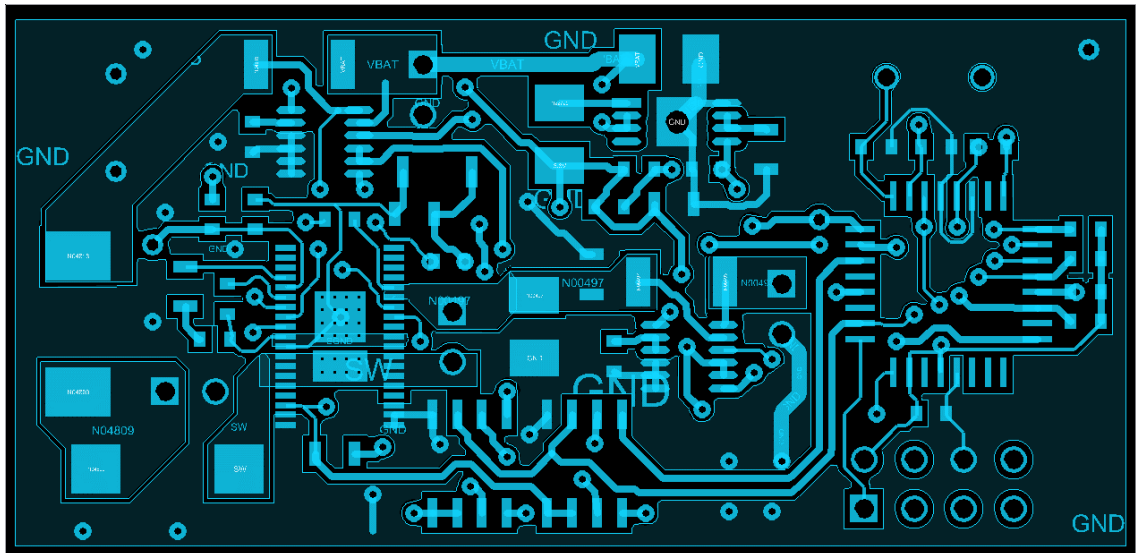
Příloha 1: Vyrobený přípravek.....	44
Příloha 2: Schéma zapojení přípravku	45
Příloha 3: Plošný spoj – vrstva TOP	46
Příloha 4: Plošný spoj - vrstva BOTTOM.....	46
Příloha 5: Soupiska použitých součástek	47
Příloha 6: Firmware	48



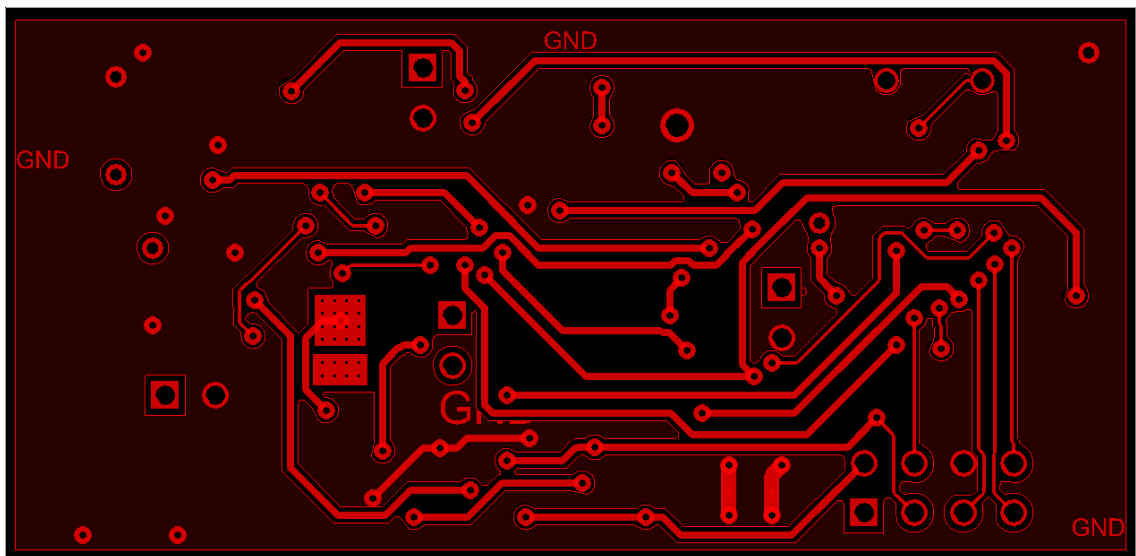
Příloha 1: Vyrobený přípravek



Příloha 2: Schéma zapojení přípravku



Příloha 3: Plošný spoj – vrstva TOP



Příloha 4: Plošný spoj - vrstva BOTTOM

součástka	hodnota	počet
LTC2945		2
LT3621		1
LT3959		1
MPC41100		1
MCP41010		1
ATmega328p		1
Krystal	8 MHz	1
Shottkyho dioda		1
Zenerova dioda		2
Cívka	2,7 μ H	1
	47 μ H	2
Kondenzátor	22 pF	3
	22 nF	1
	100 nF	4
	1 μ F	3
	4,7 μ F	2
	10 μ F	2
	22 μ F	1
	560 μ F	1
	1 mF	1
Rezistor	20 m Ω	2
	2 k Ω	4
	7,5 k Ω	1
	10 k Ω	1
	18,2 k Ω	1
	68 k Ω	1
	82 k Ω	1
	110 k Ω	1
	300 k Ω	1

Příloha 5: Soupiska použitých součástek

Příloha 6: Firmware

```
#include <SPI.h>
#include <Wire.h>

#define dac      9 //PB1      //pwm výstup
#define sync     5 //PD5
#define MOSI    11 //PB3
#define MISO    12 //PB4
#define SCK     13 //PB5
#define CS1     6 //PD6;      100k pot
#define CS2     7 //PD7;      10k pot
#define SDA    A4 //PC4
#define SCL    A5 //PC5

//LTC2945 - IN - address = B1100111
//LTC2945 - OUT - address = B1101111

double Uin, Pin, Uout, Pout, Iin, Iout, U, I;
int stav = 1; //1-zvyseni dac, 0-snizeni dac
int hodnota = 32328;
float pivot;
float vykon[10];
float napet[10];
float soucetVykonuB = 0;
float soucetVykonu = 0;
float soucetNapetiB = 0;
float soucetNapeti = 0;

void setup() {
    pinMode(sync, OUTPUT);
    digitalWrite(sync, HIGH);

    pinMode(MOSI, OUTPUT);
    pinMode(SCK, OUTPUT);
    pinMode(CS1, OUTPUT);
    pinMode(CS2, OUTPUT);

    Wire.begin(); // as master
    SPI.begin();
    //cs = HIGH > disable, cs = LOW > enable
    digitalWrite(CS1, HIGH);
    digitalWrite(CS2, HIGH);

    //set 16.5 kohm - 500 kHz
    potSet(CS1, B00010001, B00101010); // 16406 ohm
    potSet(CS2, B00010001, B00000010); // 78 ohm

    /*//set 13.7 kohm - 600 kHz
    potSet(CS1, B00010001, B00101010); // 13281 ohm
    potSet(CS2, B00010001, B00001010); // 391 ohm
```



```

//set 11.5 kohm - 700 kHz
potSet(CS1, B00010001, B00011101); // 11328 ohm
potSet(CS2, B00010001, B00000100); // 156 ohm

//set 9.76 kohm - 800 kHz
potSet(CS1, B00010001, B00011000); // 9375 ohm
potSet(CS2, B00010001, B00000101); // 352 ohm

//set 8.45 kohm - 900 kHz
potSet(CS1, B00010001, B00010101); // 8203 ohm
potSet(CS2, B00010001, B00000110); // 234 ohm

//set 6.81 kohm - 1 MHz
potSet(CS1, B00010001, B00010001); // 6641 ohm
potSet(CS2, B00010001, B00000100); // 156 ohm*/

Serial.begin(115200);
setupPWM16();
}

void loop() {
Uout = napeti(B1101111);

if (Uout < 10.5) {
Serial.println("Nizke napeti akumulatoru!");
} else if (Uout > 12.6) {
Serial.println("Vysoke napeti akumulatoru!");
analogWrite16(9, 32296);
} else {

Serial.println("promereni VA-charakteristiky panelu:");
promereniPanelu();
Serial.println();

stav = 1;
analogWrite16(9, hodnota);

for (int m = 0; m < 50; m++) {

soucetVykonu = 0;
soucetNapeti = 0;
soucetVykonuB = 0;
soucetNapetiB = 0;

hodnota += 1;
analogWrite16(9, hodnota);

for (int i = 0; i < 10; i++) {
soucetVykonuB += vykon[i];
soucetNapetiB += napet[i];
}
}
}

```

```

for (int j = 0; j < 3; j++) {
  for (int i = 0; i < 9; i++) {
    vykon[9 - i] = vykon[8 - i];
    napet[9 - i] = napet[8 - i];
  }

  U = napeti(B1100111);
  I = proud(B1100111);

  vykon[0] = U * I;
  napet[0] = napeti(B1100111);
  delay (200);
}

for (int i = 0; i < 10; i++) {
  soucetVykonu += vykon[i];
  soucetNapeti += napet[i];
}

if (hodnota >= 30700 || hodnota <= 32970) {

  if (soucetNapeti > soucetNapetiB) {
    if (soucetVykonu > soucetVykonuB ) {
      stav = 1;
    } else if (soucetVykonu < soucetVykonuB) {
      hodnota -= 5;
      stav = 0;
    }
  } else if (soucetNapeti < soucetNapetiB) {
    if (soucetVykonu < soucetVykonuB) {
      hodnota += 2;
      stav = 1;
    } else if (soucetVykonu > soucetVykonuB) {
      hodnota -= 1;
      stav = 0;
    }
  }
} else if (hodnota < 30700) {
  hodnota += 4;
} else if (hodnota > 32970) {
  hodnota -= 4;
}
delay(134);

U = napeti(B1101111);
I = proud(B1101111);
Pout = U * I;
Uout = napeti(B1101111);
Iin = proud(B1100111);
Iout = proud(B1101111);

```

```

    Serial.print("vykon_IN: ");
    Serial.print(soucetVykonu / 10, 2);
    Serial.print(" // napeti_IN: ");
    Serial.print(soucetNapeti / 10, 2);
    Serial.print(" // proud_IN: ");
    Serial.print(Iin, 3);
    Serial.print(" // vykon_OUT: ");
    Serial.print(Pout, 2);
    Serial.print(" // napeti_OUT: ");
    Serial.print(Uout, 2);
    Serial.print(" // proud_OUT: ");
    Serial.print(Iout, 3);
    Serial.println();
}
}
}

void potSet (int cs, int command, int data) {
    digitalWrite(cs, LOW);    //enable
    SPI.transfer(command);    //command byte
    SPI.transfer(data);      //data byte
    digitalWrite(cs, HIGH);  //disable
}

float napeti (byte device) { // vycet napeti
    byte MSB, LSB;
    unsigned long MSBs, LSBs; //shifted
    float U;

    Wire.beginTransaction(device); // transmit to device (0xXX)
    Wire.write(byte(0x1E));
    Wire.endTransmission(false);
    Wire.requestFrom(device, 2, true);
    delay(1);
    MSB = Wire.read();
    LSB = Wire.read();

    MSBs = MSB << 4;
    LSBs = LSB >> 4;
    U = (MSBs + LSBs) * 0.025; // 0.025 - rozliseni mereni napeti

    return U;
}

float proud (byte device) { // vycet proudu
    byte MSB, LSB;
    unsigned long MSBs, LSBs; // shifted
    float I;

    Wire.beginTransaction(device); // transmit to device (0xXX)
    Wire.write(byte(0x14));
    Wire.endTransmission(false);

```

```

Wire.requestFrom(device, 2, true);
delay(1);
MSB = Wire.read();
LSB = Wire.read();

MSBs = MSB << 4;
LSBs = LSB >> 4;
I = (MSBs + LSBs) * 0.00125; // 0.00125 == 0.000025 / 0.02 // 0.000025 -
rozliseni mereni napeti na mericim rezistoru, 0.02 ohm rezistor

return I;
}

float power (byte device) { //vycet vykonu
byte MSB2, MSB1, LSB;
unsigned long MSB2s, MSB1s; //shifted
float P;

Wire.beginTransaction(device); // transmit to device (BXXXXXXX)// 7 bit
address
Wire.write(byte(0x05)); // command
Wire.endTransmission(false);
Wire.requestFrom(device, 3, true); // address, nuber of requested bytes
delay(1);
MSB2 = Wire.read();
MSB1 = Wire.read();
LSB = Wire.read();

MSB2s = MSB2 << 16;
MSB1s = MSB1 << 8;
P = (MSB2s + MSB1s + LSB) * (31.25E-6); // 31.25E-6 == 0.025 * (25E-6) /
0.02 // 0.025 - rozliseni mereni napeti, 25E-6 - rozliseni mereni proudu,
0.02 ohm rezistor

return P;
}

void setupPWM16() { // 16 bit PWM
DDRB |= _BV(PB1) | _BV(PB2);
TCCR1A = _BV(COM1A1) | _BV(COM1B1)
| _BV(WGM11);
TCCR1B = _BV(WGM13) | _BV(WGM12)
| _BV(CS10);
ICR1 = 0xffff;
}

void analogWrite16(uint8_t pin, uint16_t val)
{
switch (pin) {
case 9: OCR1A = val; break;
}
}
}

```

```

void dacSet(int value) { // ruzne hodnoty zatizeni
    switch (value) {
        case 1: analogWrite16(9, 32370); hodnota = 32370; break;
        case 2: analogWrite16(9, 32390); hodnota = 32390; break;
        case 3: analogWrite16(9, 32410); hodnota = 32410; break;
        case 4: analogWrite16(9, 32430); hodnota = 32430; break;
        case 5: analogWrite16(9, 32450); hodnota = 32450; break;
        case 6: analogWrite16(9, 32470); hodnota = 32470; break;
        case 7: analogWrite16(9, 32490); hodnota = 32490; break;
        case 8: analogWrite16(9, 32510); hodnota = 32510; break;
        case 9: analogWrite16(9, 32530); hodnota = 32530; break;
        case 10: analogWrite16(9, 32550); hodnota = 32550; break;
        case 11: analogWrite16(9, 32570); hodnota = 32570; break;
        case 12: analogWrite16(9, 32590); hodnota = 32590; break;
        case 13: analogWrite16(9, 32610); hodnota = 32610; break;
        case 14: analogWrite16(9, 32630); hodnota = 32630; break;
        case 15: analogWrite16(9, 32650); hodnota = 32650; break;
        case 16: analogWrite16(9, 32670); hodnota = 32670; break;
        case 17: analogWrite16(9, 32690); hodnota = 32690; break;
    }
}

void promereniPanelu() { // promereni celeho voltamperove charakteristiky
panelu panelu
    float P, U1, U2, Usum, I1, I2, Isum;
    float pivot = 0;
    int nejvetsi = 1;
    for (int i = 83; i > 50; i -= 1) {
        dacSet(i);
        delay (134);
        U1 = napeti(B1100111);
        I1 = proud(B1100111);
        delay (134);
        U2 = napeti(B1100111);
        I2 = proud(B1100111);
        Usum = (U1 + U2) / 2;
        Isum = (I1 + I2) / 2;
        P = Usum * Isum;

        Serial.print("Vykon: ");
        Serial.print(P, 3);
        Serial.print(" // Napeti: ");
        Serial.print(Usum, 2);
        Serial.print(" // Proud: ");
        Serial.println(Isum, 3);
        if (P > pivot) {
            pivot = P;
            nejvetsi = i;
        }
    }
    dacSet(nejvetsi + 1);
    delay (200);
}

```