



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIOENGINEERING

MPPT REGULÁTOR PRO MALÉ BEZPILOTNÍ PROSTŘEDKY

MPPT DRIVER FOR SMALL UAV

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Košút

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Kubíček, Ph.D.

BRNO 2020



Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: Martin Košút

ID: 203263

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

MPPT regulátor pro malé bezpilotní prostředky

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou využití solární energie ze solárních článků, zaměřte se na regulaci MPPT. Na základě elektrických a mechanických požadavků navrhnete koncepci a následně obvodové schéma modulu pro nabíjení palubních akumulátorů malého bezpilotního prostředku ze solárních článků. Důraz je kladen na rychlé sledování optimálního pracovního bodu solárních článků s ohledem na rychle se měnící světelné poměry na člancích.

Realizujte prototyp navrženého regulátoru MPPT a proveďte jeho laboratorní testování. Na základě výsledků měření proveďte jeho optimalizaci, především s cílem snížit hmotnost, zvýšit účinnost a zmenšit jeho celkové rozměry.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] SMETS, Arno. Solar Energy: The Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion, Technologies and Systems. UIT Cambridge Ltd., 2016. ISBN 978-1906860325.

[2] MANIKTALA, Sanjaya. Switching power supply design & optimization. Second edition. New York: McGraw-Hill Education, 2014. ISBN 9780071798143.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 6.8.2020

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

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Táto práca sa zaoberá návrhom regulátora sledujúceho bod maximálneho výkonu fotovoltaických článkov vstavaných v krídlach UAV. Fotovoltaické články sú používané na pokrytie spotreby a pre nabíjanie palubných akumulátorov (pri vhodných podmienkach). Ako UAV pomerne rýchlo mení svoju polohu a postavenie voči slnku, tak sa mení aj intenzita osvetlenia fotovoltaických panelov. Preto je potrebné navrhnuť rýchly regulátor, ktorý bude hľadať optimálny pracovný bod tak, aby bola zabezpečená maximálna účinnosť systému. Celkové riešenie je založené na komerčne dostupných súčiastkach. Navrhnutý DC-DC menič, ktorý reprezentuje jadro regulátora, je kombináciou zvyšujúceho a znižujúceho meniča. Hmotnosť, rozmery a celková účinnosť boli kľúčovými parametrami pri optimalizácii návrhu.

Kľúčové slová

MPPT regulátor, fotovoltaické články, Li-Ion akumulátor, H-mostík, UAV, ATmega168PA

Abstract

This thesis describes a design of a maximum power peak tracking controller for a solar cell array embedded on a wing of a UAV. Solar cells are used to both cover part of the UAV power consumption and (at suitable conditions) to charge onboard battery. As the UAV changes its position and attitude to the sun relatively fast, the lighting conditions on the solar cells change rapidly. Thus, it is necessary to implement a fast maximum power peak tracking regulator to ensure maximum efficiency of the system. The proposed design is based on commercial off-the-shelf components. The implemented DC/DC converter, which represents the core of the regulator, is a combination of a step-up and a step-down converter. Weight, dimensions and overall efficiency were the key optimization parameters of the design.

Keywords

MPPT controller, solar cells, Li-Ion battery, H-bridge, UAV, ATmega168PA

Bibliografická citácia:

KOŠŮT, Martin. *MPPT regulátor pro malé bezpilotní prostředky*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/126084>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Michal Kubíček

Prehlásenie

„Prehlasujem, že svoju bakalársku prácu na tému MPPT regulátor pre malé bezpilotné prostriedky som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené na konci práce.

Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka č.40/2009 Sb.“

V Brne dňa:

.....

podpis autora

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce Ing. Michalovi Kubičkovi Ph.D. za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní bakalárskej práce a Martinovi Šturmovi za poskytnutie laboratória a pomoc pri meraní fotovoltických panelov.

V Brne dňa:

.....

podpis autora

Obsah

1. Úvod.....	14
2. Teoretický rozbor.....	15
2.1 Fotovoltaické články	15
2.1.1 Fotovoltaický jav	15
2.1.2 Typy fotovoltaických článkov	16
2.1.3 Voltampérová charakteristika fotovoltaického článku.....	16
2.1.4 Spájanie fotovoltaických článkov.....	18
2.2 Li-Ion akumulátory.....	18
2.2.1 Základné parametre	19
2.2.2 Základné typy podľa materiálu katódy.....	20
2.2.3 Nabíjanie.....	23
3. Návrh MPPT regulátora	25
3.1 Základná koncepcia a požiadavky	25
3.2 Fotovoltaické články a akumulátory v UAV	25
3.3 Riadiaci obvod a budič H-mostíka	27
3.3.1 MPPT regulátor SM72442	28
3.3.2 Budič H-mostíka SM72295.....	29
3.4 H-mostík	30
3.4.1 Cievka.....	31
3.4.2 Kondenzátory	32
3.4.3 Tranzistory.....	33
3.5 Mikrokontrolér a teplomer	34
3.6 Napájanie	34
3.7 Ochrana proti vybíjaniu akumulátora	37
3.8 Spúšťač obvod	37
4. Realizácia	39
5. Firmware	41
5.1 Komunikácia cez I2C	43
5.1.1 Komunikácia s TC74.....	43
5.1.2 Komunikácia s SM72442	43
6. Meranie	46

6.1	Meranie fotovoltaiického panelu	46
6.2	Meranie MPPT regulátora	47
6.2.1	Účinnosť	47
6.2.2	Nabíjacia charakteristika	48
6.2.3	Namerané priebehy napätí	50
7.	Záver	58

Zoznam symbolov a skratiek

Skratky:

UAV	Unmanned aerial vehicle – bezpilotný prostriedok
Li-Ion	Lítium-iónový akumulátor
VA	Voltampérová (charakteristika)
MPP	Maximum power point – pracovný bod s maximálnym výstupným výkonom
OC	Open circuit – rozpojený obvod
SC	Short circuit – skratovaný obvod
DOD	Depth of discharge – hĺbka vybitia
C	Reprezentuje násobok nominálnej kapacity akumulátora
CC	Constant current – konštantný prúd
CV	Constant voltage – konštantné napätie
AM 1,5g	Air mass coeficient – koeficient spektra slnečného žiarenia, ktoré prejde cez atmosféru
IO	Integrovaný obvod
PWM	Pulse width modulation – pulzná šírková modulácia
AD	Analog to Digital – Analógovo digitálny (prevodník)
STC	Standard test conditions – Štandardné testovacie podmienky
DC bias	Závislosť kapacity kondenzátorov na napätí

Symboly:

U	Napätie	[V]
I	Prúd	[A]
R	Odpor	[Ω]
L	Indukčnosť	[H]
C	Kapacita	[F]
P	Výkon	[W]
η	Účinnosť	[%]
FF	Činiteľ plnenia	[%]
f	Frekvencia	[Hz]
E	Energia	[Wh]
t	Čas	[s]

Zoznam obrázkov

Obr. 2-1: Princíp fotovoltaiického javu [3].....	15
Obr. 2-2: Fotovoltaiický článok, panel a modul [1].....	18
Obr. 2-3: Princíp Li-Ion akumulátora [18]	19
Obr. 2-4: Štruktúra katódy Li-Ion akumulátora [20]	19
Obr. 2-5: Veľkosť a tvar článku 18650 (mm) [13]	20
Obr. 2-6: Typické závislosti akumulátora s LiCoO ₂ katódou [17]	21
Obr. 2-7: Typické závislosti akumulátora s LiNiO ₂ katódou [17].....	22
Obr. 2-8: Typické závislosti akumulátora s LiFePO ₄ katódou [17]	23
Obr. 3-1: Bloková schéma MPPT regulátora.....	25
Obr. 3-2: Základné zapojenie H-mostíka [29]	30
Obr. 3-3: Zobrazenie prúdov a napätí v H-mostíku vo zvyšujúcom režime [29].....	31
Obr. 3-4: Zapojenie ochrany proti spätnému vybíjaniu akumulátora.....	37
Obr. 3-5: Zapojenie obvodu pre spúšťanie do zvyšujúceho režimu	38
Obr. 4-1: 3D vizualizácia prototypu	39
Obr. 4-2: 3D vizualizácia finálnej verzie.....	39
Obr. 4-3: Osadená DPS MPPT regulátora (TOP).....	40
Obr. 4-4: Osadená DPS MPPT regulátora (BOTTOM).....	40
Obr. 5-1: Vývojový diagram firmwaru mikrokontroléra ATmega168PA.....	42
Obr. 5-2: Prečítanie teploty z TC74 cez I2C.....	43
Obr. 5-3: Prečítanie registra 1 MPPT regulátora cez I2C.....	44
Obr. 6-1: Prototypový fotovoltaiický panel	46
Obr. 6-2: Zapojenie prístrojov pri meraní účinnosti	48
Obr. 6-3: Výstupné napätia po štarte bez akumulátora pri $U_{IN} = 11\text{ V}$, $I_{OUT} = 1\text{ A}$..	51
Obr. 6-4: Výstupné napätie po aktivácii resetu bez akumulátora (prekročenie maximálneho výstupného prúdu nastaveného na 3 A) pri $U_{IN} = 11\text{ V}$	51
Obr. 6-5: Výstupné napätie mimo MPP pri $U_{IN} = 11\text{ V}$ a $I_{OUT} = 0,4\text{ A}$	52
Obr. 6-6: Výstupné napätie mimo MPP pri $U_{IN} = 11\text{ V}$ a $I_{OUT} = 2,5\text{ A}$	52
Obr. 6-7: Detail výstupného napätia pri $U_{IN} = 11\text{ V}$ a $I_{OUT} = 2,5\text{ A}$	53
Obr. 6-8: Vstupné napätie fotovoltaiického panela (fialová) a výstupné napätie na akumulátore (modrá) v MPP pri $I_{OUT} = 2,9\text{ A}$	53

Obr. 6-9: Priebeh spínacích signálov HIB (modrá) a LOB (fialová) pri $U_{IN} = 11 \text{ V}$, $I_{OUT} = 0,4 \text{ A}$	54
Obr. 6-10: Priebeh napätia na tranzistoroch $U_{GS} \text{ T7} + U_{DS} \text{ T8}$ (modrá) a $U_{GS} \text{ T8}$ (fialová) pri $U_{IN} = 11 \text{ V}$, $I_{OUT} = 0,4 \text{ A}$	54
Obr. 6-11: Priebeh napätia na tranzistoroch $U_{DS} \text{ T8}$ (modrá), $U_{GS} \text{ T7} + U_{DS} \text{ T8}$ (fialová) a $U_{GS} \text{ T7}$ (zelená) pri $U_{IN} = 11 \text{ V}$, $I_{OUT} = 0,4 \text{ A}$	55
Obr. 6-12: Priebeh spínacích signálov HIB (modrá) a LOB (fialová) pri $U_{IN} = 11 \text{ V}$, $I_{OUT} = 2,5 \text{ A}$	55
Obr. 6-13: Priebeh napätia na tranzistoroch $U_{GS} \text{ T7} + U_{DS} \text{ T8}$ (modrá) a $U_{GS} \text{ T8}$ (fialová) pri $U_{IN} = 11 \text{ V}$, $I_{OUT} = 2,5 \text{ A}$	56
Obr. 6-14: Priebeh napätia na tranzistoroch $U_{DS} \text{ T8}$ (modrá), $U_{GS} \text{ T7} + U_{DS} \text{ T8}$ (fialová) a $U_{GS} \text{ T7}$ (zelená) pri $U_{IN} = 11 \text{ V}$, $I_{OUT} = 2,5 \text{ A}$	56
Obr. 6-15: Výstupné napätie (modrá) a spúšťací obvod (fialová)	57

Zoznam tabuliek

Tab. 3-1: Typické parametre fotovoltaického článku Maxeon C60 pri STC [16]....	26
Tab. 3-2: Rozdiel medzi parametrami IO od Texas Instruments [25] [26] [27].....	28
Tab. 3-3: Porovnanie parametrov cievok.....	32
Tab. 3-4: Porovnanie parametrov keramických kondenzátorov	33
Tab. 3-5: Porovnanie parametrov tranzistorov	34
Tab. 3-6: Prúdový odber použitých súčiastok [26] [28] [32] [35] [36] [37] [40].....	35
Tab. 5-1: Nastavenie poistiek pre mikrokontrolér ATmega168PA [32]	41
Tab. 5-2: Bezpečné prevádzkové hodnoty parametrov.....	41
Tab. 5-3: Vnútorne registre SM72442 [26]	43
Tab. 5-4: Usporiadanie bitov štýlom Little-endian [26]	43
Tab. 5-5: Usporiadanie registra 1 MPPT regulátora [26]	44
Tab. 6-1: Charakteristické parametre prototypového fotovoltaického panelu.....	46

Zoznam grafov

Graf 2-1: Vývoj maximálnej účinnosti fotovoltaických článkov [9].....	16
Graf 2-2: Typická VA charakteristika (červená) a VP charakteristika (modrá) fotovoltaického článku [16]	17
Graf 2-3: CC - CV algoritmus nabíjania [22]	24
Graf 3-1: VA charakteristika Maxeon C60 v závislosti na osvetlení [16].....	26
Graf 6-1: Voltampérová charakteristika panelu v závislosti na intenzite osvetlenia	47
Graf 6-2: Výkonová charakteristika panelu v závislosti na intenzite osvetlenia.....	47
Graf 6-3: Závislosť účinnosti MPPT regulátora na veľkosti výstupného prúdu pre rôzne hodnoty vstupného napätia	48
Graf 6-4: Vstupné parametre regulátora pri nabíjaní akumulátora 4S 2200 mAh z fotovoltaického panela	49
Graf 6-5: Výstupné parametre regulátora pri nabíjaní akumulátora 4S 2200 mAh pri nabíjaní z fotovoltaického panela	50
Graf 6-6: Účinnosť a teplota výkonovej časti regulátora pri nabíjaní akumulátora 4S 2200 mAh z fotovoltaického panela	50

1. ÚVOD

Cieľom tejto práce je návrh regulátora sledujúceho bod maximálneho výkonu (Maximum Power Point Tracking; MPPT) fotovoltaických článkov pre malé bezpilotné prostriedky (Unmanned Aerial Vehicle; UAV), ktorý bude slúžiť k napájaniu elektroniky, eventuálne k nabíjaniu palubných akumulátorov počas letu. UAV spotrebováva energiu z pohonných akumulátorov hlavne pre motorový let, avšak pri krúžení v stúpajúcich termických prúdoch iba na napájanie palubnej elektroniky. Túto spotrebu je možné pokryť napájaním z fotovoltaických článkov zabudovaných v krídlach. Z dôvodu relatívne rýchlej zmeny polohy UAV, je kladený dôraz na rýchle sledovanie optimálneho pracovného bodu s periódou menej ako 1 s. Pracovný bod fotovoltaických článkov sa mení v závislosti na momentálnom celkovom osvetlení panela. Rovnako dôležitý je aj celkový rozmer, hmotnosť a účinnosť finálneho riešenia, pretože dostupný priestor v UAV je značne obmedzený.

Práca obsahuje popis základných parametrov a typov fotovoltaických článkov a Li-Ion akumulátorov používaných v praxi. Následne na základe nárokov na funkciu, vstupné a výstupné parametre, je rozobratý podrobne výber jednotlivých riadiacich obvodov a ich nastaviteľných parametrov, spolu s výberom kľúčových výkonových komponentov, od ktorých závisí celková účinnosť zariadenia. Nasleduje výber napájacích obvodov a popis niektorých častí zapojenia nutných pre správnu funkciu. V práci sa ďalej nachádza kapitola o samotnej realizácii regulátora kde je popísaný návrh dosky plošných spojov nasledovaný časťou, v ktorej je popísaný návrh obslužného firmwaru pre zvolený mikrokontrolér. Po návrhovej časti nasleduje kapitola o meraniach na finálnej verzii regulátora. Konkrétne meranie účinnosti regulátora v laboratórnych podmienkach a meraním nabíjacej charakteristiky za reálnych podmienok s fotovoltaickým panelom. Napokon sa v práci nachádzajú namerané priebehy napätí z osciloskopu dôležitých častí zapojenia.

2. TEORETICKÝ ROZBOR

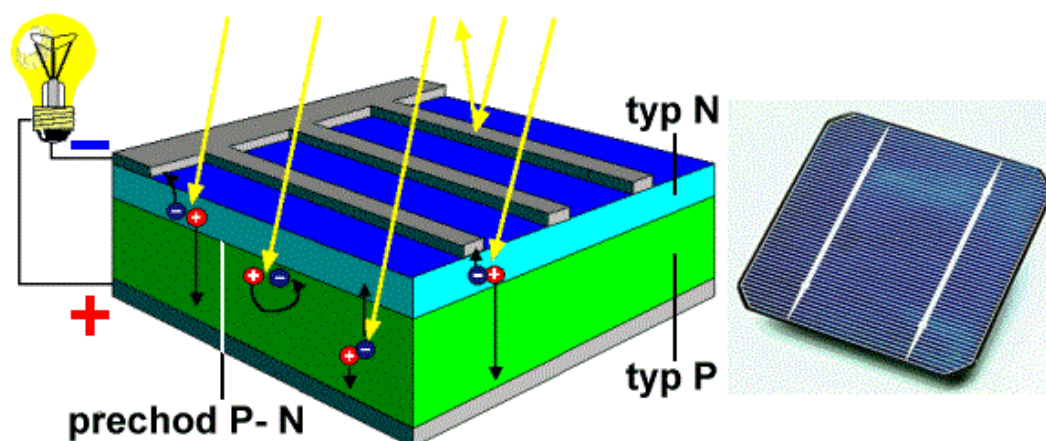
2.1 Fotovoltaické články

Fotovoltaický článok je zariadenie, ktoré konvertuje energiu slnečného žiarenia na elektrickú energiu. Pri tejto premene sa využíva fotovoltaický jav.

2.1.1 Fotovoltaický jav

Fotovoltaický jav je základný jav, ktorý využívajú fotovoltaické články pre premenu slnečnej energie na elektrickú. Je to pohyb elektrónov v materiáli keď absorbuje fotóny, ktorých veľkosť energie je v určitom rozsahu energií, tj. v určitom rozsahu vlnových dĺžok. Svetlo je tvorené fotónmi. Veľkosť energie fotónu závisí na jeho vlnovej dĺžke, vyššiu energiu majú fotóny elektromagnetického žiarenia s nižšou vlnovou dĺžkou (vyššou frekvenciou) [2].

Fotovoltaické články sú vyrobené z kremíkovej doštičky s vodivosťou typu P, na ktorú sa vytvorí tenká vrstva polovodiča s vodivosťou typu N, následne na ich rozhraní vznikne PN prechod. Keď je PN prechod osvetlený, fotóny odovzdávajú energiu nadbytočným elektrónom a získajú potenciálnu energiu presunom do vyššej hladiny energie. Elektróny sa následne pohybujú a zanechávajú za sebou diery, do ktorých sa presúvajú susedné elektróny. Elektrické pole produkované PN prechodom (zakázaná oblasť) zabraňuje okamžitej rekombinácii elektrónov a dier, čo by nevytvorilo žiadnu prácu. Elektróny sú odpudzované z P vrstvy k povrchu článku a diery sú odpudzované z N vrstvy smerom k spodku článku. To vytvorí rozdiel potenciálov (elektrické napätie) medzi povrchom a spodkom fotovoltaického článku. Voľné elektróny sú zbierané kovovými kontaktmi na povrchu článku a putujú cez uzavretý obvod smerom k spodku článku kde rekombinujú s dierami, tým vytvárajú užitočný elektrický prúd. Tento proces pohybu elektrónov vzniká vtedy, ak je fotovoltaický článok osvetlený a je možné ho zastaviť jedine kompletným zakrytím povrchu článku pred dopadajúcim svetlom [2].

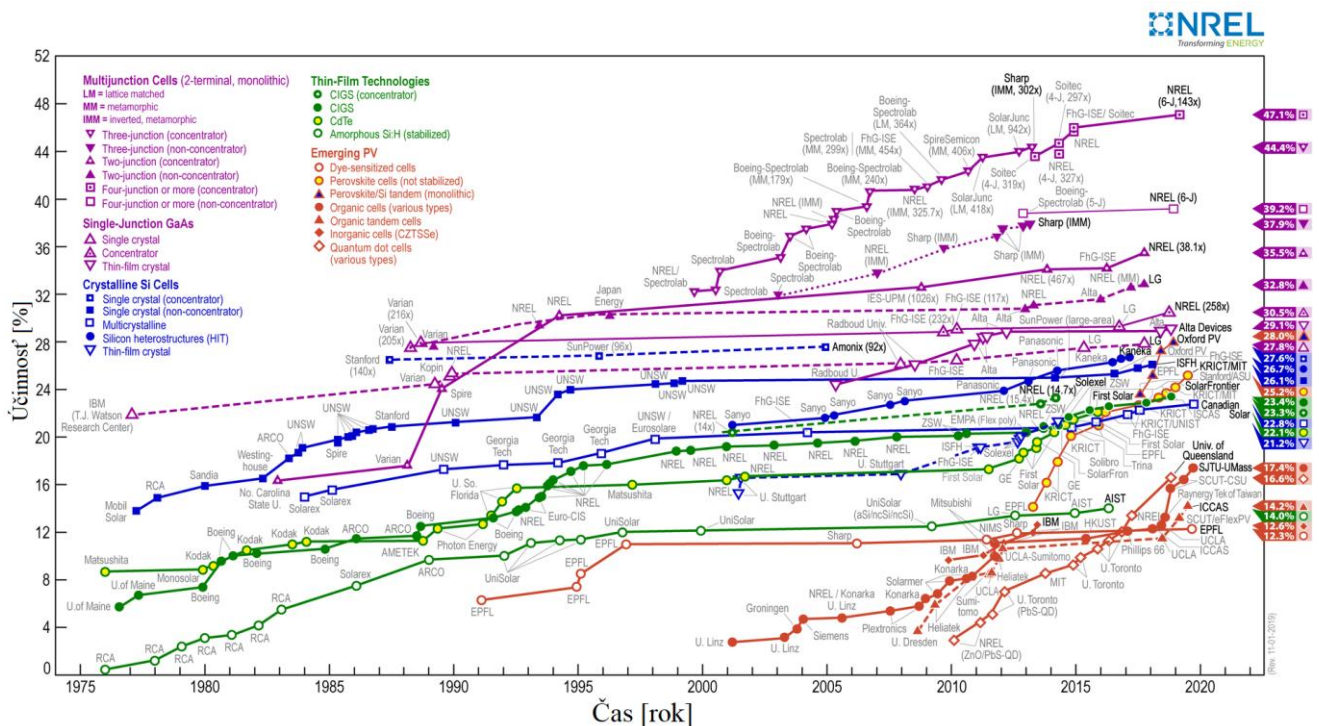


Obr. 2-1: Princíp fotovoltaického javu [3]

2.1.2 Typy fotovoltaických článkov

Fotovoltaické články môžu byť vyrobené z jednej vrstvy (single-junction) alebo z viacerých vrstiev (multi-junction), ktoré absorbujú slnečné žiarenie na rôznych vlnových dĺžkach, čím môžu dosiahnuť vyššiu účinnosť. Fotovoltaické články môžeme rozdeliť do 3 generácií. 1.generáciu predstavujú články, ktoré sú bežne komerčne dostupné a sú založené na výrobe z kryštalického kremíka vo forme waferov. Do 2.generácie patria thin-film články, ktoré integrujú do striech a stien budov. Poslednú 3.generáciu predstavujú články, čo nie sú komerčne dostupné a sú vo vývoji [8]. Maximálna teoretická účinnosť kremíkových single-junction článkov je 33,16 %, čo vychádza z Shockleyho – Queisserovho limitu, ktorý hovorí o tom, že na premenu svetelnej energie na elektrickú sa používajú iba fotóny s veľkosťou energie zodpovedajúcej šírke zakázaného pásu PN prechodu. Ostatné fotóny sú pohltené a premenené na teplo. Maximálna dosiahnutá účinnosť multi-junction článkov v súčasnosti je až 47,1 %. Nasledujúci graf zobrazuje maximálnu dosiahnutú účinnosť pre rôzne typy fotovoltaických článkov v laboratórnych podmienkach po dobu niekoľko uplynulých desiatok rokov (Graf 2-1) [9].

Graf 2-1: Vývoj maximálnej účinnosti fotovoltaických článkov [9]



2.1.3 Voltampérová charakteristika fotovoltaického článku

Na posudzovanie vlastností fotovoltaických článkov slúži voltampérová (VA) charakteristika. Je to grafické znázornenie zaťažovacej charakteristiky článku. Nachádzajú sa v nej body, ktoré charakterizujú fotovoltaický článok za určitých pracovných podmienok. VA charakteristika sa mení v závislosti od prevádzkových vlastností. S klesajúcim osvetlením sa znižuje výstupný prúd článku a so zvyšujúcou sa prevádzkovou teplotou klesá výstupné napätie článku. Tým pádom klesá aj celkový

výstupný výkon, keďže je rovný súčinu jeho výstupného napätia a prúdu v danom bode VA charakteristiky (1) [2].

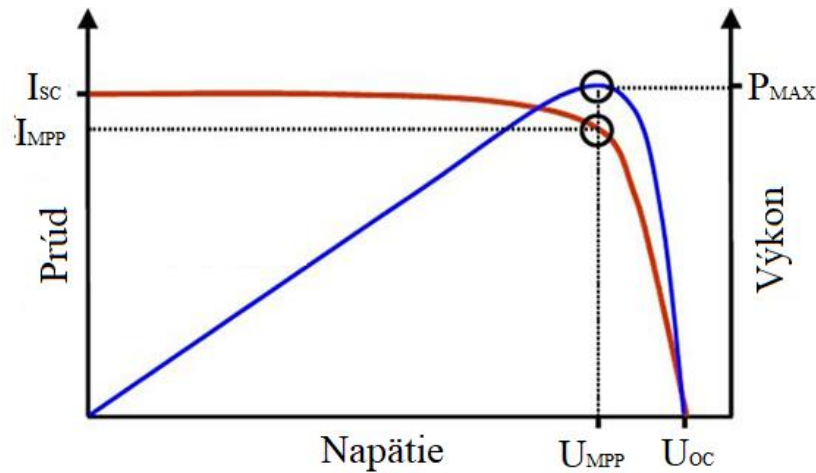
$$P = U \cdot I \quad (1)$$

Charakteristické body fotovoltaiického článku sú:

I_{SC}	Skratový prúd článku pri nulovom výstupnom napätí
I_{MPP}	Prúd v MPP
U_{MPP}	Napätie v MPP
U_{OC}	Napätie naprázdno pri nulovom výstupnom prúde
P_{MAX}	Maximálny výkon v MPP

Pri zobrazení VA charakteristiky spolu s výkonovou charakteristikou (VP) v jednom grafe, je možné vidieť bod maximálneho výkonu, ktorý sa nachádza v mieste zlomu VA krivky.

Graf 2-2: Typická VA charakteristika (červená) a VP charakteristika (modrá) fotovoltaiického článku [16]



Ďalšími charakteristickými parametrami fotovoltaiických článkov je účinnosť a činiteľ plnenia. Účinnosť udáva v % s akou účinnosťou fotovoltaiický článok premieňa vstupnú energiu zo slnka na výstupný elektrický výkon. Je definovaná ako podiel výstupného výkonu fotovoltaiického článku v MPP a vstupného výkonu v podobe súčinu plochy panelu S v m^2 a výkonu slnečného žiarenia E vo W/m^2 (2) [2].

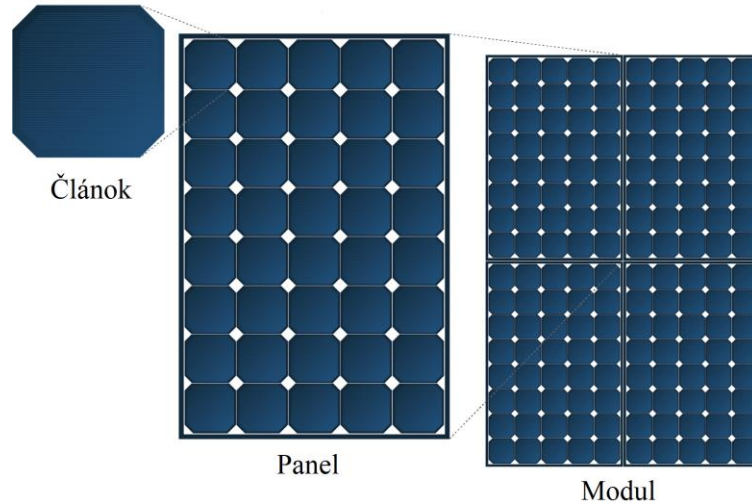
$$\eta = \frac{P_{MPP}}{E \cdot S} \cdot 100 \quad (2)$$

Činiteľ plnenia (Fill Factor) reprezentuje kvalitu fotovoltaiického článku v % na základe tvaru VA charakteristiky v podobe polohy jeho charakteristických bodov. Čím vyššia hodnota činiteľa plnenia, tým bližšie sa nachádza hodnota U_{MPP} k U_{OC} a I_{MPP} k I_{SC} . Z toho vyplýva, že VA charakteristika je hranatejšia. Je definovaný ako podiel maximálneho výkonu v MPP (P_{MPP}) a súčinu napätia naprázdno (U_{OC}) a skratového prúdu (I_{SC}) (3) [2].

$$FF = \frac{P_{MPP}}{U_{OC} \cdot I_{SC}} \cdot 100 \quad (3)$$

2.1.4 Spájanie fotovoltaických článkov

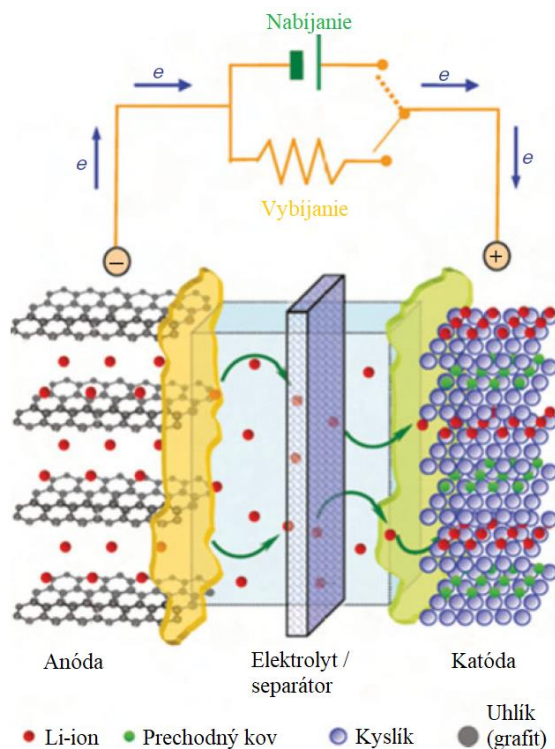
Vzhľadom na to že každý fotovoltaický článok má maximálne výstupné napätie približne 0,5 – 0,6V, tak sa jednotlivé fotovoltaické články spájajú do sériových skupín (panelov) pre zvýšenie výstupného napätia. Pre zvýšenie výstupného prúdu je možné hotové panely spájať aj paralelne do modulov, čím sa zvyšuje maximálny výstupný prúd danej konfigurácie. [2]



Obr. 2-2: Fotovoltaický článok, panel a modul [1]

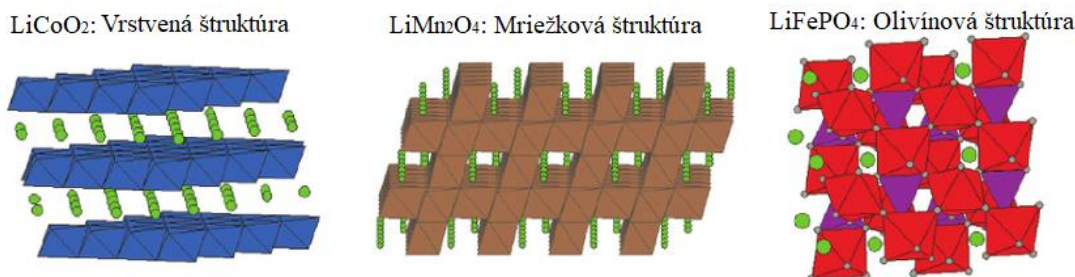
2.2 Li-Ion akumulátory

Li-Ion akumulátory sa skladajú z negatívnej elektródy (anóda), pozitívnej elektródy (katóda) a elektrolytu, ktorý elektródy izoluje. Pre nasledujúce vysvetlenie princípu fungovania je použitá LiCoO_2 katóda s grafitovou anódou. Katóda sa skladá sa z trojrozmernej osemstennej mriežky so striedavým rozložením vrstiev iónov lítia a iónov kobaltu, anóda z dvojrozmernej mriežky grafitu. Počas nabíjania sú ióny lítia vyťahované z katódy a sú presúvané do anódy, kde sa z nich stáva atóm lítia. Týmto procesom sa uvoľňuje elektrón a zároveň oxiduje atóm kobaltu (Obr. 2-3). Počas vybíjania je proces opačný. V roku 1991 tieto akumulátory spoločnosť Sony predstavila verejnosti pod názvom Lítium-iónové akumulátory [17].



Obr. 2-3: Princíp Li-Ion akumulátora [18]

Anóda Li-Ion akumulátorov obsahuje v závislosti na použití grafitové materiály, amorfné uhlíkové materiály, nitridy, materiály na báze kremíka, cínu, nano-oxidy a iné. Katóda často obsahuje lítium-kobalt oxid (LiCoO_2), lítium-nikel oxid (LiNiO_2), lítium-mangán oxid (LiMn_2O_4) a iné, ako napríklad aj lítium-železný oxid používaný najmä v lítium-železitých fosfátových (LiFePO_4) akumulátoroch. Najdrahším prvkom z pomedzi vymenovaných materiálov je kobalt, nasledovaný niklom, mangánom a železom. Materiály katódy bývajú často vo vrstvenej, mriežkovej alebo olivínovej štruktúre (Obr. 2-4). Ako elektrolyt používajú Li-Ion akumulátory lítiové soli, ktorých hlavnými požiadavkami sú dobrá teplotná a elektrochemická stabilita, vysoká vodivosť iónov a nízka cena [17].

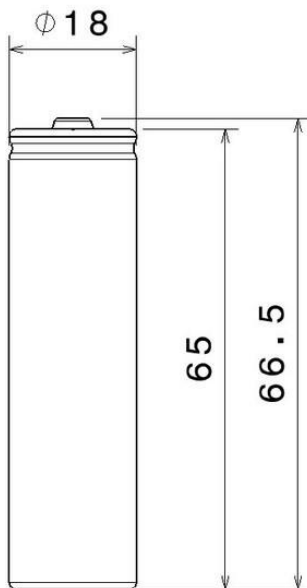


Obr. 2-4: Štruktúra katódy Li-Ion akumulátora [20]

2.2.1 Základné parametre

Akumulátory sa vyrábajú v rôznych veľkostiach. Jednou z najpoužívanejších je veľkosť 18650 (Obr. 2-5). Tieto články majú valcovitý tvar a názov je odvodený od fyzickej veľkosti, ktorá je 18x65 mm (Obr. 2-5). Kapacita článkov sa v súčasnosti pohybuje v rozmedzí 2200 – 3400 mAh v závislosti od použitých materiálov [14]. Pri

článkoch 18650 je v súčasnosti volumetrická kapacita až do 735 Wh/l a gravimetrická kapacita až do 275 Wh/kg. Kapacita, či už volumetrická alebo gravimetrická neustále rastie s výskumom a vývojom stávajúcich alebo nových technológií [17] [19].



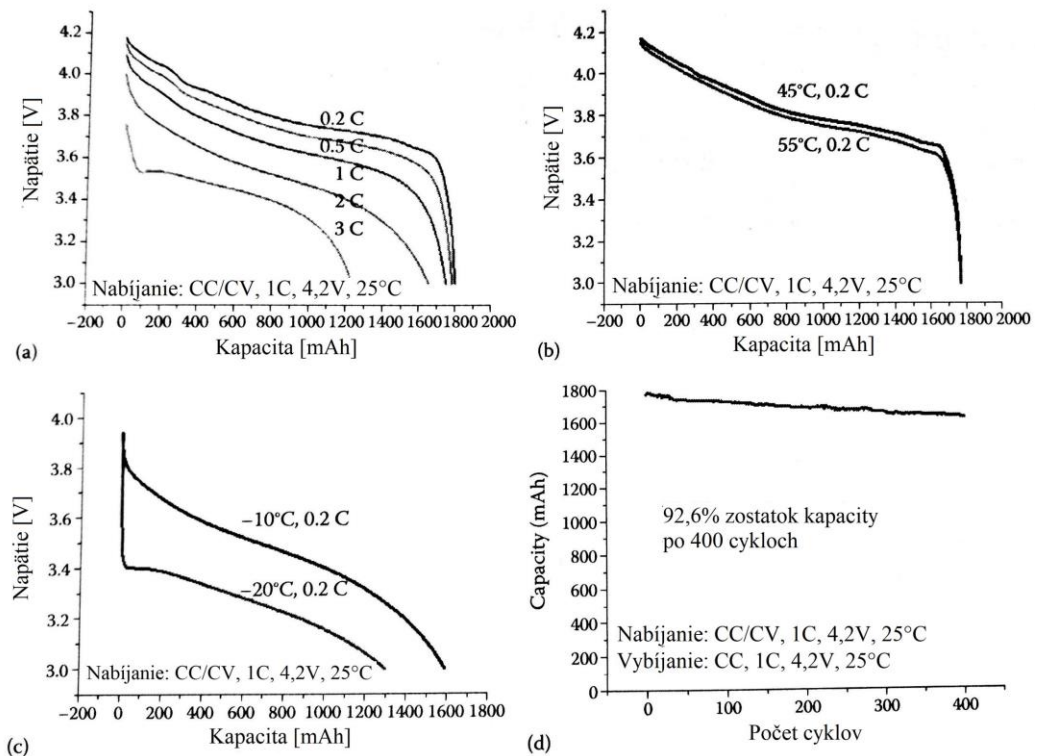
Obr. 2-5: Veľkosť a tvar článku 18650 (mm) [13]

Li-Ion akumulátory majú vlastnosť nízkeho samovybíjania a to menej ako 3 % kapacity za mesiac. Žiadny pamäťový efekt ako majú napríklad Ni-Cd a Ni-MH akumulátory, nominálne napätie 3,6 – 3,7 V a výkonovú hustotu až do 4000 W/kg pre pulzný výkon po dobu krátkej periódy. Ďalšími parametrami je vysoký nabíjací a vybíjací prúd, pri špecializovaných článkoch je až 100 C, špičkovy až 200 C, veľký rozsah prevádzkovej teploty, nabíjanie v rozmedzí 0 až 45 °C a vybíjanie pri -40 °C až +60 °C. Napokon bezúdržbovosť a dlhá výdrž z hľadiska počtu cyklov, bežne 1000 cyklov, pri vhodných podmienkach je dosiahnuteľných až 5000 cyklov [17] [19].

2.2.2 Základné typy podľa materiálu katódy

LiCoO₂

Akumulátory založené na katóde z LiCoO₂ a anóde z grafitu majú veľmi dobré elektrochemické vlastnosti, ako napríklad stabilné vybíjacie napätie, výbornú výdrž z hľadiska cyklov, nominálne napätie 3,7 – 3,85 V a pri vybíjaní 0,2 C je napäťová charakteristika plochá nad 3,6 V. Zostatková kapacita je na úrovni 92,6 % po 400 cykloch pri vybíjaní 1 C. Avšak prevádzková teplota by nemala presiahnuť 50 °C, pretože vyššia teplota rapídne skracuje životnosť. Reálne dáta ukazujú že valcové články (napr. 18650) s menšou kapacitou majú vyššiu životnosť ako prizmatické články. Teoretická vybíjacia kapacita je 140 mAh/g. Volumetrická energetická hustota je v súčasnosti na úrovni 400 – 735 Wh/l pre valcové články a 370 – 600 Wh/l pre prizmatické články. Gravimetrická energetická hustota je v súčasnosti 175 – 275 Wh/kg pre valcové články a 140 – 240 Wh/kg pre prizmatické články. Výkonová hustota je 1000 W/kg pre pulzný výkon. Stály vybíjací prúd je maximálne 3 C, špičkový 5 C [17] [18] [19].

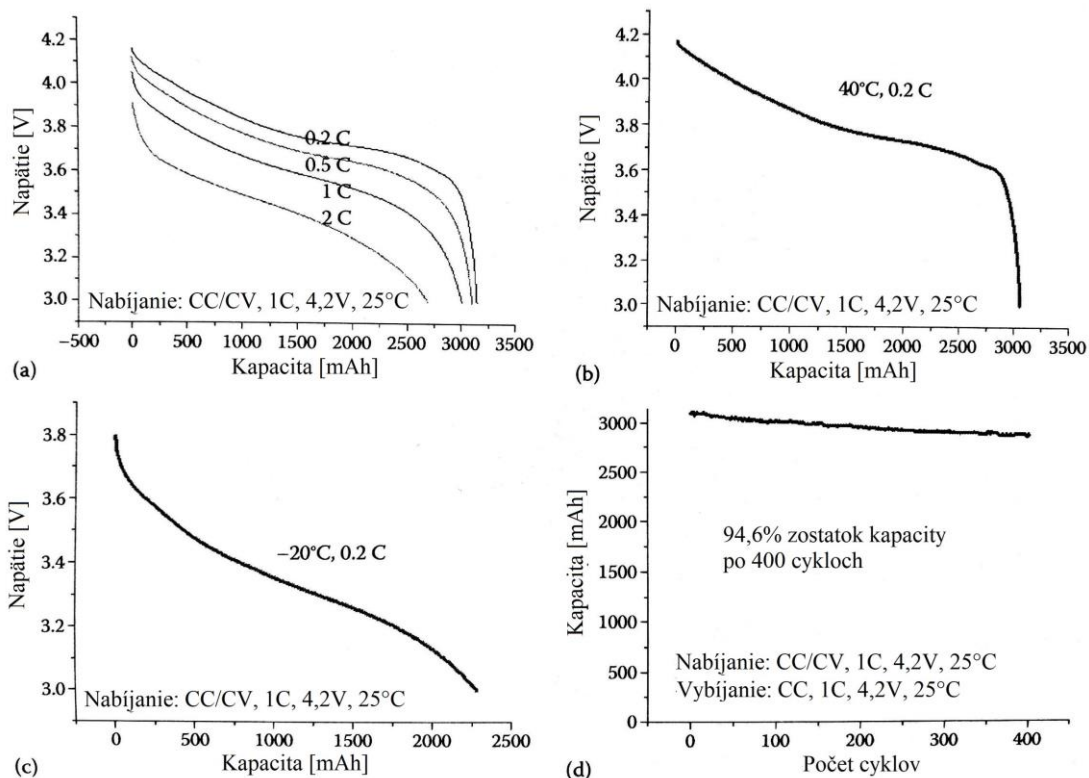


Obr. 2-6: Typické závislosti akumulátora s LiCoO₂ katódou [17]

(a) Závislosť kapacity na veľkosti vybijacieho prúdu, (b) (c) Závislosť kapacity na prevádzkovej teplote, (d) Závislosť kapacity na počte cyklov

LiNiO₂

Akumulátory založené na katóde z čistého LiNiO₂ nie sú komerčne dostupné, pretože ich výroba je veľmi zložitá a drahá. Komerčne sú dostupné LiNi_{0,7}Co_{0,3}O₂, ktoré majú katódu a anódu vyrobenú zmiešaním grafitu a koksu. Po 2000 cykloch pri 70% DOD ich zostatková kapacita je stále na úrovni 91 %. Pri akumulátoroch s katódou vyrobenou z LiCo_{0,15}Al_{0,05}Ni_{0,8}O₂ môže pri vybijaní 1 C 60 % DOD prekročiť životnosť až 300 000 cyklov. Akumulátory LiNi_xCo_yMn_{1-x-y}O₂ majú v porovnaní s LiCoO₂ nominálne napätie mierne nižšie 3,7 V pri vybijaní 0,2 C. Avšak ich životnosť je vyššia, keďže majú po 400 cykloch zostatkovú kapacitu 94,6 % pri vybijaní 1 C. Teoretická vybijacia kapacita je 145 mAh/g. Volumetrická a gravimetrická energetická hustota je v súčasnosti na úrovni 250 – 460 Wh/l, respektíve 100 – 175 Wh/kg. Výkonová hustota je 4000 W/kg pre pulzný výkon. Stály vybijací prúd je nad 30 C, špičkový nad 100 C. [17] [18] [19]



Obr. 2-7: Typické závislosti akumulátora s LiNiO₂ katódou [17]

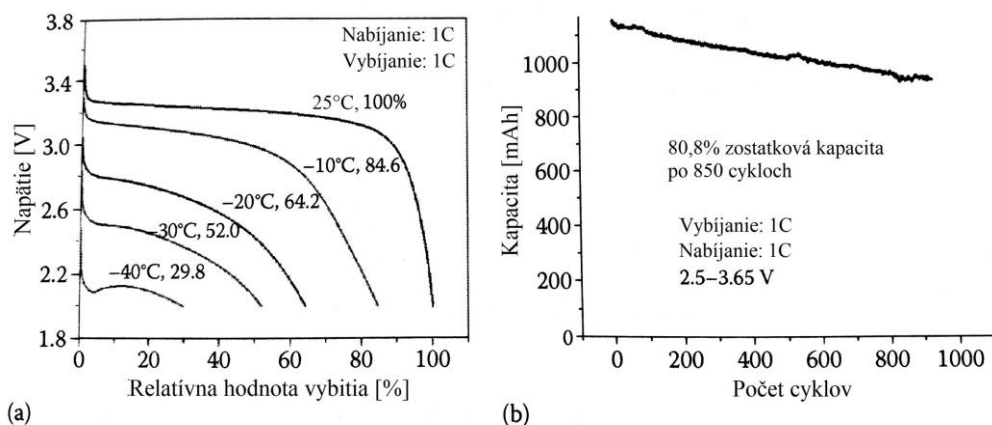
(a) Závislosť kapacity na veľkosti vybíjacieho prúdu, (b) (c) Závislosť kapacity na prevádzkovej teplote, (d) Závislosť kapacity na počte cyklov

LiMn₂O₄

Životnosť akumulátorov z hľadiska cyklov založených na čistom LiMn₂O₄ je veľmi malá, preto doteraz neboli v komerčnej výrobe. Súčasne komerčne dostupné batérie sú dopované LiMn₂O₄, ktoré majú zostatkovú kapacitu 85 % po 500 cykloch. Teoretická vybíjacia kapacita je 130 mAh/g. [17] [18]

LiFePO₄

Pri použití katódy z LiFePO₄ a anódy z grafitu sú vybíjacie charakteristiky takéhoto článku veľmi ploché, pri izbovej teplote je nominálne napätie 3,2 – 3,3 V, s klesajúcou teplotou napätie pomerne dosť klesá a tým klesá aj užitočná kapacita článku. Pri teplote -40 °C je na úrovni iba 30 %. Pri prekročení teploty nad 55 °C sa zhoršuje výkonnosť článku a klesá životnosť. Zostatková kapacita je po 950 cykloch na úrovni 80,8 % pri vybíjaní 1 C. Teoretická vybíjacia kapacita je 170 mAh/g. Volumetrická a gravimetrická energetická hustota je v súčasnosti na úrovni 125 – 250 Wh/l, respektíve 60 – 110 Wh/kg. Výkonová hustota je 4000 W/kg pre pulzný výkon. Stály vybíjací prúd je 10 – 125 C, špičkový do 250 C [17] [18] [19].



Obr. 2-8: Typické závislosti akumulátora s LiFePO₄ katódou [17]

(a) Závislosť využiteľnej kapacity na prevádzkovej teplote, (b) Závislosť kapacity na počte cyklov

Zhrnutie

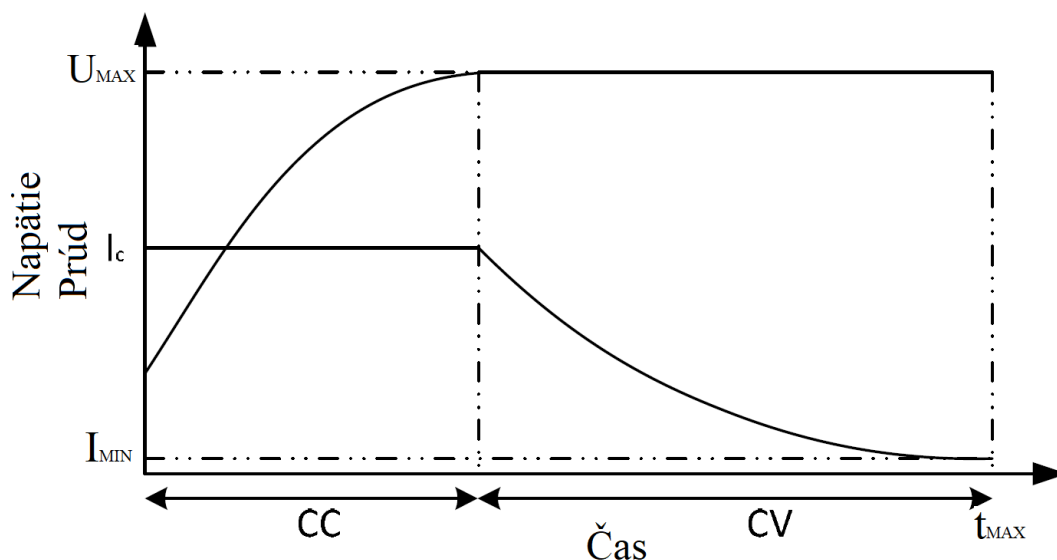
Z prehľadu rôznych typov akumulátorov podľa materiálu katódy vyplýva, že každý akumulátor je vhodný na inú cieľovú aplikáciu. Pre použitie v UAV je potrebná vysoká volumetrická a gravimetrická hustota energie a zároveň relatívne vysoký vybíjací prúd, podľa kapacity zhruba 20 – 30 C. LiFePO₄ sú pre túto aplikáciu úplne nevhodné kvôli vysokej hmotnosti. LiCoO₂ sú nevhodné z dôvodu nízkeho maximálneho vybíjacieho prúdu. Najvhodnejšou kombináciou je zloženie LiCoO₂, ktoré sú kompromisom medzi LiFePO₄ a LiNiO₂ s vysokým trvalým vybíjacím prúdom a zároveň dobrou energetickou hustotou a komerčnou dostupnosťou.

2.2.3 Nabíjanie

Li-Ion akumulátory je nutné nabíjať CC – CV (constant current – constant voltage) algoritmom. Tento algoritmus je v súčasnosti dobre vyvinutý a je jednoduchý na implementáciu.

Akumulátory nabíjané CC – CV algoritmom prechádzajú dvoma fázami, 1. fázou je fáza kedy je akumulátor nabíjaný konštantným prúdom (I_C), až pokiaľ nedosiahne hodnotu maximálneho napätia (U_{MAX}) nastavenú pred začiatkom nabíjania. Nasleduje 2.fáza, kedy je na akumulátore udržiavané konštantné napätie (U_{MAX}), vtedy prúd tečúci do akumulátora začne exponenciálne klesať. Nabíjanie sa zastaví v okamihu, keď nabíjací prúd klesne pod malú hodnotu (I_{MIN}) nastavenú pred začiatkom nabíjania, obvykle $I_{MIN} < 0,1$ C, prípadne vtedy, ak je prekročený maximálny čas nabíjania (t_{MAX}), stanovený rovnako pred začiatkom nabíjania (Graf 2-3) [22].

Graf 2-3: CC - CV algoritmus nabíjania [22]



Pred začiatkom nabíjania je nutné s ohľadom na bezpečnosť a ochranu akumulátorov skontrolovať napätie akumulátora naprázdno (U_{OC}). Ak je napätie naprázdno menšie ako minimálne napätie akumulátora (U_{CUTOFF}) je nutné ho nabíjať maximálnym prúdom 0,1 C, až pokiaľ jeho napätie prekročí U_{CUTOFF} , následne sa prejde do režimu CC. Na základe veľkosti maximálneho prúdu v CC režime sa celkový čas nabíjania môže pohybovať rozsahu 1 – 2,5 hodiny. Vo všeobecnosti použitie nižšieho prúdu pri nabíjaní zvyšuje účinnosť, predlžuje životnosť akumulátorov, ale predlžuje čas potrebný na kompletne nabitie [22].

Od algoritmu CC – CV bolo odvodených niekoľko druhov algoritmov. Nasledujúce 2 druhy sú mierne upravené CC – CV. Prvým je algoritmus DL – CC/CV (Double loop control charger), ktorý má negatívnu a pozitívnu spätnú väzbu napätia akumulátora, čo mu umožňuje nastaviť podobný profil nabíjania ako CC – CV, ale bez snímania nabíjacieho prúdu. Ďalším druhom je BC – CC/CV (Boost charger), ktorý vyžaduje kompletne vybitie akumulátora pred opätovným nabitím. Tento algoritmus používa pred CC fázou nabíjania napätie o 0,1 V vyššie ako maximálne napätie batérie (4,3 V), ktoré nabíja akumulátor vyšším prúdom ako pri fáze CC. Táto fáza trvá zhruba do 60% nominálnej kapacity, čím urýchli celý proces nabíjania. Následne sa prechádza do bežnej CC – CV metódy. Z dôvodu nutnosti kompletneho vybitia akumulátora pred opätovným nabitím, vyžaduje tento algoritmus vybíjací obvod, čo je nevhodná vlastnosť pre veľkosťou limitované aplikácie [22].

Pri spájaní Li-Ion akumulátorov do sériových kombinácií vplyvom prevádzkových podmienok a mierne odlišných vlastností článkov sa každý článok vybíja na mierne odlišnú hodnotu napätia. Pri následnom nabíjaní je nutné balancovanie jednotlivých článkov, aby sa zabránilo tomu, že niektorý článok, bude nabíjaný na vyššiu hodnotu napätia ako ostatné, čím môže dôjsť k prekročeniu maximálneho napätia článku. Následkom čoho sa skrakuje životnosť a klesá celková kapacita akumulátorov [23].

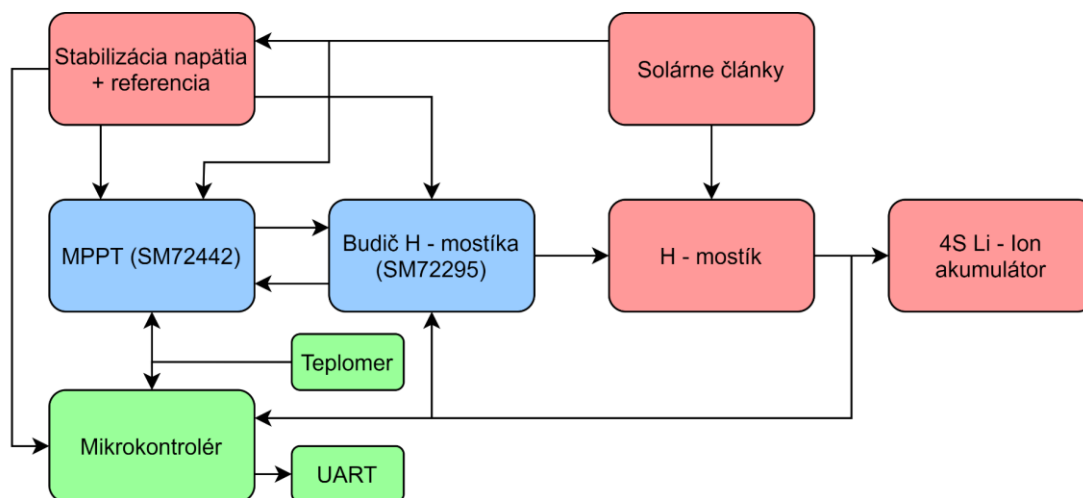
3. NÁVRH MPPT REGULÁTORA

3.1 Základná koncepcia a požiadavky

UAV spotrebováva energiu z palubných akumulátorov hlavne pri motorovom lete. Vhodným využitím stúpaných termických prúdov je možné letový čas predĺžiť až na niekoľko hodín, bez opätovného zapnutia motora pre získanie výšky. Pri krúžení v termickom lete UAV spotrebováva energiu iba na napájanie palubnej elektroniky pohonu kormidiel a riadenia + telemetrie. Táto spotreba je rádovo nižšia ako pri motorovom lete. Spotrebu palubnej elektroniky je teoreticky možné pokryť napájaním pomocou fotovoltaických článkov vhodne umiestnených na krídle, pri prebytku výkonu aj eventuálne nabíjať palubné akumulátory.

Keďže pri lete sa UAV nakláňa v rozsahu $20 - 40^\circ$ od horizontálnej polohy, tak svetelné pomery na fotovoltaických článkoch umiestnených na krídlach sa pomerne rýchlo menia. Z tohto dôvodu je základnou požiadavkou regulátora reagovať na tieto zmeny a meniť polohu MPP fotovoltaických článkov tak, aby bol zaistený maximálny výstupný výkon fotovoltaického panela s periódou menej ako 1 s.

Príloha A zobrazuje kompletnú schému zapojenia celého MPPT regulátora, ktorá je rozdelená na 3 listy. Na nasledujúcom obrázku je jeho zjednodušená bloková verzia. V nasledujúcich kapitolách sú popísané hlavné bloky.



Obr. 3-1: Bloková schéma MPPT regulátora

3.2 Fotovoltaické články a akumulátory v UAV

V UAV na krídlach budú použité ohybné monokryštalické fotovoltaické články SunPower Maxeon C60. Základné parametre jednotlivých fotovoltaických článkov sú v Tab. 3-1. Napätie jednotlivých článkov zároveň klesá pri zvyšovaní teploty o $-1,8 \text{ mV}/^\circ\text{C}$. Tým pádom musí klesať aj celkový výkon na článok a to o $-0,32 \text{ } \%/^\circ\text{C}$ [16]. Graf 3-1 zobrazuje typickú VA charakteristiku použitého fotovoltaického článku v závislosti na osvetlení. Z grafu je tiež zrejmé, že pre dosiahnutie maximálneho

užitočného výkonu fotovoltaického panela je nutný regulátor, ktorý bude schopný pracovný bod s maximálnym výstupným výkonom (MPP) nájsť a udržiavať v závislosti na osvetlení článkov. Celkovo bude na krídle použitých 20 fotovoltaických článkov zapojených v sérii, z čoho vyplýva maximálne napätie článkov naprázdno (U_{OC}) 13,74 V a v optimálnom pracovnom bode (U_{MPP}) 11,64 V. Maximálny teoretický výkon panela je 68,4 W.

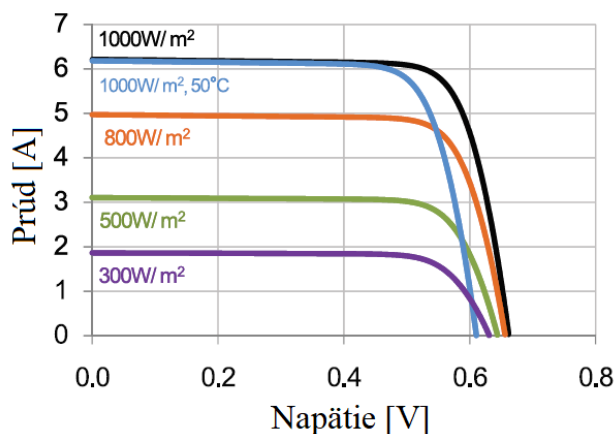
Tab. 3-1: Typické parametre fotovoltaického článku Maxeon C60 pri STC [16]

Bin	P_{MPP} [Wp]	η [%]	U_{MPP} [V]	I_{MPP} [A]	U_{OC} [V]	I_{SC} [A]
G	3,34	21,8	0,574	5,83	0,682	6,24
H	3,38	22,1	0,577	5,87	0,684	6,26
I	3,40	22,3	0,581	5,90	0,686	6,27
J	3,42	22,5	0,582	5,93	0,687	6,28

Pozn: STC = Standard test conditions (štandardné testovacie podmienky):
1000 W/m², 25°C, AM 1,5g

P_{MPP}	Maximálny výkon článku v MPP
η	Účinnosť
U_{MPP}	Napätie v MPP
I_{MPP}	Prúd v MPP
U_{OC}	Napätie nezaťaženého článku
I_{SC}	Skratový prúd článku

Graf 3-1: VA charakteristika Maxeon C60 v závislosti na osvetlení [16]



Momentálne sú v UAV použité pohonné akumulátory typu Li-Ion SONY VTC6 v zapojení 4S5P veľkosti 18650 z čoho vyplýva, že pri maximálnom napätí pri nabití 4,2 V/článok je maximálne napätie akumulátora 16,8 V s nominálnou kapacitou 3000 mAh. Maximálny trvalý nabíjací prúd jedného článku je 4 A [12]. Po implementácii fotovoltaických článkov do krídla, bude pohonný akumulátor zmenšený na konfiguráciu 4S3P. Zmenou usporiadania akumulátorov klesne nominálna energetická kapacita akumulátorov, ktorá je v prípade usporiadania 4S5P 216 Wh resp. 129,6 Wh v prípade 4S3P. Reálne využiteľná kapacita akumulátora je zhruba 85 % z nominálnej kapacity,

z dôvodu nepriaznivých účinkov na dlhodobú životnosť v prípade vybíjania na nižšiu hodnotu. Aktuálna spotreba palubnej elektroniky je zhruba na úrovni 12 W, avšak pri použití motorového letu je možné sa dostať až na stovky wattov, preto sú výpočty uvádzané pre priemernú spotrebu. Momentálne pri použití 4S5P akumulátoroch je maximálny letový čas zhruba 7 h, z čoho môžeme vypočítať priemerný výkon odoberaný z akumulátorov (4).

$$P = \frac{E_{4S5P} \cdot 0,85}{t} = \frac{216 \cdot 0,85}{7} = 26,2 \text{ W} \quad (4)$$

Z dôvodu nakláňania UAV voči slnku, nedokonalkej priepustnosti povrchu krídla a účinnosti regulátora pod 100 %, je zvolený priemerný nabíjaci výkon na 40 % maximálneho výkonu fotovoltaického panela. Cieľom je dostať letový čas UAV nad 10 h. Zo zadaných parametrov vieme vypočítať celkový čas, za ktorý UAV pri priemernej spotrebe vybije 4S3P akumulátor, odpočítaním od 10 h a vynásobením s priemerným odoberaným výkonom dostaneme hodnotu energie potrebnú pre let po spotrebovaní energie z akumulátora. Následne po vydelení priemerným výkonom panela dostaneme čas, ktorý je potrebný pre osvetlenie fotovoltaických panelov pre 10 hodinový let (5).

$$t = \frac{\left(t_{10h} - \frac{E_{4S3P} \cdot 0,85}{P}\right) \cdot P}{P_{PV} \cdot 0,4} = \frac{\left(10 - \frac{129,6 \cdot 0,85}{26,2}\right) \cdot 26,2}{68,4 \cdot 0,4} = 5,5 \text{ h} \quad (5)$$

UAV má aktuálne vzletovú hmotnosť 3850 g. So zmenou usporiadania akumulátorov sa klesne hmotnosť o 400 g, čo sa rozdelí na hmotnosť fotovoltaických panelov v krídle, kabeláže a samotného MPPT regulátora. Hmotnosť finálneho riešenia MPPT regulátora je požadovaná do 50 g, pri rozmeroch maximálne do 67x37x37 mm, čo zodpovedá rozmerom ušetreného 4S1P Li-Ion akumulátoru.

Z praktických skúseností vyplýva, že pri balancovaní akumulátorov pred každým letom stačí na to, aby počas letu nedošlo k rozdielu medzi napätiami článkov na viac ako 50 mV. Z tohto dôvodu a taktiež z dôvodu jednoduchosti a striktných požiadaviek na rozmery a hmotnosť celého MPPT regulátora, sa neuvažuje o balancovaní jednotlivých Li-Ion článkov. Preto maximálne výstupné napätie regulátora bude o 200 mV nižšie, ako maximálne napätie pohonného akumulátora, čiže 16,6 V. Zo vstupného a výstupného napätia je zrejmé, že MPPT regulátor musí pracovať v režime zvyšujúceho meniča (boost).

3.3 Riadiaci obvod a budič H-mostíka

Dostupných zvyšujúcich (boost) meničov s MPPT funkcionalitou je na trhu dostupných len niekoľko druhov. Menovite LT8490 od Linear Technology a SM72441, SM72442 a SM72445 od Texas Instruments.

Výhodou integrovaného obvodu LT8490 je, že obsahuje integrovaný budič pre MOSFET tranzistory zapojených v H-mostíku, ktorý určuje aj maximálne vstupné napätie (6 – 80V) a výstupné napätie (1,3 – 80 V), s ktorým môže obvod pracovať. Avšak z dôvodu nutnosti rýchleho MPPT algoritmu nie je vhodný na použitie, pretože bod MPP fotovoltaických článkov nájde až za 2 s [24].

Pri obvodoch od Texas Instruments je rýchlosť MPPT algoritmu 10 ms, avšak potrebujú externý budič H-mostíka a zosilňovače pre snímanie úbytku napätia na

rezistoroch pre vstupný a výstupný prúd. Tab. 3-2 zobrazuje rozdielne parametre medzi vymenovanými integrovanými obvodmi od Texas Instruments.

Tab. 3-2: Rozdiel medzi parametrami IO od Texas Instruments [25] [26] [27]

	Spínacia frekvencia [kHz]	AD prevodník	Prídavné funkcie	Dostupnosť
SM72441	210	12 – bit	–	Nie
SM72442	210	10– bit	I ² C, Panel mode	Áno
SM72445	110/135/210	10 – bit	I ² C, Panel mode	Áno

Pre aplikáciu so striktnými požiadavkami na celkovú veľkosť je vhodná čo najvyššia spínacia frekvencia, pretože v H-mostíku bude možné použiť menšiu indukčnosť a výstupnú kapacitu, pre dosiahnutie požadovanej hodnoty zvlnenia výstupného napätia. Z dôvodu nedostupnosti SM72441 bol teda zvolený SM72442. Ako budič H-mostíka bol vybratý SM72295 tiež od Texas Instruments, hlavne z dôvodu minimalizácie počtu súčiastok, keďže obsahuje integrované zosilňovače úbytku napätia na snímacích rezistoroch, ktoré sú použité pre snímanie vstupného a výstupného prúdu.

3.3.1 MPPT regulátor SM72442

Tento IO kontroluje 4 PWM signály, ktoré obsluhujú budič pre spínanie MOSFET tranzistorov zapojených do H-mostíka. Okrem MPPT algoritmu, ktorý zaisťuje nájdenie MPP fotovoltaického panelu obsahuje aj Panel Mode. Táto funkcia umožňuje priame pripojenie panelu na výstup premostením H-mostíka MOSFET tranzistorom v prípade, že panel spĺňa určité parametre. Priamo do IO je integrovaný 8-kanálový 10-bitový AD prevodník, ktorý sa používa na snímanie vstupných, výstupných a konfiguračných parametrov. SM72442 ako doplnkovú funkciu obsahuje I²C komunikačné rozhranie, vďaka ktorému je možné z obvodu čítať aktuálne hodnoty výstupných veličín a meniť konfiguračné parametre. Zároveň je dostupný v puzdre TSSOP-28 [26].

Nastaviteľné parametre:

- Maximálne výstupné napätie
- Výstupná nadprúdová ochrana
- Rýchlosť náběhu výstupného napätia (slew rate)
- Hranicu prúdu pre vstup z MPPT do Panel mode a naopak

Maximálne výstupné napätie je nastavené kombináciou deliča napätia na pine A0 a na pine snímania výstupného napätia AVOUT (6) [26].

$$\begin{aligned}
 U_{OUT_MAX} &= 5 \cdot \frac{R_{B1}}{R_{T1} + R_{B1}} \cdot \frac{(R_{FB1} + R_{FB2})}{R_{FB2}} \\
 &= 5 \cdot \frac{31,2}{6,49 + 31,2} \cdot \frac{(12,7 + 4,22)}{4,22} = 16,595 \text{ V}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Výstupná nadprúdová ochrana je nastavená deličom napätia na pine A4. V prípade, že napätie na pine A4 je rovné napätiu na pine AIOUT, ktoré je výstupom zosilňovača úbytku napätia na snímacom rezistore, dôjde k aktivácii interného resetu a k okamžitému zastaveniu funkcie regulátora. Nadprúdová ochrana bola nastavená na maximálnu hodnotu výstupného prúdu 7 A. Pri tomto prúde bude na výstupnom snímacom rezistore úbytok napätia 49 mV. Z tohto úbytku je vypočítané zosilnenie vstavaného zosilňovača snímacích rezistorov v budiči SM72295, ktoré je dané kombináciou odporov pripojených na piny IOU_T a SIB. Výsledné maximálne napätie na pine AIOUT je rovné 4,615 V (7), z čoho vyplýva, že na pine A4 MPPT regulátora je nutné deličom napätia nastaviť rovnaké napätie, pre využitie funkcie nadprúdovej ochrany (8) [26] [28].

$$U_{AIOUT_MAX} = \frac{R_{IOUT}}{R_{SIB}} \cdot I_{OUT_MAX} \cdot R_{SH} = \frac{47000}{499} \cdot 7 \cdot 0,007 = 4,615 \text{ V} \quad (7)$$

$$U_{A4} = 5 \cdot \frac{R_{B3}}{R_{T3} + R_{B3}} = 5 \cdot \frac{240}{20 + 240} = 4,615 \text{ V} \quad (8)$$

Z dôvodu rýchlej zmeny osvetlenia na fotovoltaických paneloch sa neustále bude meniť ich optimálny pracovný bod, preto v aplikácii nie je uvažovaný Panel mode a pin A2, ktorý nastavuje hodnotu prechodu medzi MPPT a Panel mode režimom, je nastavený na hodnotu 5V. Pin A6, ktorý určuje hodnotu prúdu kedy sa prechádza do MPPT režimu musí byť nastavený na viac ako 4,69 V (9) [26].

$$U_{A6} = 5 \cdot \frac{R_{B4}}{R_{T4} + R_{B4}} = 5 \cdot \frac{340}{20 + 340} = 4,722 \text{ V} \quad (9)$$

Hodnoty konfiguračných rezistorov:

R _{T1} = 6,49 k / 0,1%	R _{B1} = 31,2 k / 0,1 %
R _{T2} = 2 k	R _{B2} = 1 M
R _{T3} = 20 k	R _{B3} = 240 k
R _{T4} = 20 k	R _{B4} = 340 k
R _{FB1} = 12,7 k / 0,1 %	R _{FB2} = 4,22 k / 0,1 %

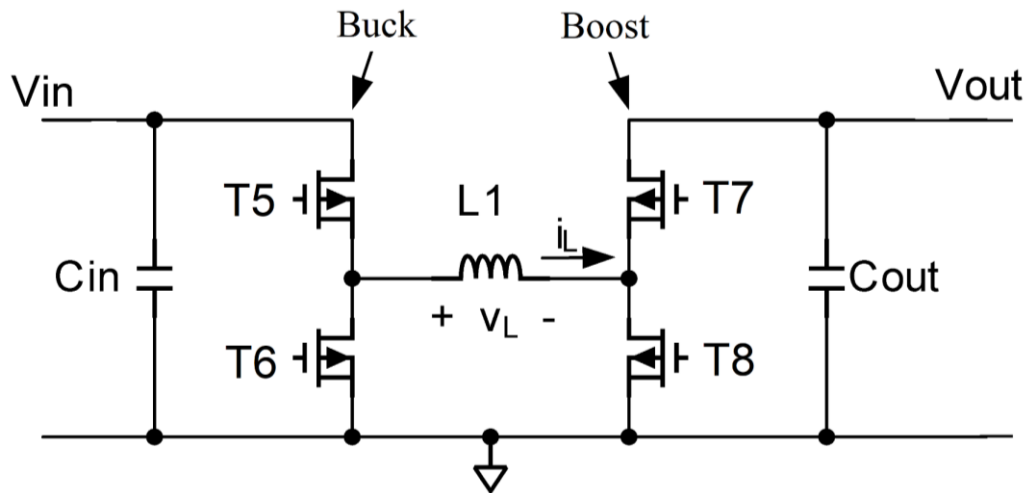
3.3.2 Budič H-mostíka SM72295

Tento IO slúži k budeniu H-mostíka, ktorý je tvorený zapojením 4 N-kanálových MOSFET tranzistorov. Použitie puzdro má označenie SOIC-28. Pre rýchle spínanie tranzistorov poskytuje až 3 A špičkového prúdu a zároveň obsahuje rýchle bootstrap diódy, ktoré spolu s externými kondenzátormi zabezpečujú spínanie tranzistorov s plávajúcím uzemnením. Tiež obsahuje 2 integrované zosilňovače s nastaviteľným zosilnením pre snímanie úbytkov napätí na snímacích rezistoroch. Výstupy zosilňovačov sú zapojené na napäťové sledovače a vyvedené na výstupné piny pre poskytnutie informácie o prúdoch kontrolnému IO SM72442. Na pine OVS nájdeme externé nastaviteľný vstup komparátora, slúžiaci k snímaniu prekročenia výstupného napätia. V prípade prekročenia napätia $U_{OVS} > U_{DD}$, dôjde k signalizácii prepätia hodnotou 0 V na pine OVP. Preto je na OVS zapojený delič napätia, ktorý zaistí hodnotu napätia, pri ktorej dôjde k signalizácii (10) [28].

$$U_{OVS} = U_{OUT_MAX} \cdot \frac{R_{OVS2}}{R_{OVS1} + R_{OVS2}} = 17,15 \cdot \frac{10}{24,3 + 10} = 5 \text{ V} \quad (10)$$

3.4 H-mostík

Zapojenie N-kanálových MOSFET tranzistorov v H-mostíku DC-DC meniča umožňuje nižšie alebo vyššie výstupné napätie, ako je vstupné napätie (buck-boost). Od kombinácie vstupnej a výstupnej kapacity a od indukčnosti cievky zapojenej v strede mostíka závisí celkové zvlnenie výstupného napätia [29].



Obr. 3-2: Základné zapojenie H-mostíka [29]

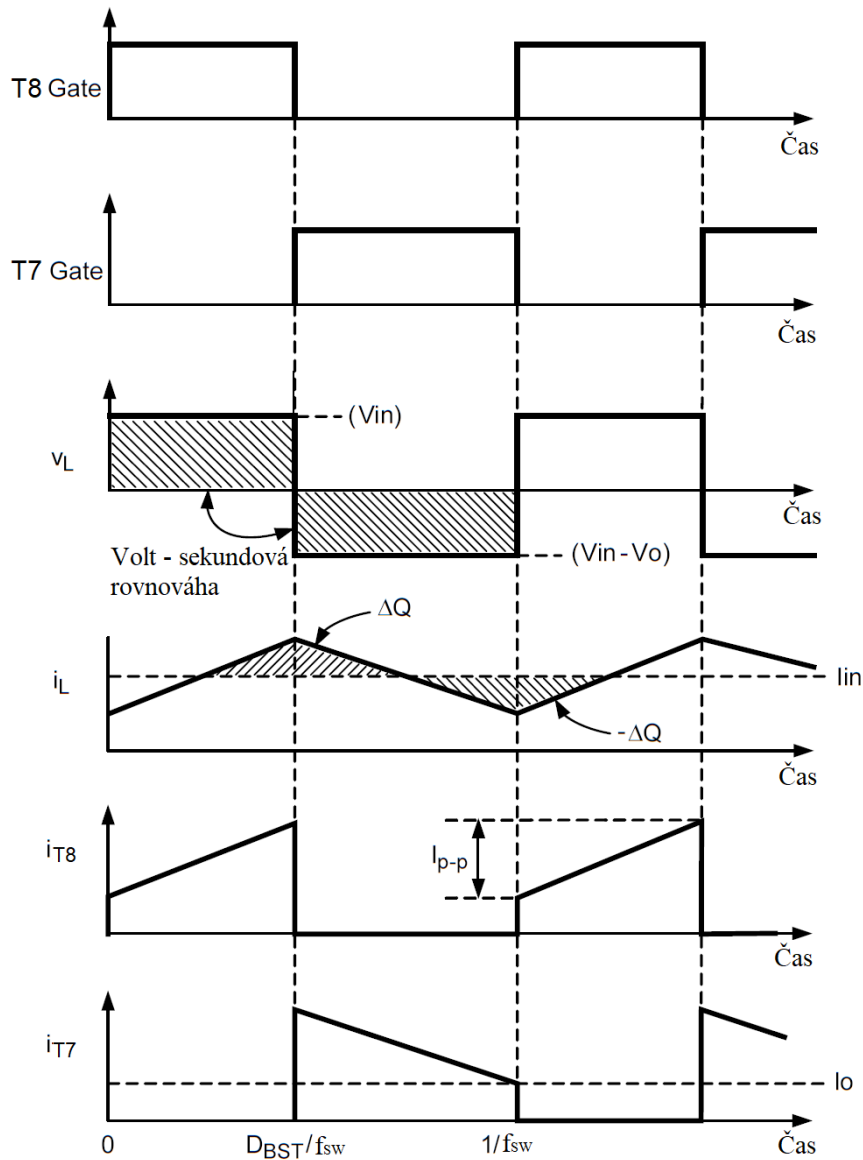
Keďže výstupné napätie bude vždy vyššie ako vstupné, bude regulátor vždy pracovať vo zvyšujúcom režime. V tomto režime bude tranzistor T7 a T8 spínaný navzájom inverzne. Napätie na cievke U_L je rovné napájaciemu napätiu v prípade, že je zopnutý tranzistor T8, v prípade zopnutia T7 je napätie U_L rovné $U_{IN} - U_{OUT}$. Pre ustálený stav platí pre cievku rovnica volt – sekundovej rovnováhy (11) [29].

$$U_{IN} \cdot D + (U_{IN} - U_{OUT}) \cdot (1 - D) = 0 \quad (11)$$

Úpravou rovnice dostaneme striedu spínania meniča vo zvyšujúcom režime (12) [29].

$$D_{BST} = \frac{U_{OUT} - U_{MPP}}{U_{OUT}} = \frac{16,6 - 11,64}{16,6} = 0,299 \quad (12)$$

Obr. 3-3 zobrazuje meniace sa napätia a prúdy v H-mostíku vo zvyšujúcom režime na tranzistoroch T7 a T8 a zároveň napätie a prúd na cievke.



Obr. 3-3: Zobrazenie prúdov a napätí v H-mostíku vo zvyšujúcom režime [29]

3.4.1 Cievka

Z Obr. 3-3 je zrejmé, že keď je tranzistor T8 zopnutý, je na cievke napätie U_{IN} , a prúd cez cievku I_L rastie lineárne, následne po zopnutí T7 prúd lineárne klesá. Z toho vyplýva zvlnenie prúdu na cievke (13) [29].

$$I_{P-P} = \frac{U_{MPP} \cdot D_{BST}}{L_1 \cdot f_{SW_min}} = \frac{11,64 \cdot 0,299}{5,48 \cdot 10^{-6} \cdot 180 \cdot 10^3} = 3,528 \text{ A} \quad (13)$$

Z dôvodu tolerancie a teoretickej rezervy je vhodné maximálny prúd cievky obmedziť na 60% prúdu I_{P-P} . Následne požadovanú minimálnu indukčnosť cievky vypočítame podľa (14) [29].

$$L_1 \geq \frac{U_{MPP}^2 \cdot D_{BST}}{0,6 \cdot P_{MAX} \cdot f_{SW_min}} = \frac{11,64^2 \cdot 0,299}{0,6 \cdot 68,4 \cdot 180 \cdot 10^3} = 5,48 \mu\text{H} \quad (14)$$

Cievka zároveň musí zvládnuť bez saturácie maximálny prúd I_{PK} daný rovnicou (15) [29].

$$I_{PK} = \frac{P_{MAX}}{U_{MPP}} + \frac{U_{MPP} \cdot D_{BST}}{2 \cdot L_1 \cdot f_{SW_min}} = \frac{68,4}{11,64} + \frac{11,64 \cdot 0,299}{2 \cdot 5,48 \cdot 10^{-6} \cdot 180 \cdot 10^3} = 7,64 \text{ A} \quad (15)$$

Cievku je vhodné vybrať takú, ktorá má malý vnútorný odpor z dôvodu čo najnižších výkonových strát, malú veľkosť, nízku cenu a tienenu pre malé elektromagnetické vyžarovanie do okolia. Zo zobrazených cievok v Tab. 3-3 spĺňajúce požadované parametre, je na tom najlepšie SRP1265A-6R8 s najmenším vnútorným odporom a rozmermi, aj keď za cenu mierne vyššej ceny.

Tab. 3-3: Porovnanie parametrov cievok

Názov	Indukčnosť [μH]	I_{RMS} [A]	I_{SAT} [A]	R_{DC} [m Ω]	Rozmery [mm]	Cena [€]
SRP1280-5R6	$5,6 \pm 30\%$	8	8,5	16	12,5x12,5x7,5	0,77
SRP1265A-6R8	$6,8 \pm 20\%$	11,5	18	9,5	13,5x12,5x6,2	1,13
SRP1250-6R0	$6 \pm 20\%$	9,5	14	10	13,9x13,5x5,2	1,21
HCM1A1305V2-6R0-R	$6 \pm 20\%$	9,7	16	12,7	13,5x12,6x5	1,88

3.4.2 Kondenzátory

V Obr. 3-3 v časti zvlnenia výstupného prúdu na cievke je vyznačená oblasť, kedy je presúvaný celkový náboj z a do vstupných a výstupných kondenzátorov. Veľkosť náboja sa dá vypočítať podľa (16) a (17) [29].

$$\Delta Q_{BK} = \frac{(1 - D_{BST}) \cdot U_{OUT}}{8 \cdot f_{SW_min}^2 \cdot L_1} = \frac{(1 - 0,299) \cdot 16,6}{8 \cdot (180 \cdot 10^3)^2 \cdot 6 \cdot 10^{-6}} = 7,48 \mu\text{C} \quad (16)$$

$$\Delta Q_{BST} = \frac{D_{BST} \cdot U_{MPP}}{8 \cdot f_{SW_min}^2 \cdot L_1} = \frac{0,299 \cdot 11,64}{8 \cdot (180 \cdot 10^3)^2 \cdot 6 \cdot 10^{-6}} = 2,24 \mu\text{C} \quad (17)$$

Z týchto rovníc je potom možné vypočítať potrebnú kapacitu kondenzátorov na vstupe a výstupe pre maximálne zvlnenie napätia stanovené na 50 mV (18) (19) [29].

$$C_{IN} = \frac{\Delta Q_{BST}}{\Delta U_{IN}} = \frac{2,24 \cdot 10^{-6}}{0,05} = 44,8 \mu\text{F} \quad (18)$$

$$C_{OUT} = \frac{\Delta Q_{BK}}{\Delta U_{OUT}} = \frac{7,48 \cdot 10^{-6}}{0,05} = 149,6 \mu\text{F} \quad (19)$$

Z dôvodu nedostatku miesta na DPS a nízkeho vnútorného odporu bude v regulátore použitá kombinácia keramických kondenzátorov s polymérovými, ktoré majú nízky vnútorný odpor (rádovo m Ω), opäť pre minimalizovanie výkonových strát. Hlavnou nevýhodou keramických kondenzátorov s kapacitou rádovo μF , je ich veľká závislosť kapacity na priloženom napätí (DC bias). Z vybraných typov kondenzátorov, ktoré sú

v Tab. 3-4, sú na tom z hľadiska najmenej zmeny kapacity pri požadovanom napätí najlepšie TMK325BJ226MM-P so zároveň relatívne nízkou cenou.

Tab. 3-4: Porovnanie parametrov keramických kondenzátorov

Názov	Kapacita [μF]	Napätie [V]	DC bias @ 12 V [%]	DC bias @ 16,5 V [%]	Puzdro	Cena @10 ks [€]
TMK212BBJ106MG-T	10±20%	25	-75	-85	0805	0,07
TMK212BBJ226MG-TT	22±20%	25	-81	-90	0805	0,32
TMK325BJ226MM-P	22±20%	25	-50	-69	1210	0,28
TMK325ABJ476MM-P	47±20%	25	-70	-80	1210	0,96

3.4.3 Tranzistory

Ako spínacie tranzistory budú použité unipolárne N-kanálové MOSFETy. Z dôvodu obmedzeného prúdu, ktorý vie budič H-mostíka dodať do gate týchto tranzistorov, je vhodné z dôvodu účinnosti zvoliť tranzistory s čo najnižším nábojom gate – source (Q_G), ktorý je potrebný na nabitie prechodu, čím bude skrátený čas v lineárnej oblasti a tým aj znížený dynamický stratový výkon. Ďalšou dôležitou vlastnosťou z hľadiska účinnosti je veľkosť odporu kanálu v zopnutom režime $R_{DS(ON)}$. Na základe prevádzkového napätia a prúdu je v Tab. 3-5 uvedených niekoľko tranzistorov v rovnakom puzdre spolu s vypočítanými stratovými výkonmi. Všetky nasledujúce výpočty sú pre NTMFS4955NT3G [31]. Dynamický stratový výkon gate pri spínaní sa vypočíta podľa (20), straty počas spínania podľa (21), statické vodivostné straty podľa (22) a celkový stratový výkon potom bude rovný ich súčtu (23) [30].

$$P_G = Q_G \cdot U_G \cdot f_{SW_max} = 21,5 \cdot 10^{-9} \cdot 10 \cdot 220 \cdot 10^3 = 47,3 \text{ mW} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} P_{SW} &= U_{DS} \cdot \frac{P_{MAX}}{U_{MPP}} \cdot f_{SW_max} \cdot \frac{(Q_{GS} + Q_{GD})}{I_G} \\ &= 16,6 \cdot \frac{68,4}{11,64} \cdot 220 \cdot 10^3 \cdot \frac{(3,8 \cdot 10^{-9} + 4,2 \cdot 10^{-9})}{3} \\ &= 57,2 \text{ mW} \end{aligned} \quad (21)$$

$$P_C = \left(\frac{P_{MAX}}{U_{MPP}} \right)^2 \cdot R_{DS(ON)} = \left(\frac{68,4}{11,64} \right)^2 \cdot 5,6 \cdot 10^{-3} = 193,4 \text{ mW} \quad (22)$$

$$P_D = P_G + P_{SW} + P_C = 47,3 + 57,2 + 193,4 = 297,9 \text{ mW} \quad (23)$$

Z jednotlivých stratových výkonov je možné vidieť, že na celkových stratách sa najviac podieľa stratový vodivostný výkon, z čoho vyplýva, že tranzistory je vhodné voliť s čo najnižším odporom kanálu v zopnutom stave $R_{DS(ON)}$. Preto najvhodnejším tranzistorom bude NTMFS4955NT3G s najnižším celkovým stratovým výkonom P_D .

Tab. 3-5: Porovnanie parametrov tranzistorov

Názov	U_{DS} [V]	I_D [A]	$R_{DS(on)}$ [m Ω]	Q_G [nC]	C_{GS} [pF]	P_G [mW]	P_C [mW]	P_D [mW]	Cena [€]
NTMFS4955NT3G	30	16,7	5,6	21,5	1264	47,3	193,3	297,9	0,57
FDMS7692	30	14	6,5	22	1350	48,4	224,4	310,7	0,57
FDMS7678	30	17,5	5,5	39	2410	85,8	189,9	335,1	0,54
NTMFS4925NT1G	30	16,7	10	10,8	1264	23,7	345,3	426,3	0,49
SIRA96DP-T1-GE3	30	16	7,3	31	1385	68,2	252,1	368,2	0,46

3.5 Mikrokontrolér a teplomer

Ako monitorovací mikrokontrolér bol zvolený AVR ATmega168PA-ANR od firmy Microchip v puzdre TQFP32, vo verzii so zvýšenou prevádzkovou teplotou. Je založený na 8-bitovej architektúre s maximálnou frekvenciou interného oscilátora 8 MHz. Základnými požiadavkami pre výber bolo komunikačné rozhranie I²C ako riadiaci člen (master), UART periféria pre jednoduchú komunikáciu s PC pri ladení firmware, interný AD prevodník a možnosť preprogramovať mikrokontrolér priamo v zapojení (In system programming; ISP) [32].

Základné parametre:

- 16 kB FLASH programovej pamäte, 1024 B SRAM dátovej pamäte
- 2 x 8-bit, 1 x 16-bit časovače/čítače, 6 x PWM
- Integrovaný 8-kanálový 10-bitový AD prevodník
- Komunikačné rozhrania: I²C, UART, SPI
- Napájacie napätie: 1,8 – 5,5 V
- Prevádzková teplota: -40 – 105 °C

Mikrokontrolér bude slúžiť k čítaniu údajov z IO, ktorý zabezpečuje MPPT reguláciu a z digitálneho teplomera TC74 od Microchip cez komunikačné rozhranie I²C. Zároveň bude monitorovať pri štarte výstupný prúd, vstupné a výstupné napätie interným AD prevodníkom prostredníctvom deliča napätia nastaveným podľa (24) na maximálne napätie na pine mierne nižšie ako referenčné napätie.

$$U_{AD} = U_{OUTMAX} \cdot \frac{R_{OUT2}}{R_{OUT1} + R_{OUT2}} = 17,15 \cdot \frac{10}{27 + 10} = 4,63 \text{ V} \quad (24)$$

3.6 Napájanie

Pre vlastné napájanie všetkých komponentov je možné použiť buď lineárne napäťové stabilizátory, alebo spínaný napäťový zdroj, ktorý má síce vyššiu účinnosť ale zaberá väčšiu plochu na DPS a v prípade nesprávneho návrhu je možné elektromagnetické rušenie ďalších komponentov. MPPT regulátor vyžaduje oddelené napájanie napätím 5 V digitálnej a analógovej časti. Budič H-mostíka vyžaduje tiež oddelené napájanie napätím 8 – 14 V pre spínaciu časť a 5 V pre analógovú časť. Na základe merania skúšobného panela bolo v druhej vývojovej verzii zmenené napätie spínacej časti z 10 V

na 9 V, z dôvodu nižšieho napájacieho napätia ako 10 V pri určitej intenzite osvetlenia fotovoltaického panela (kapitola 6.1). Mikrokontrolér vyžaduje oddelené napájanie 5 V pre samotnú funkciu a referenčné napätie pre interný AD prevodník. V Tab. 3-6 je uvedený maximálny prúdový odber jednotlivých súčiastok, ktoré sa nachádzajú v zapojení pre oddelenú 5 V digitálnu, 5 V analógovú a pre spíniacu 9 V vetvu.

Tab. 3-6: Prúdový odber použitých súčiastok [26] [28] [32] [35] [36] [37] [40]

Názov	Napájací prúd @5 V digitál. [mA]	Napájací prúd @5 V analóg. [mA]	Napájací prúd @9 V [mA]
SM72442	15	1	-
SM72295	-	0,04	3
ATmega48	12	0,14	-
TC74	0,35	-	-
MCP1322T-46LT	0,01	-	-
TLV7041	0,001	-	-
IN-S128DATRG	15	-	-
Σ	42,361	1,18	3

Napäťové stabilizátory budú zapojené v kaskáde. Ako prvý bude stabilizátor s výstupným napätím 9 V a následne až na výstup tohto stabilizátora bude pripojený 5 V stabilizátor, spolu s 5 V referenčným zdrojom napätia. Z toho vyplýva, že stabilizátor s výstupným napätím 9 V bude musieť zvládnuť súčet všetkých prúdov, tj. 46,541 mA. Stratové výkony stabilizátorov sú spočítané na 0,221 W (25) pre 9 V stabilizátor, 0,169 W (26) pre 5 V stabilizátor a 0,005 W (27) pre 5 V napäťovú referenciu.

$$P_{D_9V} = (U_{IN} - U_{OUT}) \cdot I_{OUT} = (13,74 - 9) \cdot 0,046541 = 0,221 W \quad (25)$$

$$P_{D_5V} = (U_{IN} - U_{OUT}) \cdot I_{OUT} = (9 - 5) \cdot 0,042361 = 0,169 W \quad (26)$$

$$P_{D_5V_REF} = (U_{IN} - U_{OUT}) \cdot I_{OUT} = (9 - 5) \cdot 0,0012 = 0,005 W \quad (27)$$

Z dôvodu obmedzenej fyzickej veľkosti regulátora a napätia fotovoltaického panela 11,64 V v MPP, ktoré navyše bude kolísať so zmenou osvetlenia boli pre napájanie zariadenia zvolené lineárne stabilizátory s nízkym minimálnym stratovým napätím. Ako stabilizátor pre 9 V bol zvolený TPS7A2401 od Texas Instruments. Jeho maximálne vstupné napätie je 18 V, minimálne stratové napätie je približne 80 mV pri vypočítanej záťaži 46 mA. Pri maximálnom výstupnom prúde 200 mA je minimálne stratové napätie 230 mV. Tento stabilizátor má nastaviteľné výstupné napätie napäťovým deličom. Vzťah (28) udáva aký pomer musia mať rezistory pre nastavenie výstupného napätia, pričom vzťah (29) určuje ich maximálnu hodnotu. Kombináciou (28) a (29) dostaneme maximálnu hodnotu rezistoru R_{14} (30). Z komerčne dostupných hodnôt bola zvolená hodnota 1,13 M Ω a zo vzťahu (31) vypočítame príslušnú hodnotu rezistora R_{13} , z dostupných hodnôt je najbližšia hodnota 7,15 M Ω . Pre kontrolu finálneho výstupného napätia slúži vzťah (32) [38].

$$\frac{R_{13}}{R_{14}} = \frac{U_{OUT}}{U_{FB}} - 1 = \frac{9}{1,24} - 1 = 6,258 \quad (28)$$

$$R_{13} + R_{14} \leq \frac{U_{OUT}}{I_{FB} \cdot 100} = \frac{9}{10 \cdot 10^{-9} \cdot 100} = 9 \text{ M}\Omega \quad (29)$$

$$R_{14} \leq \frac{9 \cdot 10^9}{7,258} = 1,24 \text{ M}\Omega \quad (30)$$

$$R_{13} = \left(\frac{U_{OUT}}{U_{FB}} - 1 \right) \cdot R_{14} = \left(\frac{9}{1,24} - 1 \right) \cdot 1,13 = 7,07 \text{ M}\Omega \quad (31)$$

$$U_{OUT} = U_{FB} \cdot \left(1 + \frac{R_{13}}{R_{14}} \right) = 1,24 \cdot \left(1 + \frac{7,15}{1,13} \right) = 9,08 \text{ V} \quad (32)$$

Ako 5 V stabilizátor bol zvolený LP2985A od Texas Instruments. Tento stabilizátor má maximálny výstupný prúd 150 mA, minimálne stratové napätie 7 mV pri záťaži 1 mA a 280 mV pri plnej záťaži [33]. Pre napájanie analógovej časti MPPT regulátora, budiča H-mostíka a ako zdroj referenčného napätia pre interný AD prevodník mikrokontroléra bol zvolený zdroj referenčného napätia LT6654 od Analog Devices. Tento IO má výstupné napätie 5 V s toleranciou $\pm 0,1\%$ a maximálnym výstupným prúdom 10 mA [34]. Všetky zvolené stabilizátory sú pre minimalizáciu veľkosti v puzdre SOT23.

Dôležité pre funkciu lineárnych stabilizátorov je neprekročiť maximálnu odporúčanú pracovnú teplotu polovodiča T_J , ktorá je spravidla 125°C . Túto teplotu ovplyvňuje stratový výkon P_D a tepelný odpor puzdra polovodiča $R_{\theta JA}$. Teplota polovodiča pre TPS7A2401 je vypočítaná na 97°C (33), pre LT2985A na $94,8^\circ\text{C}$ (34) a pre LT6654 na 61°C (35). Všetky výpočty sú pre teplotu okolia $T_A = 60^\circ\text{C}$. Z výpočtov vyplýva, že nie je nutné žiadne prídavné chladenie lineárnych stabilizátorov [33] [34] [38].

$$T_{J_{9V}} = T_A + P_{D_{9V}} \cdot R_{\theta JA} = 60 + 0,221 \cdot 167,8 = 97^\circ\text{C} \quad (33)$$

$$T_{J_{5V}} = T_A + P_{D_{5V}} \cdot R_{\theta JA} = 60 + 0,169 \cdot 206 = 94,8^\circ\text{C} \quad (34)$$

$$T_{J_{5V_REF}} = T_A + P_{D_{5V_REF}} \cdot R_{\theta JA} = 60 + 0,006 \cdot 192 = 61^\circ\text{C} \quad (35)$$

V zapojení sa ešte nachádza IO MCP1322T-46LT od Microchip, ktorý kontroluje stav digitálnej vetvy napájacieho napätia 5 V. V prípade, že napätie klesne pod 4,6 V aktivuje reset pre MPPT regulátor a budič H-mostíka. Tento IO obsahuje aj pin pre vynútený reset, ktorý je pripojený na mikrokontrolér a v prípade prekročenia prevádzkových parametrov má možnosť ho použiť. Reset sa deaktivuje 200 ms po obnovení stabilného napájacieho napätia, alebo po uvoľnení vynúteného resetu mikrokontrolérom.

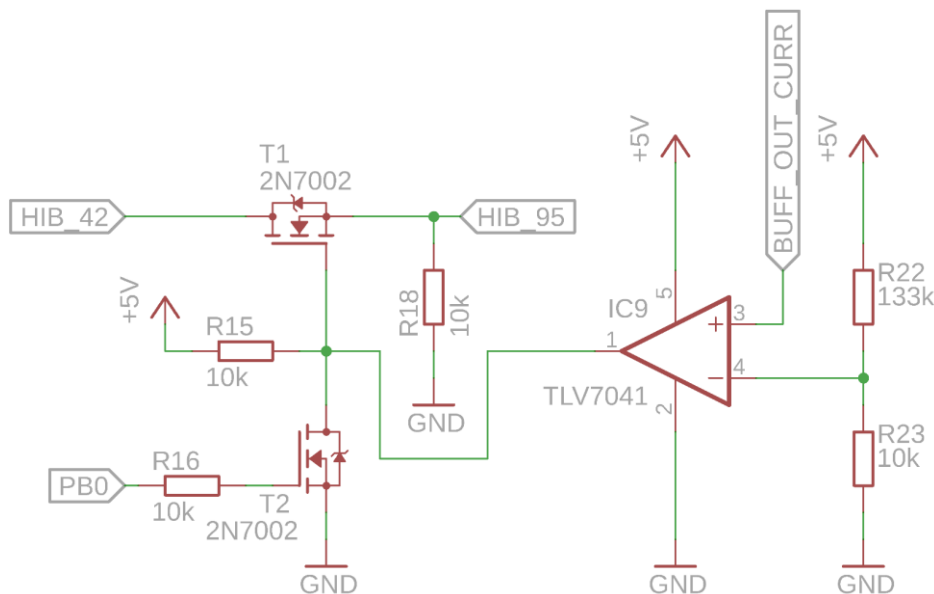
3.7 Ochrana proti vybíjaniu akumulátora

Časť zapojenia, ktorá zabezpečuje ochranu proti vybíjaniu akumulátorov do fotovoltaických panelov je na Obr. 3-4. Výstup HIB z MPPT regulátora SM72442, ktorý riadi spínanie výstupného tranzistora T7 je pred pripojením do budiča H-mostíka SM72295 oddelený cez MOSFET tranzistor (T1). Tranzistor zabráni tomu, aby sa tranzistor T7 v H-mostíku zopol pred tým ako dosiahne výstupný prúd určitej hodnoty, čím zabráni spätnému vybíjaniu akumulátora do fotovoltaických panelov. T1 je možné tiež ovládať prostredníctvom mikrokontroléra z pinu PB0 cez tranzistor T2. Prahová hodnota prúdu je určená komparátorom (IC9), ktorý porovnáva hodnotu získanú zo zosilňovača úbytku napätia na výstupnom snímacom rezistore a hodnotu danú deličom napätia na invertujúcom vstupe (36). Prahová hodnota prúdu je nastavená na hodnotu 0,529 A (37). Pod prahovou hodnotou je tranzistor T7 trvalo uzatvorený a prúd do výstupu tečie cez schottkyho diódu D11, ktorá je pripojená paralelne k T7. Po prekročení prahovej hodnoty prúdu dôjde k spusteniu spínania T7 a nabíjací prúd tečie do akumulátora priamo cez tranzistor T7 [39].

Použitý komparátor TLV7041 od Texas Instruments obsahuje vstavanú hysteréziu s hodnotou 7 mV, čo zabezpečí okno nečinnosti so šírkou cca. 10 mA [37].

$$U_+ = 5 \cdot \frac{R_{23}}{R_{22} + R_{23}} = 5 \cdot \frac{10}{133 + 10} = 0,349 \text{ V} \quad (36)$$

$$I_{OUT_TH} = \frac{U_+ \cdot R_{SIA}}{R_{IOUT} \cdot R_{SH}} = \frac{0,349 \cdot 499}{47000 \cdot 0,007} = 0,529 \text{ A} \quad (37)$$



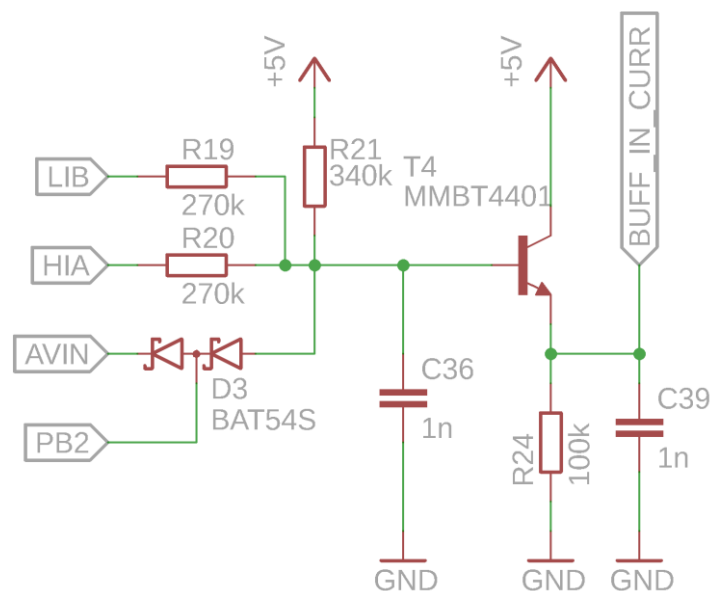
Obr. 3-4: Zapojenie ochrany proti spätnému vybíjaniu akumulátora

3.8 Spúšťací obvod

V prípade, že vstupné napätie regulátora je nižšie ako požadované výstupné napätie, čiže DC-DC menič musí pracovať vo zvyšujúcom režime, je nutné pri inicializácii nutne aktivovať spúšťací obvod (Obr. 3-5). Hneď ako je obvod aktivovaný prostredníctvom napätia 5 V z pinu PB2 mikrokontroléra privedeného do stredu diódy D3, MPPT

regulátor SM72442 zvýši každú 1 ms striedu spínania, až do jej maximálnej hodnoty, ktorá je obmedzená hodnotou nastaveného maximálneho výstupného napätia. Mikrokontrolér sníma hodnotu výstupného prúdu a v prípade, že do pripojenej batérie začne tiecť prúd, tak štartovací obvod do 5 ms od zaregistrovania nabíjacieho prúdu deaktivuje privedením 0 V na pin PB2 pre docielenie funkcie MPPT algoritmu [39].

Spúšťač obvodu funguje na princípe snímania priemernej hodnoty hlavného spínacieho tranzistora buck vetvy (T5) prostredníctvom signálu HIA a hlavného spínacieho tranzistora boost vetvy (T8) prostredníctvom signálu LIB v H-mostíku (Obr. 3-2). Táto hodnota je následne privedená naspäť na pin MPPT snímajúci hodnotu vstupného prúdu (AIIN) a zároveň je na pin MPPT, ktorý sníma hodnotu vstupného napätia (AVIN) privedená konštantná hodnota napätia 4,4 V. Výsledkom tohto procesu je, že MPPT meria virtuálny výkon, ktorý rastie lineárne na základe zvyšovania striedy spínania výstupných tranzistorov. V momente ako je štartovací obvod deaktivovaný, sú na snímacie piny MPPT regulátora privedené skutočné hodnoty vstupného napätia a prúdu a SM72442 následne začne plniť funkciu hľadania MPP fotovoltaických článkov [39].

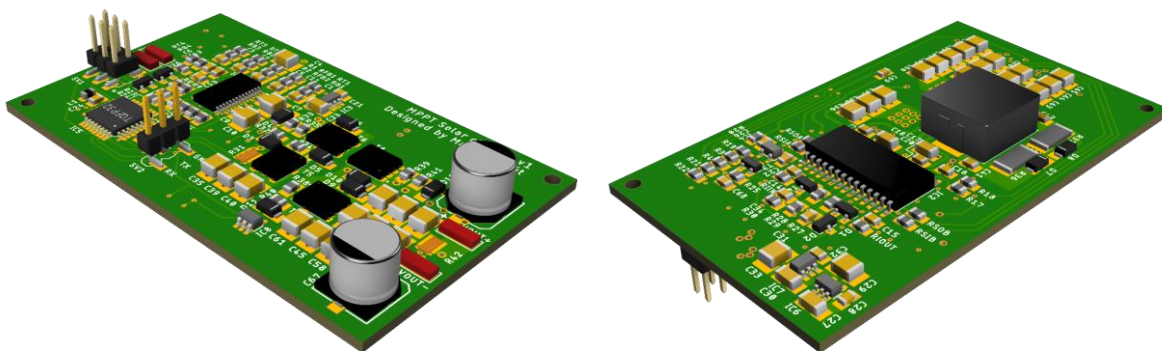


Obr. 3-5: Zapojenie obvodu pre spúšťanie do zvyšujúceho režimu

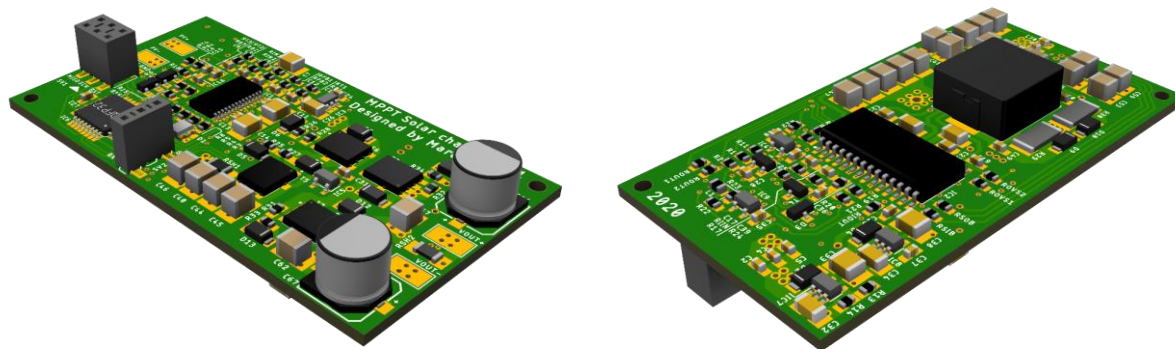
4. REALIZÁCIA

Doska plošných spojov (DPS) MPPT regulátora je navrhnutá v programe Eagle vo verzii 9.5.1. Hlavnými požiadavkami pri návrhu bola miniaturizácia na požadovaný rozmer a zároveň použitie komponentov, ktoré je možné osadiť ručne bez použitia špeciálneho vybavenia. Vďaka dost' striktnej požiadavke na malý rozmer pri danom počte súčiastok bolo zvolené použitie 4-vrstvovej DPS. Vo väčšine prípadov sú jednotlivé prekovy vkladané priamo do padov súčiastok pre ušetrenie čo najväčšieho priestoru. Vonkajšie vrstvy DPS slúžia pre signálové cesty a vnútorné vrstvy pre rozvod napájacích napätí a zemných plôch. Takéto usporiadanie zároveň redukuje veľkosť prúdových slučiek, ktoré by sa mohli podieľať na elektromagnetickom rušení, zvlášť pri vysokej spínacej frekvencii.

Regulátor prešiel dvoma vývojovými verziami. Prototypová verzia s rozmermi 72x43 mm využívala pasívne komponenty veľkosti 0805 v opodstatnených prípadoch väčšie (Obr. 4-1). Po overení funkčnosti bol prototyp miniaturizovaný na finálny rozmer 67x37 mm s využitím puzdier pasívnych komponentov veľkosti 0603 a poposúvaním prakticky všetkých komponentov (Obr. 4-2). K 3D vizualizáciám bol použitý program Fusion 360 a jeho spojenie s Eagle.



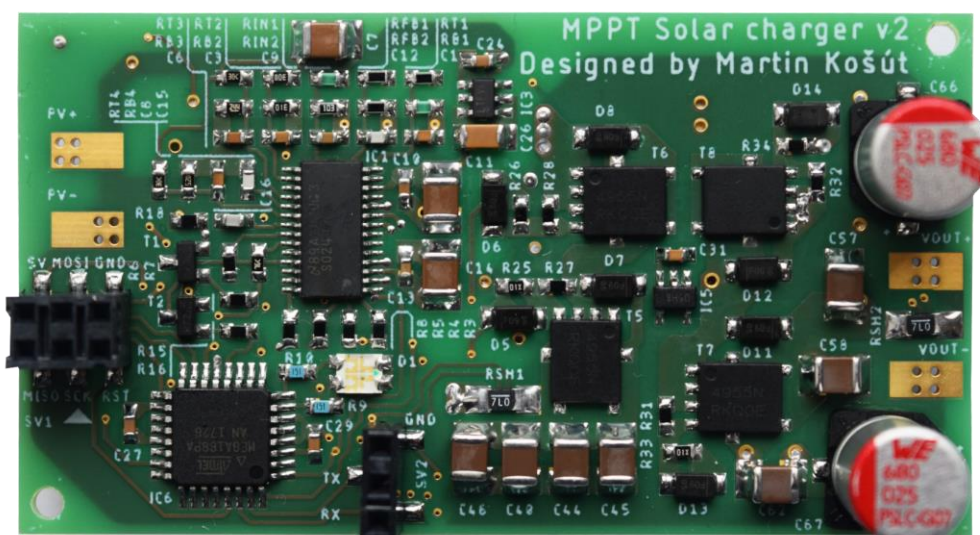
Obr. 4-1: 3D vizualizácia prototypu



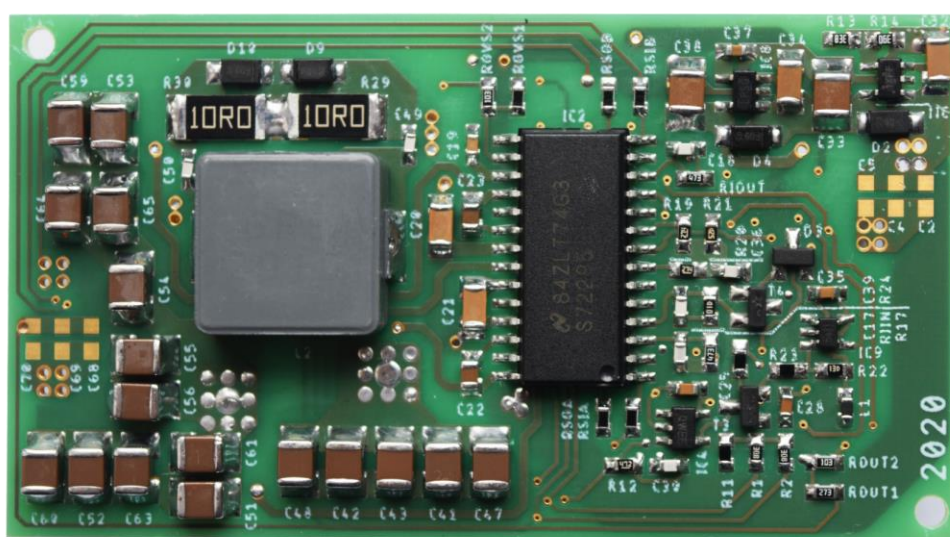
Obr. 4-2: 3D vizualizácia finálnej verzie

Vo finálnej verzii bolo pridaných zopár vylepšení, ako náhrada napäťového stabilizátora s výstupným napätím 10 V za 9 V, prídanie ochrany proti vybíjaniu akumulátora, upravená poloha teplomera pre presnejšie meranie teploty výkonovej časti, 2-farebná LED pre indikáciu stavu, zmena použitých konektorov a možnosť osadenia vstupných a výstupných kondenzátorov pre prípadné odrušenie vysokofrekvenčného rušenia. Príloha B znázorňuje návrh finálnej verzie DPS, ktorá má 4 vrstvy. Vrstva zemných plôch je rozdelená na analógovú, digitálnu a výkonovú zem, aby neovplyvňovali spínacie impulzy digitálnych komponentov komponenty pracujúce so zdrojom referenčného napätia, čo by sa negatívne podpísalo najmä na presnosti regulácie výstupného napätia.

Osadená DPS, ktorá je na Obr. 4-3 a Obr. 4-4 je totožná s verziou v Príloha B, až na opravenú chybu, ktorá bola zistená až po jej výrobe a osadení. Hmotnosť osadenej finálnej verzie bez kabeláže je 24,8 g.



Obr. 4-3: Osadená DPS MPPT regulátora (TOP)



Obr. 4-4: Osadená DPS MPPT regulátora (BOTTOM)

5. FIRMWARE

Firmware pre mikrokontrolér ATmega168PA je napísaný v jazyku C vo vývojovom prostredí Atmel Studio 7. Mikrokontrolér využíva knižnice pre obsluhu prerušení, UART a I²C (TWI) komunikačnej zbernice a watchdog časovača. Pre obsluhu komunikácie s MPPT regulátorom SM72442 a digitálnym teplomerom TC74 boli vytvorené samostatné knižnice. Celkové využitie programovej pamäte je 9104 B (55,6 %) a dátovej pamäte 978 B (95,5 %). Hlavný program a vytvorené knižnice sú v elektronickej prílohe.

Súčasťou mikrokontroléra sú programovateľné poistky, ktoré určujú jeho hardvérové správanie. Okrem iného sa poistkami dá zvoliť zdroj taktovacieho signálu a aj nastavenie kontroly napájacieho napätia mikrokontroléra na rôzne úrovne. Keďže v tejto aplikácii nie je dôležité presné časovanie, bolo zvolené použitie interného oscilátora s frekvenciou 8 MHz a v prípade, že napájacie napätie mikrokontroléra klesne pod 4,3 V, vykoná mikrokontrolér vlastný reset a uvoľní ho až 65 ms po opätovnom nadobudnutí stabilného napájacieho napätia. Nastavenie jednotlivých poistiek sa nachádza v Tab. 5-1 [32].

Tab. 5-1: Nastavenie poistiek pre mikrokontrolér ATmega168PA [32]

Názov poistky	Low	High	Extended
Hodnota (hex)	0xE2	0xDC	0xF9

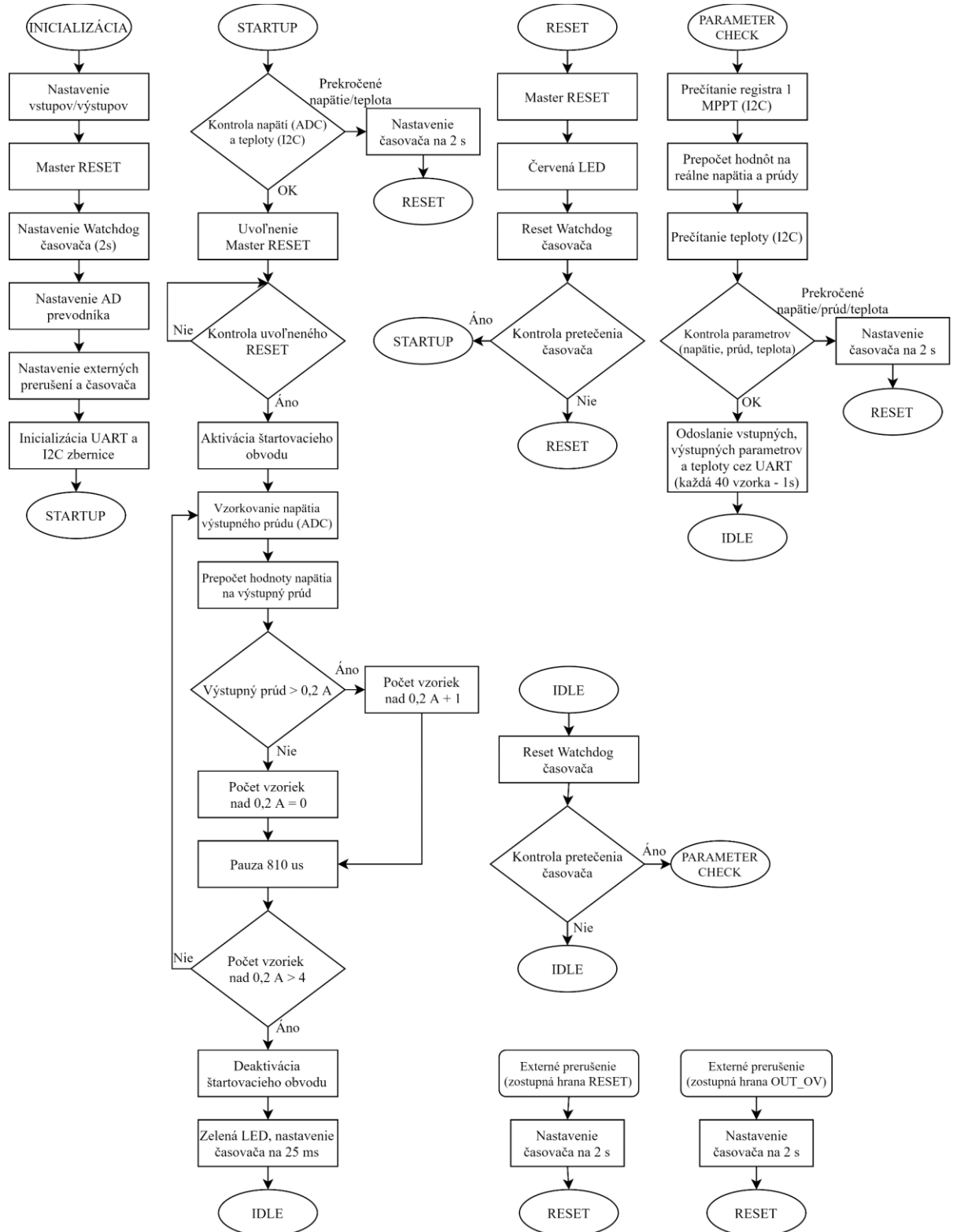
Zjednodušený vývojový diagram programu je na Obr. 5-1. Mikrokontrolér po štarte inicializuje vstupné a výstupné piny, nastaví watchdog časovač, interný AD prevodník, externé prerušenia, časovač a komunikačné zbernice a pokračuje štartovacou sekvenciou. Štartovacia sekvencia pozostáva z kontroly vstupného a výstupného napätia a teploty výkonovej časti regulátora. V prípade, že niektorý z parametrov nedosahuje očakávanú hodnotu prejde do stavu RESET a každé 2 s sa pokúsi opäť naštartovať. Po úspešnom overení parametrov uvoľní Master RESET a aktivuje štartovací obvod a následne vzorkuje hodnotu výstupného prúdu s periódou približne 1 ms. V prípade, že prúd do záťaže prekročí 0,2 A 5-krát za sebou, deaktivuje sa štartovací obvod, prepne LED na zelenú farbu a nastaví sa perióda pretečenia časovača na 25 ms. Každých 25 ms prebieha prečítanie registra 1 MPPT regulátora a teplomera prostredníctvom I²C a po prepočte hodnôt na reálne veličiny sa kontroluje, či prevádzkové parametre neprekračujú bezpečné hodnoty (Tab. 5-2). V prípade prekročenia nastane opäť RESET, LED dióda je prepnutá na červenú farbu a nasleduje opätovný pokus o štart každé 2 s. Každé 40. meranie (1 s) prevádzkových parametrov odosiela mikrokontrolér cez UART perifériu s rýchlosťou 38400 baud/s a nastavením 8 dátových bitov, bez parity a 1 stop bit.

Tab. 5-2: Bezpečné prevádzkové hodnoty parametrov

Názov parametra	Bezpečný rozsah
Vstupné napätie	9,3 – 17,5 V
Výstupné napätie	13 – 16,8 V
Výstupný prúd	0,2 – 6 A
Teplota výkonovej časti	< 100 °C, pre štart < 85 °C

V každom cykle po kontrole parametrov v stave IDLE nastáva nulovanie Watchdog časovača. V prípade, že vykonávanie programu sa niekde zasekne a dôjde k pretečeniu tohto časovača, bude mikrokontrolér interne resetovaný a začne opätovná inicializácia.

V prípade prekročenia výstupného napätia nastaveného na komparátore, ktorý je súčasťou budiča H-mostíka (OVS) dôjde k zostupnej hrane na pine OVP, čo zaregistruje externé prerušenie mikrokontroléra pre prechod do stavu RESET. Rovnako pri zostupnej hrane RESET od obvodu MCP1322, prípadne pinu PGOOD od budiča H-mostíka.



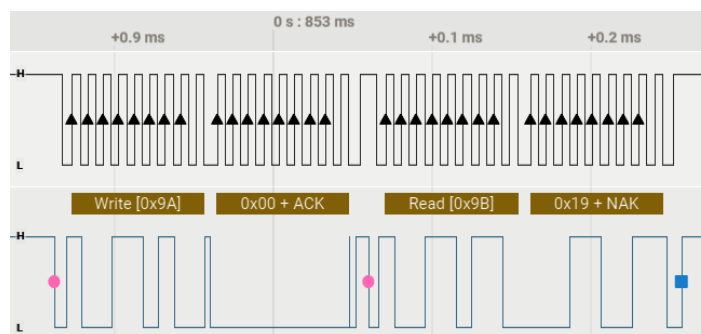
Obr. 5-1: Vývojový diagram firmwaru mikrokontroléra ATmega168PA

5.1 Komunikácia cez I2C

Pre komunikáciu prostredníctvom I²C využíva MPPT regulátor SM72442 aj digitálny teplomer TC74 piny SDA (sériové dáta) a SCL (hodinový signál). Komunikácia prebieha so 100 kHz frekvenciou hodinového signálu. Adresu koncového zariadenia (7 bit), s ktorým chce mikrokontrolér komunikovať, odošle pri zahájení komunikácie nasledovaný 1-bitovou hodnotou, ktorou určí smer komunikácie (0 = zápis, 1 = čítanie).

5.1.1 Komunikácia s TC74

Teplomer má pevne určenú adresu na hodnotu 0x4D. Mikrokontrolér odošle adresu teplomera spolu so zápisom (0x9A) nasledovanú adresou 0x00, na ktorej je register pre vyčítanie teploty, nasleduje prerušenie komunikácie. Po opätovnom odoslaní adresy je vyčítaná teplota v tvare znamienkového čísla (signed), v prípade Obr. 5-2 je to hodnota 0x19, čo predstavuje teplotu dekadicky +25 °C [36].



Obr. 5-2: Prečítanie teploty z TC74 cez I2C

5.1.2 Komunikácia s SM72442

Adresa MPPT regulátora je nastavená prostredníctvom pinov I2C0, I2C1 a I2C2 na hodnotu 0x01. MPPT regulátor obsahuje 5 oddelených registrov po 7 B (56 bitov), z ktorých každá skupina má inú funkciu (Tab. 5-3). Pre prečítanie alebo zapísanie hodnôt do ktoréhokoľvek registra je nutné prečítať alebo zapísať všetkých 7 B, ktoré sú usporiadané štýlom Little-endian podľa Tab. 5-4 [26].

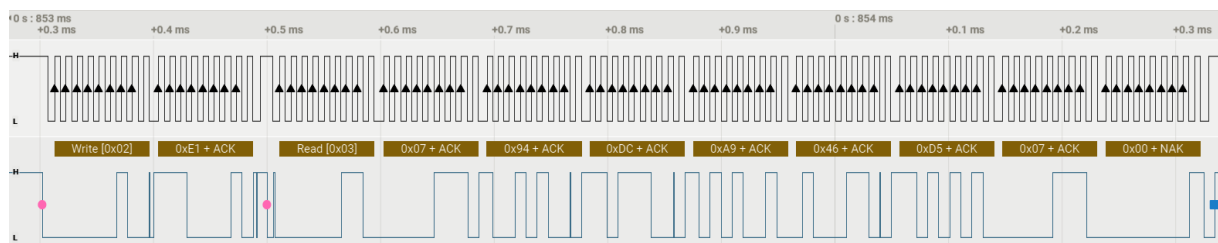
Tab. 5-3: Vnútorne registre SM72442 [26]

Register	Adresa	Obsah
0	0xE0	Hodnoty konfiguračných pinov A0, A2, A4, A6
1	0xE1	Hodnoty vstupných a výstupných napätí a prúdov
3	0xE3	Konfiguračné parametre
4	0xE4	Offset vstupných a výstupných napätí a prúdov
5	0xE5	Hodnoty vstupných a výstupných prúdov pre štart MPPT

Tab. 5-4: Usporiadanie bitov štýlom Little-endian [26]

Poradie bajtu	1	2	3	4	5	6	7
Usporiadanie bitov	7...0	15...8	23...16	31...24	39...32	47...40	55...48

Ako príklad komunikácie si uvedieme prečítanie výstupného napätia z registra 1, z ktorého je možné dáta iba čítať. Na Obr. 5-3 sa nachádzajú dekódované dáta z komunikácie MPPT regulátora s mikrokontrolérom získané z logického analyzátoru. Ako prvá je mikrokontrolérom odoslaná adresa spolu s informáciou o zápise (0x02), následne adresa registra (E1), ktorého údaje chceme v ďalšom cykle prečítať a komunikácia je zastavená. Nasleduje opätovné nadviazanie komunikácie adresou MPPT, ale tentokrát s informáciou o čítaní (0x03), následne MPPT odosiela dáta a mikrokontrolér si ich ukladá do buffra pre ďalšie spracovanie.



Obr. 5-3: Prečítanie registra 1 MPPT regulátora cez I2C

Uložené dáta do buffra mikrokontroléra z Obr. 5-3:

- i2c_buffer[0] = 0x07;
- i2c_buffer[1] = 0x94;
- i2c_buffer[2] = 0xDC;
- i2c_buffer[3] = 0xA9;
- i2c_buffer[4] = 0x46;
- i2c_buffer[5] = 0xD5;
- i2c_buffer[6] = 0x07;
- i2c_buffer[7] = 0x00;

Tab. 5-5: Usporiadanie registra 1 MPPT regulátora [26]

Názov	Rezervované	Štart MPPT	Výstupné napätie	Výstupný prúd	Vstupné napätie	Vstupný prúd
Bity	55...41	40	39...30	29...20	19...10	9...0

Údaj o výstupnom napätí je 10-bitové číslo, ktoré sa nachádza na bitoch č.39-30 (Tab. 5-5). Keďže buffer mikrokontroléra je rozdelený na 8-bitové bloky dát, tak sa údaj o výstupnom napätí nachádza z časti v bajte č.4 (najnižšie bity) a pokračuje v bajte č.5 (najvyššie bity) (Tab. 5-4). Číselnú hodnotu výstupného napätia dostaneme, keď bajt č.4, vynásobíme logickou operáciou AND s maskou 0xC0, ktorá zabezpečí oddelenie bitu č.30 a č.31 od ostatných bitov a jeho bitovým posunom vpravo o 6 miest (LSB). Následne použitím logickej operácie OR s bitovo posunutým bajtom č.5 o 2 miesta vľavo (MSB) (38). Takto získanú číselnú hodnotu prepočítame na napätie, ktoré sa nachádza na snímacom pine AVOUT (39). Následným prepočtom napäťového deliča pripojeného na pin AVOUT vieme určiť vzťah pre výpočet skutočného výstupného napätia (40). Hodnota napätia je mierne odlišná od nastavenej maximálnej hodnoty z dôvodu merania v okamihu jeho vyššej hodnoty (Obr. 6-6).

$$\begin{aligned}
X &= (i2c_buffer[5] \ll 2) | ((i2c_buffer[4] \& 0xC0) \gg 6) \\
&= (0xD5 \ll 2) | ((0x46 \& 0xC0) \gg 6) \\
&= 0x354 | 0x01 = 0x355 = 853
\end{aligned} \tag{38}$$

$$U_{AVOUT} = X \cdot \frac{U_{REF}}{1023} = 853 \cdot \frac{5}{1023} = 4,169 \text{ V} \tag{39}$$

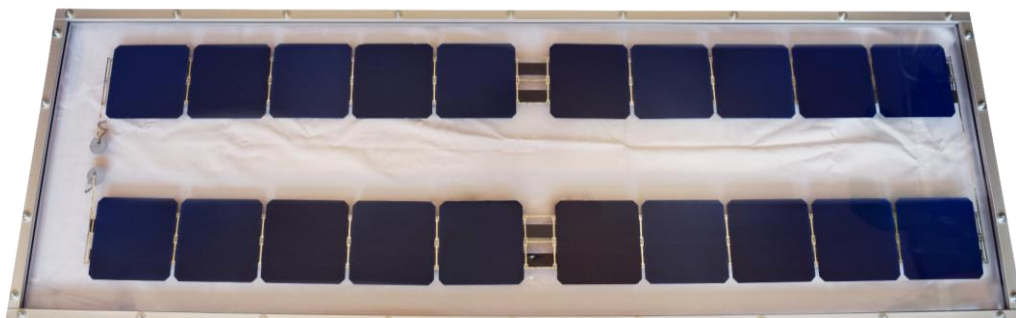
$$U_{OUT} = \frac{U_{AVOUT} \cdot (R_{FB2} + R_{FB1})}{R_{FB2}} = \frac{4,169 \cdot (4,22 + 12,7)}{4,22} = 16,71 \text{ V} \tag{40}$$

Podobne prebieha aj prepočet ostatných veličín (vstupné napätia a prúd a výstupný prúd), ktoré je možné vyčítať prípadne zapísať do MPPT regulátora. Pre softvérové nastavenie výstupného napätia je nutné prepočítať spätne požadovanú hodnotu napätia cez uvedené vzťahy v opačnom poradí a následne do MPPT odoslať celých 7 B registra 3, v ktorom je zároveň nutné prepnúť nastavenie hodnoty výstupného napätia z pinu A0 na softvérovú hodnotu v registri 3 [26].

6. MERANIE

6.1 Meranie fotovoltaického panelu

Prototypový fotovoltaický panel je zložený z 20 fotovoltaických článkov SunPower Maxeon C60 zapojených v sériovom zapojení. Rovnaký typ aj počet článkov bude použitý v UAV. Jednotlivé články sú uložené medzi dvoma doskami z polykarbonátu s hrúbkou 4 mm a po okrajoch spojené hliníkovými profilmi (Obr. 6-1).



Obr. 6-1: Prototypový fotovoltaický panel

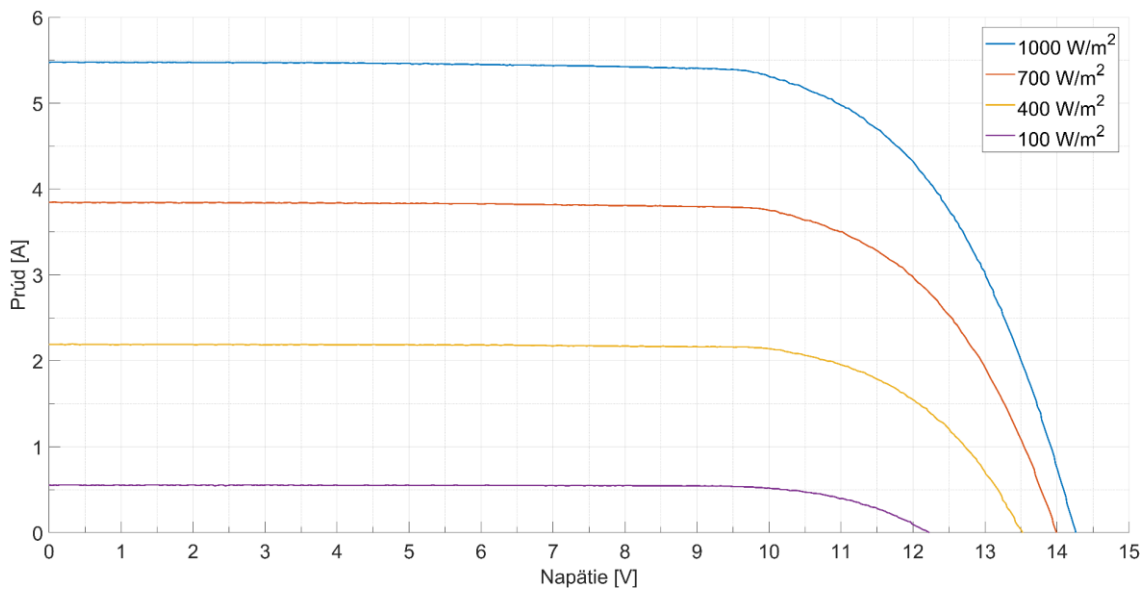
Meranie prebiehalo v akreditovanom fotovoltaickom laboratóriu určeného pre meranie fotovoltaických panelov. Akreditované meranie voltampérovej charakteristiky za štandardizovaných podmienok (AM 1,5 a 25 °C) s nastaviteľnou intenzitou osvetlenia 100 – 1000 W/m². Meranie prebiehalo s prístrojom PASAN Sun Sim 3C podľa normy IEC 60904-9. Tester pre meranie jednej hodnoty intenzity osvetlenia automaticky zmeria 500 hodnôt za 10 ms svetelného záblesku, aby nebolo meranie ovplyvnené zmenou parametrov fotovoltaického panela [41].

Nameraná voltampérová a výkonová charakteristika nachádza v Graf 6-1 resp. v Graf 6-2. Namerané dáta z prístroja sú v elektronickej prílohe spolu so skriptom do Matlabu. Charakteristické body panelu z týchto charakteristík potom v Tab. 6-1. Maximálny výkon panela bol 54,8 W pri intenzite osvetlenia 1000 W/m², čo je oproti tabuľkovej hodnote článkov 68,4 W pokles o 20 %. Rozdiel je pravdepodobne spôsobený hrúbkou použitého polykarbonátu a jeho povrchovou úpravou, ktorá je lesklá a teda časť svetla odráža.

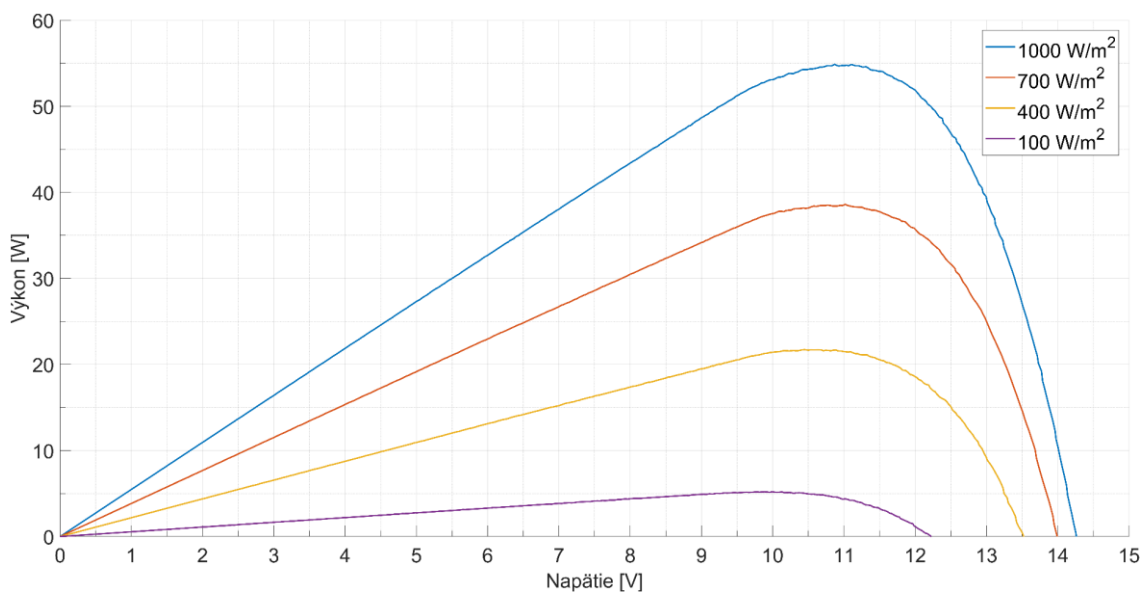
Tab. 6-1: Charakteristické parametre prototypového fotovoltaického panelu

Intenzita osvetlenia [W/m ²]	I _{SC} [A]	I _{MPP} [A]	U _{MPP} [V]	U _{OC} [V]	P _{MAX} [W]
100	0,554	0,521	9,988	12,228	5,204
400	2,192	2,079	10,447	13,526	21,710
700	3,845	3,503	11,018	14,005	38,599
1000	5,479	5,048	10,870	14,268	54,865

Graf 6-1: Voltampérová charakteristika panelu v závislosti na intenzite osvetlenia



Graf 6-2: Výkonová charakteristika panelu v závislosti na intenzite osvetlenia



6.2 Meranie MPPT regulátora

6.2.1 Účinnosť

Meranie účinnosti prebiehalo s umelou záťažou a laboratórnym zdrojom, ktorého maximálny výstupný prúd bol 5 A, preto bolo meranie realizované iba po dosiahnutí tohto maxima. Zapojenie počas merania je na Obr. 6-2. Pre meranie napätia bol použitý voltmeter Voltcraft VC-531, ktorý bol použitý pre vstupné aj výstupné napätie. Presnosť merania na použitom rozsahu 60 V je $\pm (1,5 \% + 5 \text{ digitov})$. Pre meranie vstupného prúdu

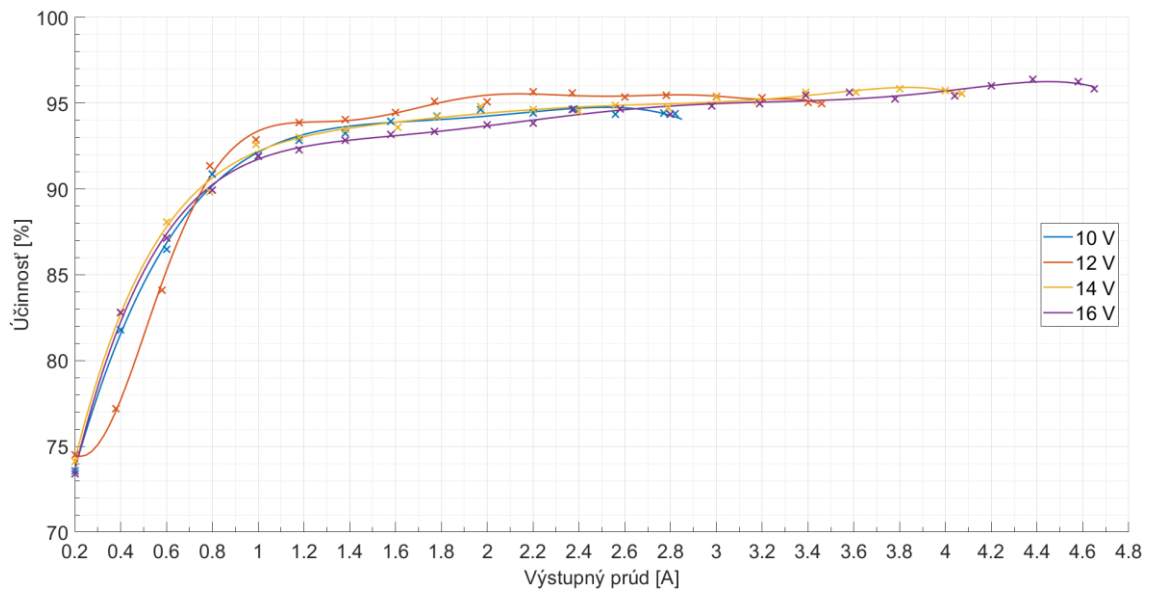
do regulátora bol použitý ampérmeter AteX DT830B s presnosťou $\pm (2 \% + 2 \text{ digitov})$ na meracom rozsahu 10 A. A ako výstupný ampérmeter bol použitý Alcron DT-68 na rozsahu 10 A s presnosťou $\pm (2 \% + 5 \text{ digitov})$.



Obr. 6-2: Zapojenie prístrojov pri meraní účinnosti

Príloha E obsahuje tabuľky nameraných hodnôt pre 4 rôzne úrovne vstupného napätia, a v elektronickej prílohe je skript pre vygenerovanie zmeranej charakteristiky spolu so zdrojovými dátami. Účinnosť MPPT regulátora začína na zhruba 75 % pri zaťažení 0,2 A. Účinnosť pod 0,5 A je nižšia, z dôvodu ochrany proti vybíjaniu akumulátora späť do fotovoltaických panelov (kapitola 3.7). Následne nad 0,5 A rýchlo rastie až do zaťaženia 1 A, odkiaľ sa pohybuje približne na úrovni 93 % s pozvoľným rastom až do 95 % (Graf 6-3).

Graf 6-3: Závislosť účinnosti MPPT regulátora na veľkosti výstupného prúdu pre rôzne hodnoty vstupného napätia

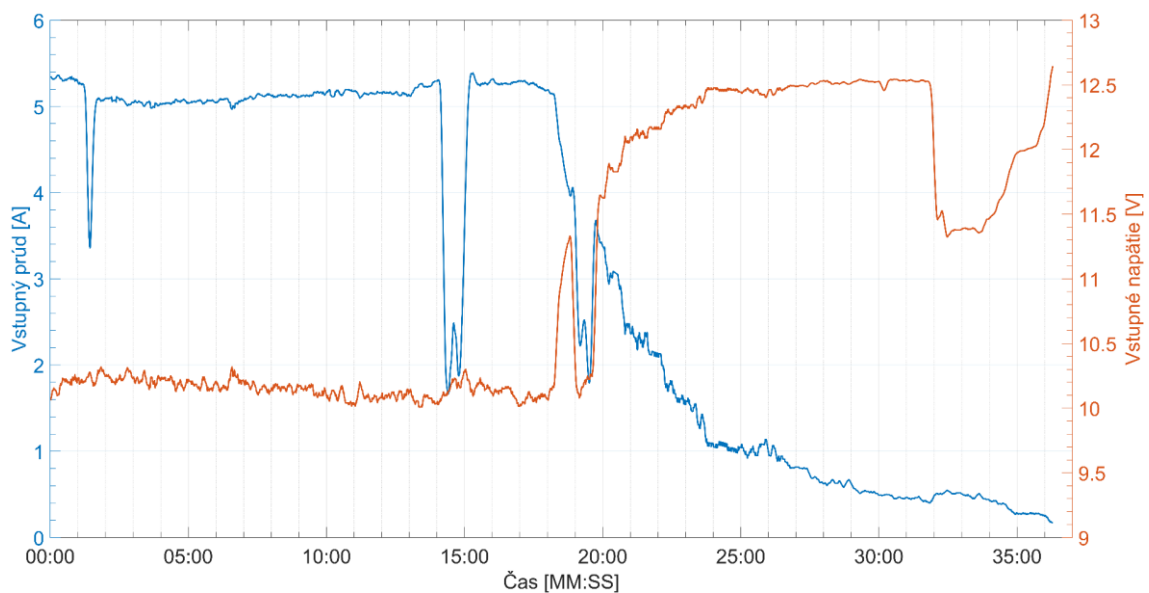


6.2.2 Nabíjacia charakteristika

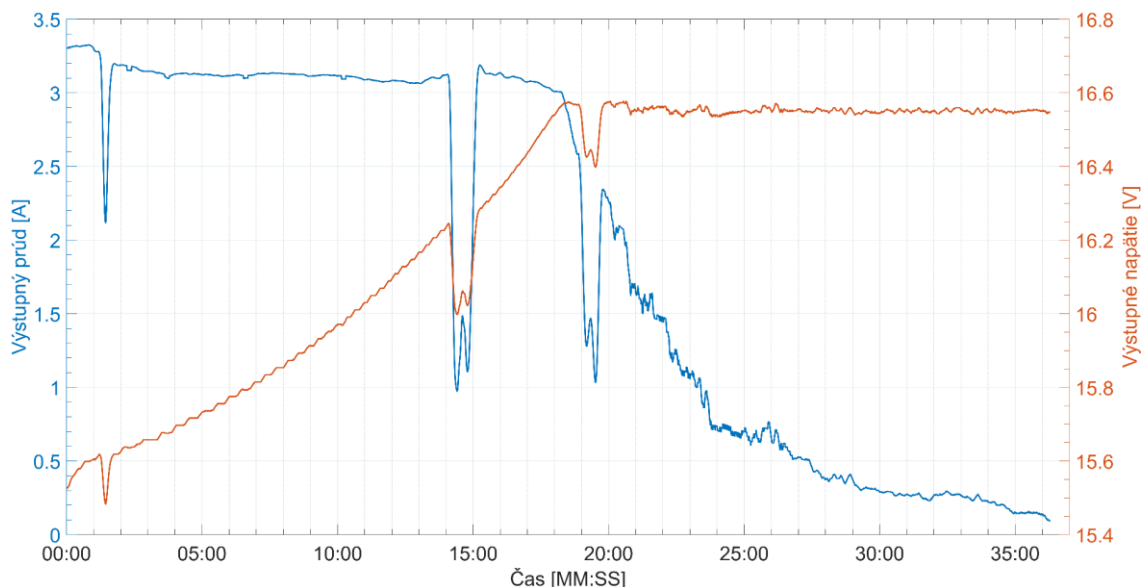
Meranie nabíjacej charakteristiky prebiehalo s pripojeným fotovoltaickým panelom na vstupe regulátora. Na výstupe bol pripojený Li-pol akumulátor v konfigurácii 4S1P s kapacitou 2200 mAh, na začiatku merania vybitý na napätie 3,7 V/článok. Meranie sa uskutočnilo 22.7 počas slnečných podmienok približne o 13 hodine s okolitou teplotou 31 °C. Namerané dáta odosiela regulátor cez UART zbernicu do PC raz za sekundu. Následne boli dáta spracované v Matlabe s využitím pohyblivého priemeru so šírkou okna 10 s pre odstránenie nepresností počas merania spôsobených rozlíšením interného AD prevodníka MPPT regulátora. Zdrojové dáta aj so skriptom do Matlabu sú v elektronickej prílohe.

Počas merania sa 3-krát objavili oblaky, ktoré zakryli slnko, čo je možné v grafoch pozorovať ako náhly pokles vstupného prípadne výstupného prúdu regulátora. Graf 6-4 zobrazuje vstupné napätie a vstupný prúd do regulátora a Graf 6-5 zobrazuje výstupné napätie a výstupný prúd z regulátora. V oboch grafoch je možné vidieť ako regulátor udržiava MPP fotovoltaických panelov s vstupným napätím okolo 10,3 V a vstupným prúdom okolo 5,1 A. Výstupný prúd je prakticky konštantný až po 16,55 V, kedy regulátor prejde do režimu konštantného výstupného napätia a výstupný prúd začne exponenciálne klesať. V tomto režime už regulátor neudržiava MPP fotovoltaického panela. Graf 6-6 zobrazuje účinnosť regulátora vypočítanú zo vstupných a výstupných veličín spolu s teplotou výkonovej časti regulátora (H-mostíka). Účinnosť regulátora bola tesne nad 95 % počas najvyššieho nabíjacieho prúdu a následne v režime konštantného napätia začala klesať na základe veľkosti výstupného prúdu, ako bolo namerané vyššie v kapitole 6.2.1. Počas fázy najvyššieho výstupného prúdu dosiahol H-mostík maximálnu teplotu 66 °C, čo predstavuje nárast o 35 °C oproti okolitej teplote. Rovnako aj teplota začala klesať s klesajúcim výstupným prúdom, aj napriek nižšej účinnosti regulátora v tejto fáze nabíjania.

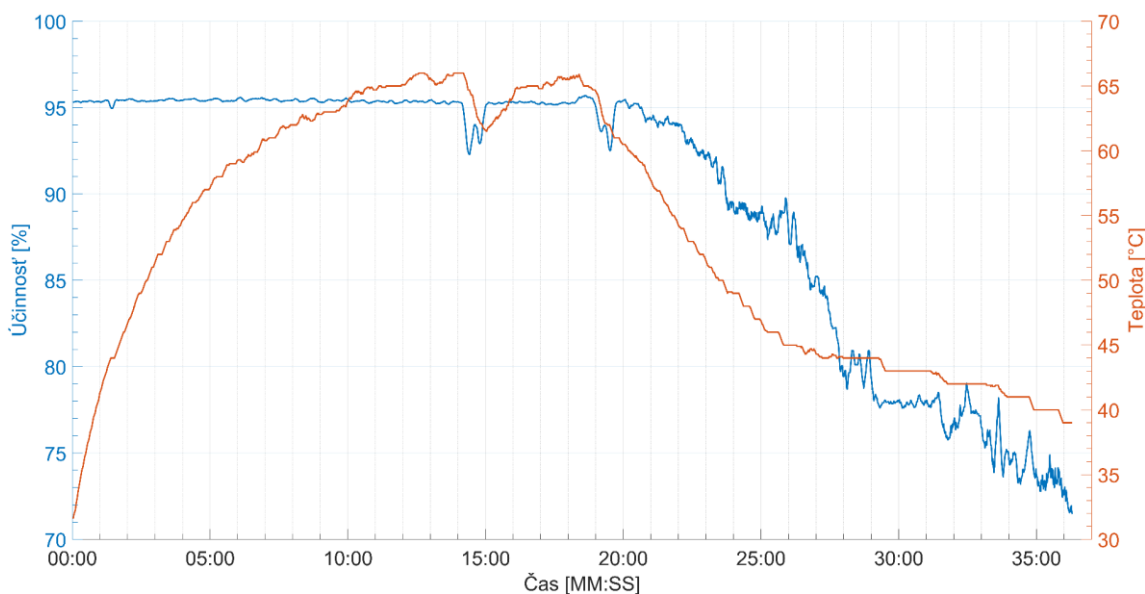
Graf 6-4: Vstupné parametre regulátora pri nabíjaní akumulátora 4S 2200 mAh z fotovoltaického panela



Graf 6-5: Výstupné parametre regulátora pri nabíjaní akumulátora 4S 2200 mAh pri nabíjaní z fotovoltaického panela



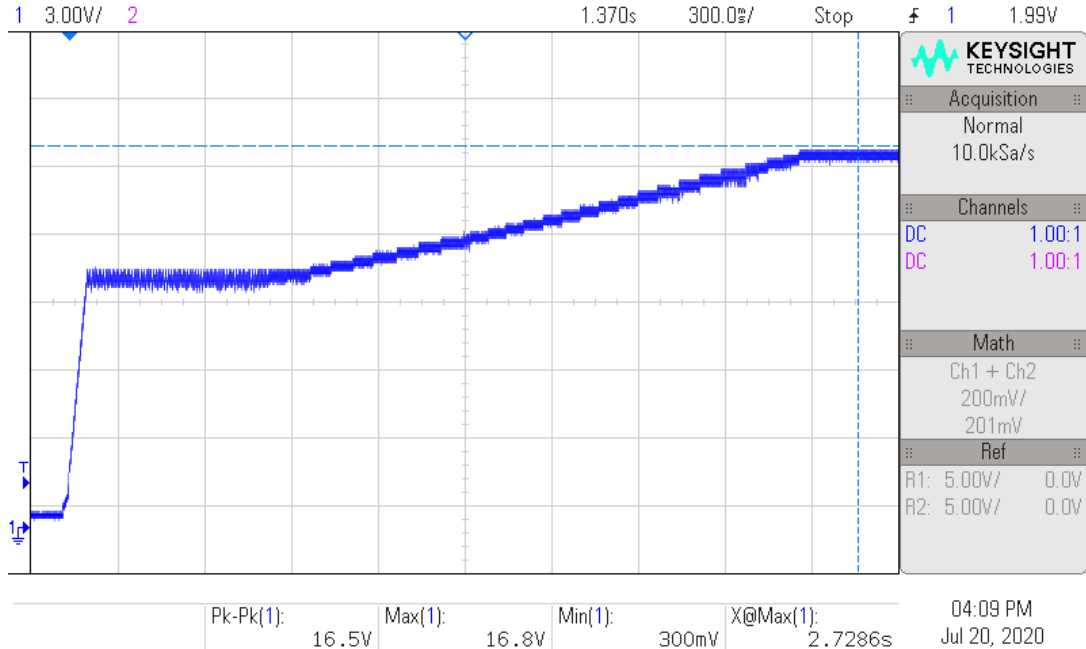
Graf 6-6: Účinnosť a teplota výkonovej časti regulátora pri nabíjaní akumulátora 4S 2200 mAh z fotovoltaického panela



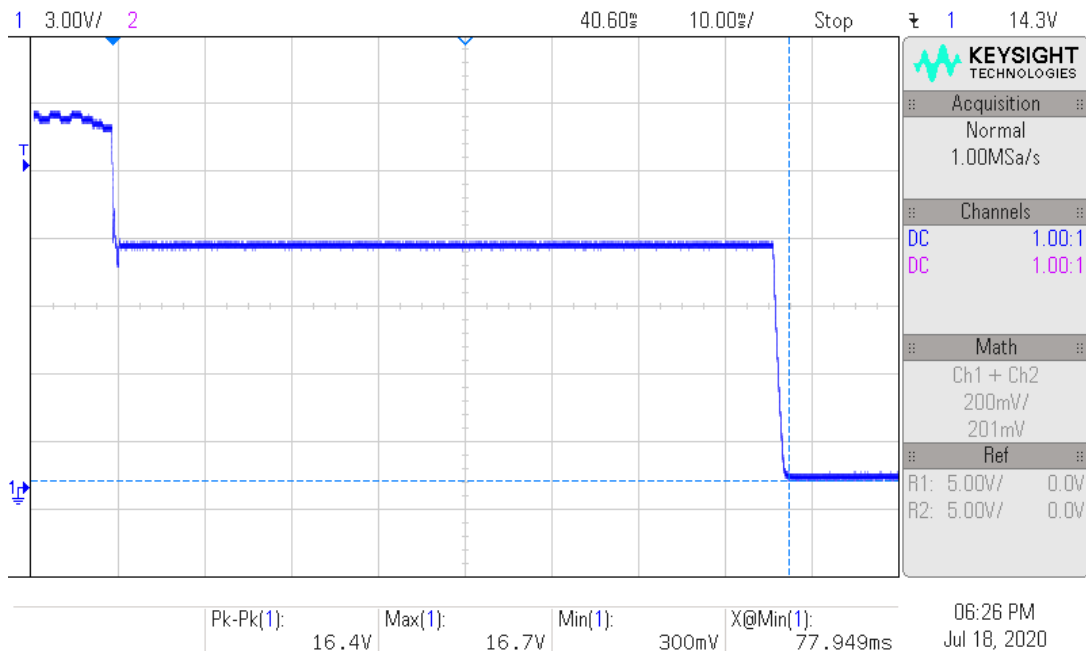
6.2.3 Namerané priebehy napätí

Namerané priebehy napätí slúžia pre overenie teoretických predpokladov funkčnosti. Oscilogram na Obr. 6-3 zobrazuje nábeh výstupného napätia po štarte v prípade pripojenej umelej záťaže. Napätie nabehne najprv po hodnotu vstupného napätia a následne ho MPPT regulátor zvyšuje, pričom sleduje dosiahnutie MPP fotovoltaického panela, v prípade že ho dosiahne, prestane zvyšovať napätie a daný pracovný bod si udržuje. Ak pracovný bod fotovoltaického panela nedosiahne, pokračuje so zvyšovaním výstupného napätia až do maximálnej hodnoty 16,6 V. V prípade prekročenia

maximálneho výstupného prúdu alebo resetu IO SM72442 nastane okamžité zastavenie spínania H-mostíka, a výstupné napätie začne strmo klesať v závislosti od záťaže, čo znázorňuje oscilogram na Obr. 6-4. V prípade nabíjania akumulátora klesne nabíjací prúd na nulovú hodnotu. Doba trvania poklesu pri výstupnej záťaži 3 A bola 78 ms.



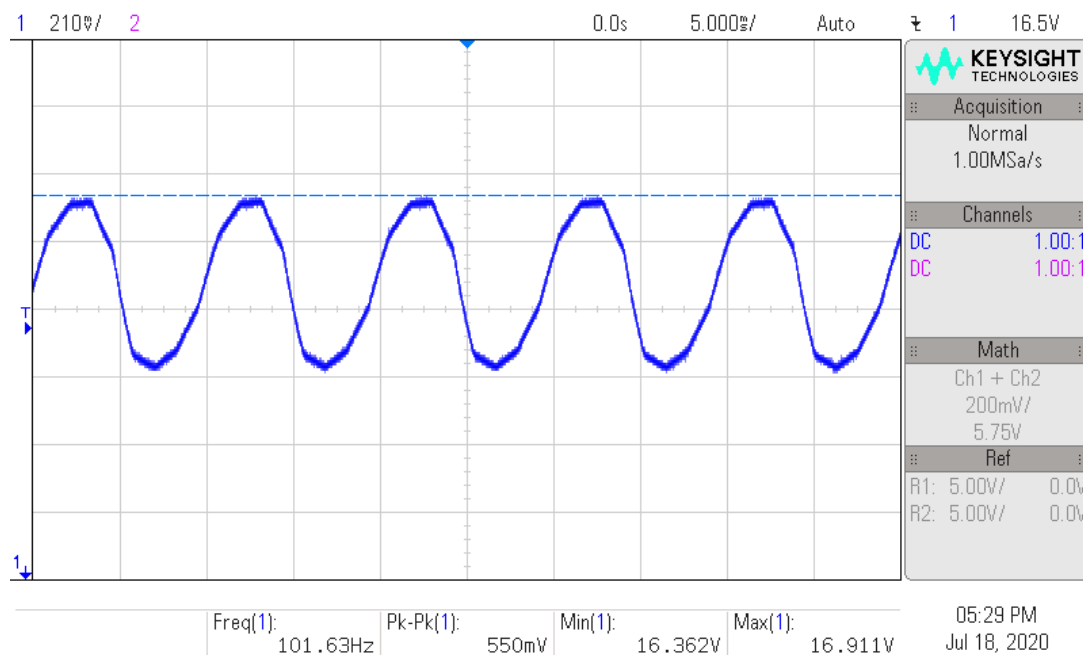
Obr. 6-3: Výstupné napätia po štarte bez akumulátora pri $U_{IN} = 11\text{ V}$, $I_{OUT} = 1\text{ A}$



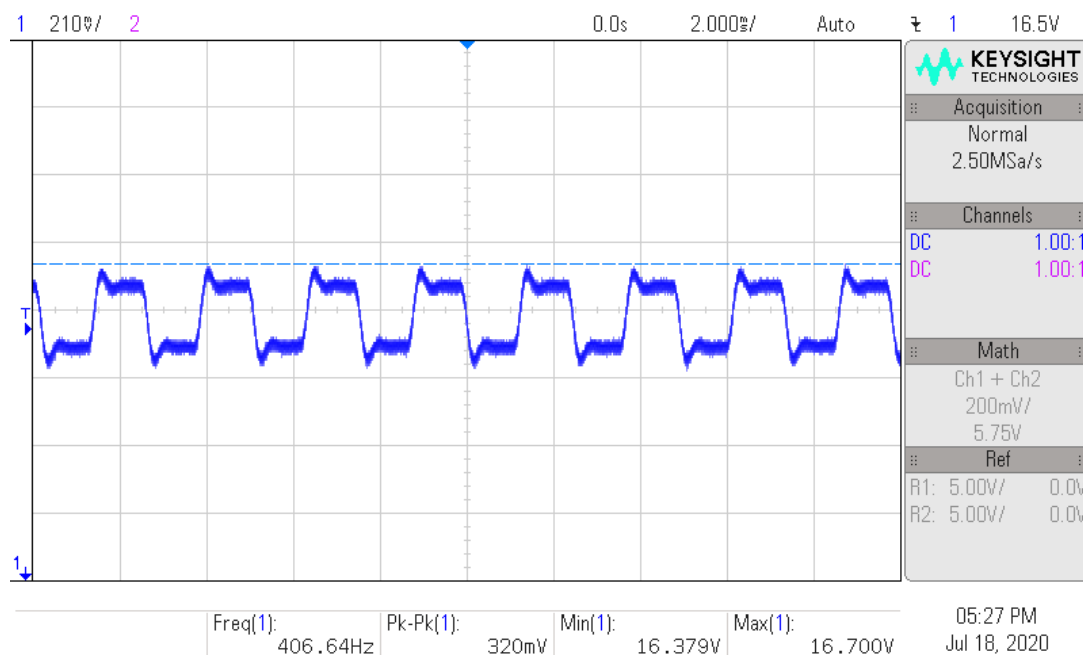
Obr. 6-4: Výstupné napätie po aktivácii resetu bez akumulátora (prekročenie maximálneho výstupného prúdu nastaveného na 3 A) pri $U_{IN} = 11\text{ V}$

Zvlnenie výstupného napätia so záťažou pod 0,5 A, kde je pozastavené spínanie tranzistora T7 je na oscilograme Obr. 6-5. Zvlnenie mimo MPP s výstupným prúdom nad

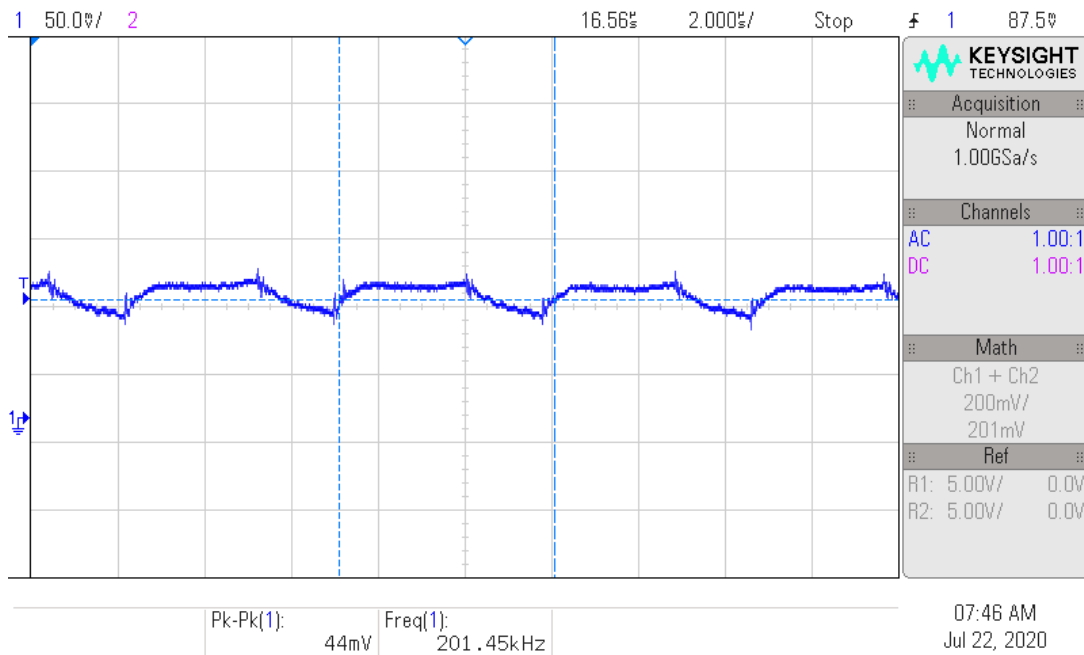
0,5 A je na Obr. 6-6. Detail kde je možné rozpoznať zvlnenie spôsobené indukčnosťou a kapacitou v H-mostíku s frekvenciou spínania 201 kHz je na Obr. 6-7. Pri tomto meraní už boli osadené vstupné a výstupné odrušovacie kondenzátory, ktoré mierne vyhladili výstupné napätie. Obr. 6-8 zobrazuje vstupné a výstupné napätie regulátora pri udržiavaní MPP fotovoltaického panela. Regulátor nájde MPP fotovoltaického panela a následne okolo tohto bodu kmitá, čím zistí prípadnú zmenu jeho polohy, ktorá by bola potrebná, v prípade zmeny svetelných podmienok na fotovoltaickom paneli.



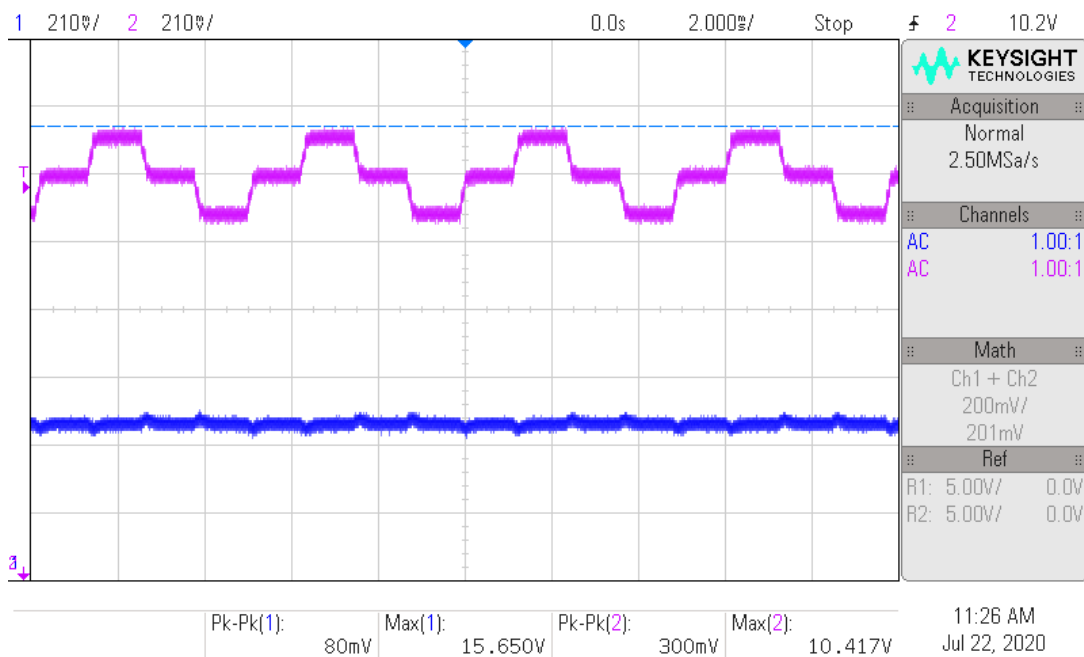
Obr. 6-5: Výstupné napätie mimo MPP pri $U_{IN} = 11\text{ V}$ a $I_{OUT} = 0,4\text{ A}$



Obr. 6-6: Výstupné napätie mimo MPP pri $U_{IN} = 11\text{ V}$ a $I_{OUT} = 2,5\text{ A}$



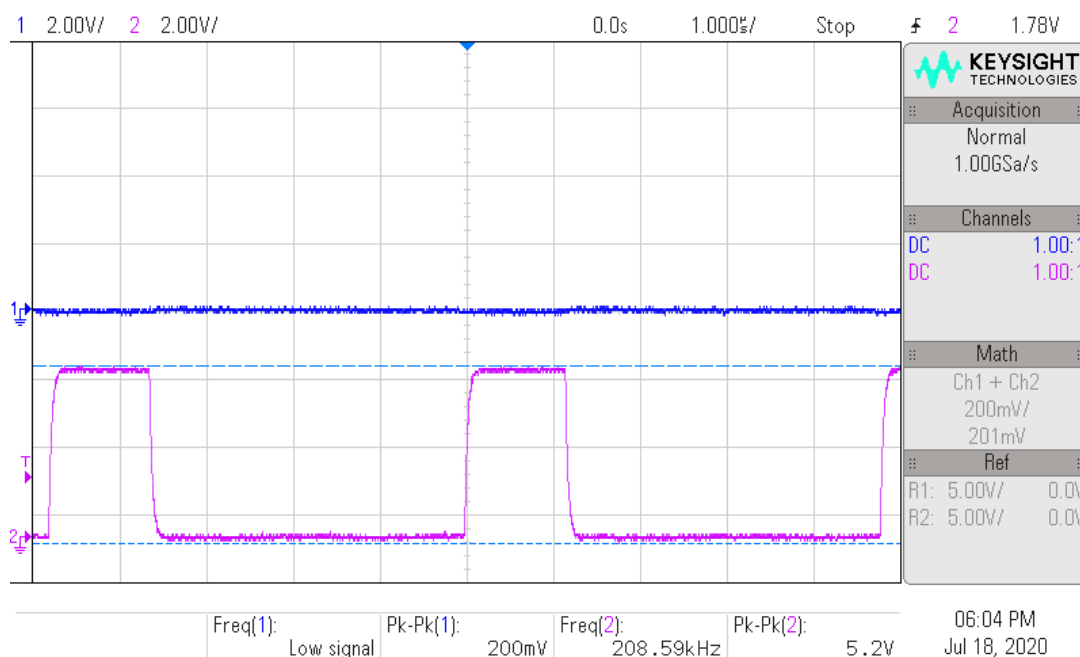
Obr. 6-7: Detail výstupného napätia pri $U_{IN} = 11V$ a $I_{OUT} = 2,5A$



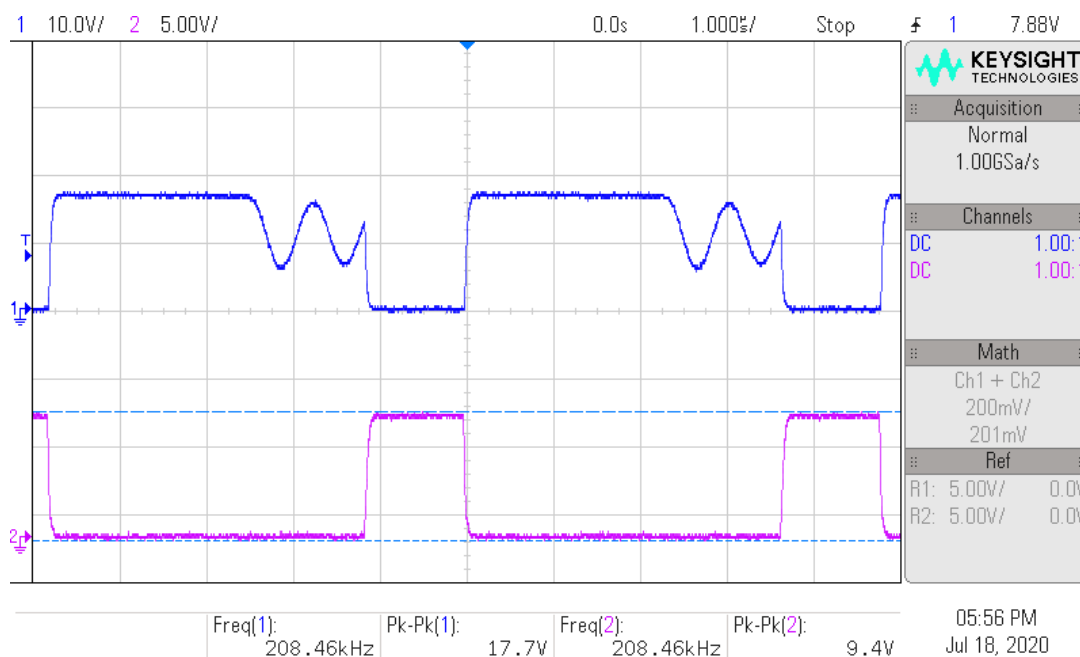
Obr. 6-8: Vstupné napätie fotovoltaického panela (fialová) a výstupné napätie na akumulátore (modrá) v MPP pri $I_{OUT} = 2,9 A$

Tranzistory T7 a T8 sa využívajú v prípade H-mostíka zvyšujúceho napätie nad hodnotu vstupného napätia. V prípade záťaže pod 0,5 A je pozastavené spínanie T7 z dôvodu ochrany proti spätnému vybíjaniu do akumulátorov (kapitola 3.7). Preto v oscilogramе na Obr. 6-9, ktorý zobrazuje detail spínacích signálov je možné vidieť nulové napätie pre HIB, ktorý ovláda spínanie T7. Na Obr. 6-10 a Obr. 6-11 sú priebehy napätí, z tranzistorov H-mostíka pre potvrdenie funkcie správneho spínania. Obr. 6-10 zobrazuje namerané napätie U_{GS} pre T8 (fialový) a ako modrý priebeh je súčet U_{GS} T7 + U_{DS} T8

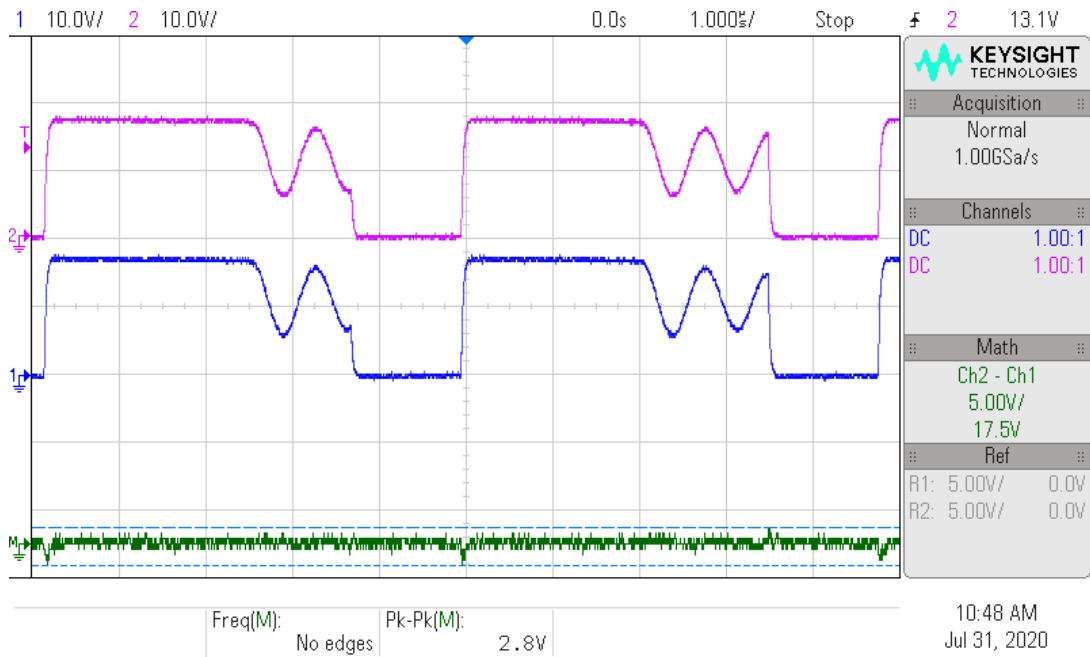
z dôvodu vytvárania plávajúcej zeme budičom H-mostíka. Získaný priebeh napätia na U_{GS} T7 je na Obr. 6-11 ako zelený priebeh po matematickej operácii rozdielu. Oscilogramy na nasledujúcich Obr. 6-12, Obr. 6-13 a Obr. 6-14 sú rovnaké, len pre výstupnú záťaž 2,5 A. Na týchto oscilogramoch už je možné pozorovať aj spínanie T7, čo znamená vyradenie ochrany proti vybíjaniu akumulátora a aj strieda spínania T8 je vyššia ako pri výstupnej záťaži 0,4 A. Na základe zmeraných priebehov napätí je možné konštatovať súlad s teoretickým priebehom na Obr. 3-3.



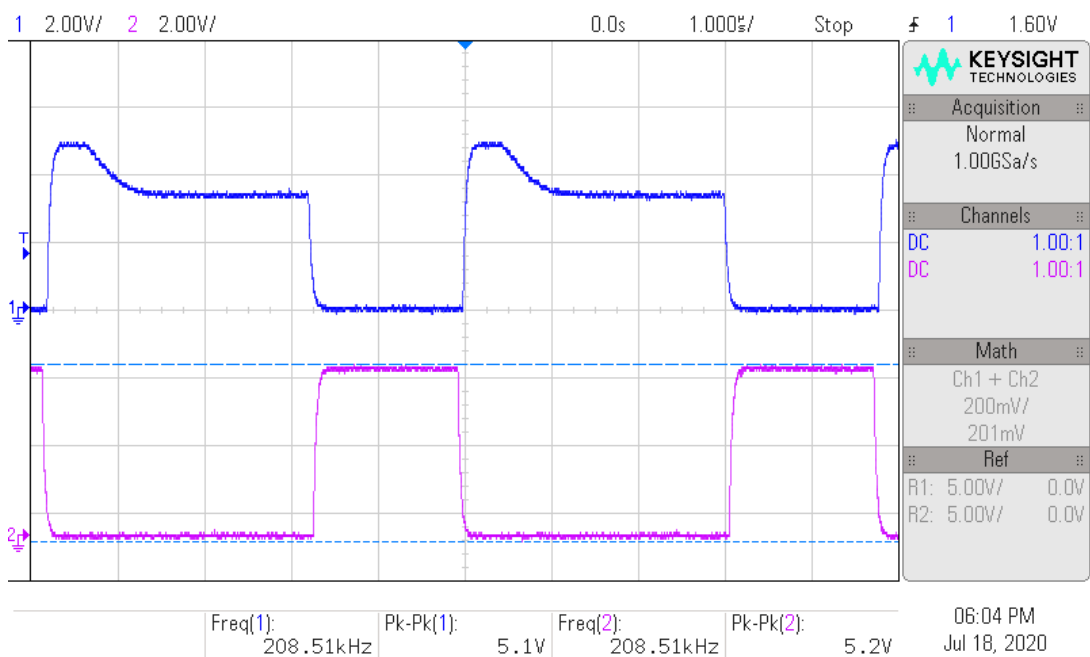
Obr. 6-9: Priebeh spínacích signálov HIB (modrá) a LOB (fialová) pri $U_{IN} = 11$ V, $I_{OUT} = 0,4$ A



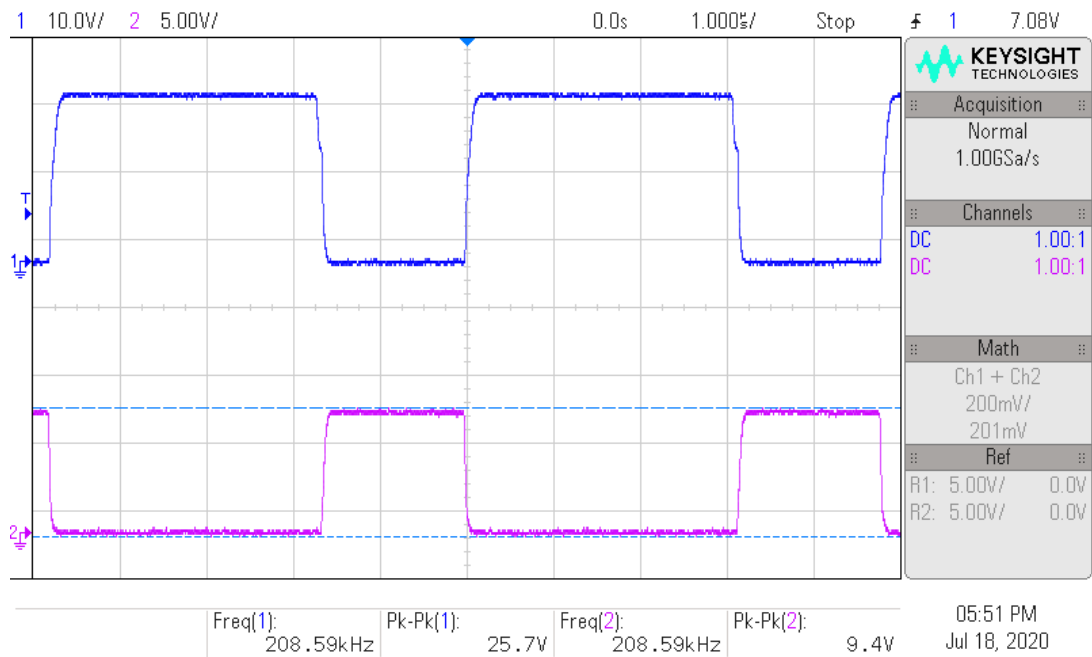
Obr. 6-10: Priebeh napätia na tranzistoroch U_{GS} T7 + U_{DS} T8 (modrá) a U_{GS} T8 (fialová) pri $U_{IN} = 11$ V, $I_{OUT} = 0,4$ A



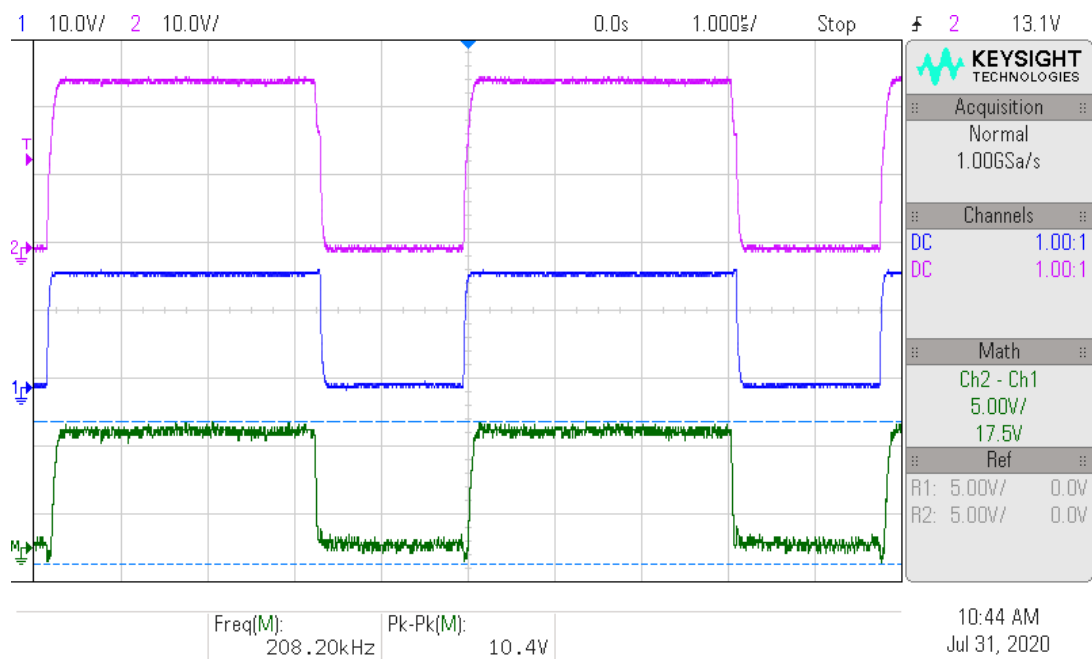
Obr. 6-11: Pribeh napätia na tranzistoroch U_{DS} T8 (modrá), U_{GS} T7 + U_{DS} T8 (fialová) a U_{GS} T7 (zelená) pri $U_{IN} = 11$ V, $I_{OUT} = 0,4$ A



Obr. 6-12: Pribeh spínacích signálov HIB (modrá) a LOB (fialová) pri $U_{IN} = 11$ V, $I_{OUT} = 2,5$ A

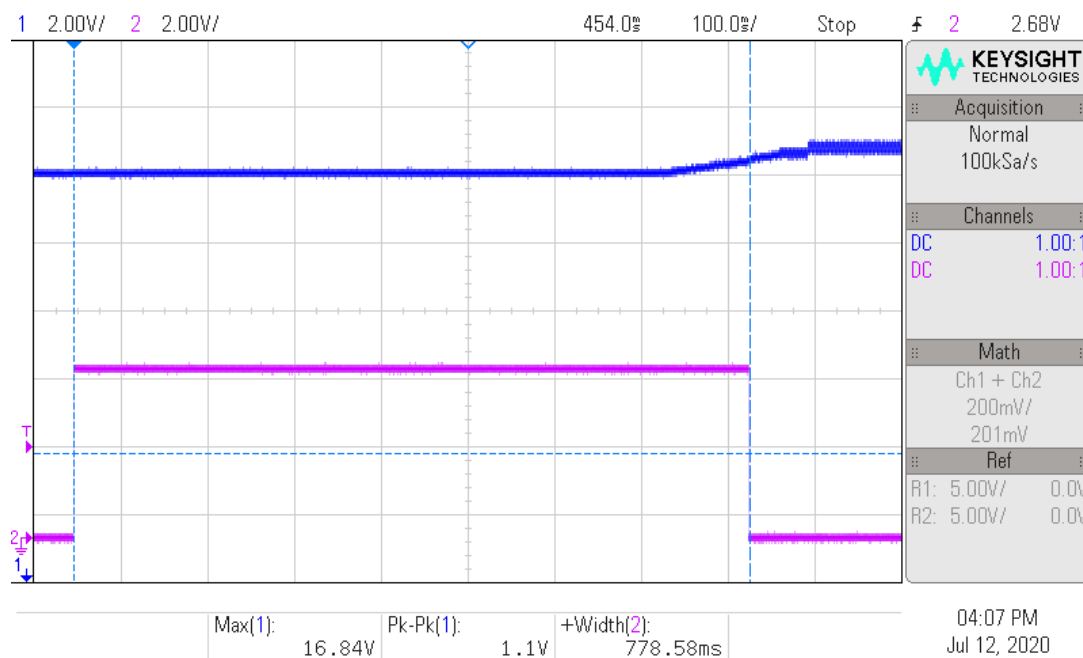


Obr. 6-13: Priebch napätia na tranzistoroch U_{GS} T7 + U_{DS} T8 (modrá) a U_{GS} T8 (fialová) pri $U_{IN} = 11$ V, $I_{OUT} = 2,5$ A



Obr. 6-14: Priebch napätia na tranzistoroch U_{DS} T8 (modrá), U_{GS} T7 + U_{DS} T8 (fialová) a U_{GS} T7 (zelená) pri $U_{IN} = 11$ V, $I_{OUT} = 2,5$ A

Nasledujúci oscilogram na Obr. 6-15 zobrazuje aktiváciu spúšťacieho obvodu (kapitola 3.8) po uvoľnení resetu MPPT regulátora potrebný pre naštartovanie do zvyšujúceho režimu. Hneď ako mikrokontrolér zistí, že do akumulátora tečie prúd nad stanovenú hranicu 0,2 A deaktivuje spúšťací obvod. Prúd do akumulátora začne tiecť vtedy, ak je napätie na výstupe regulátora vyššie ako napätie akumulátora.



Obr. 6-15: Výstupné napätie (modrá) a spúšťací obvod (fialová)

7. ZÁVER

Táto práca sa primárne zaoberá návrhom MPPT regulátora. Výsledkom je kompletný finálny návrh MPPT regulátora pre UAV spĺňajúci požadované parametre. Navrhnutý regulátor bude slúžiť pre napájanie UAV počas letu a nabíjanie palubného Li-Ion akumulátora v prípade prebytku výkonu, ktorý sa nevyužije na napájanie palubnej elektroniky, s cieľom dosiahnuť dobu letu až 10 h. Pri priemernom nabíjacom výkone na úrovni 40 % z maximálneho výkonu fotovoltaického panela a znížení celkovej kapacity akumulátora o 40 %, z dôvodu zníženia hmotnosti a rozmerov potrebných pre zabudovanie fotovoltaického panela do krídla UAV a implementáciu MPPT regulátora, bude docieľená hranica 10 h letu v prípade že UAV poletí aspoň 5,5 h v slnečných podmienkach. Navrhnutý regulátor bude pracovať vo zvyšujúcom režime s výstupným napätím 16,6 V a so vstupným napätím 20 fotovoltaických článkov zapojených v sérii s napätím 10 – 11,1 V v optimálnom pracovnom bode v závislosti od ich celkového osvetlenia. Zároveň regulátor musí zniesť 13,74 V v prípade fotovoltaických článkov naprázdno. Napäťový stabilizátor, ktorý slúži k napájaniu spínacích komponentov s výstupným napätím 9 V má maximálne vstupné napätie až 18 V a zároveň sú výkonové komponenty dostatočne predimenzované, čiže nie je problém v prípade potreby počet fotovoltaických článkov zvýšiť. Výsledkom návrhu je 4-vrstvová DPS s rozmermi 67x37 mm s hmotnosťou regulátora osadeného súčiastkami na úrovni 24,8 g.

Vybraný integrovaný obvod, ktorý zabezpečuje MPPT reguláciu spolupracuje s budičom H-mostíka, ktorý sa stará o spínanie výkonových komponentov a zároveň obsahuje integrované zosilňovače pre snímanie vstupného a výstupného prúdu, ktoré predávajú informáciu o veľkostiach prúdov samotnému MPPT regulátoru. V práci je zdôvodnený výber jednotlivých kľúčových komponentov H-mostíka, ktoré najviac vplývajú na účinnosť a požadované parametre. Mikrokontrolér sa stará o štart a monitorovanie integrovaného obvodu zabezpečujúceho MPPT reguláciu, nastavovanie a čítanie jeho vnútorných registrov prostredníctvom I²C zbernice a monitorovanie parametrov počas prevádzky. Kontroluje vstupné, výstupné napätia a prúdy a teplotu výkonovej časti regulátora, ktorú získa z digitálneho teplomera prostredníctvom komunikácie cez I²C. V prípade prekročenia niektorého z parametrov okamžite zastaví funkciu MPPT regulátora spolu s budičom H-mostíka a nabíjanie sa zastaví. Zároveň každú sekundu odosiela namerané prevádzkové parametre cez UART, kde ich užívateľ môže prečítať. Celé zariadenie je navrhnuté s veľkým dôrazom na bezpečnosť, preto sa v zapojení nachádza aj integrovaný obvod, ktorý kontroluje napájaciu vetvu s digitálnym napájacím napätím 5 V, ktorý v prípade problému tiež zastaví funkciu regulátora. Mikrokontrolér má tiež aktivovanú vlastnú detekciu poklesu napájacieho napätia a zapnutý watchdog časovač, ktorý v prípade problému aktivuje vlastný interný reset pre opätovnú inicializáciu.

Navrhnutý regulátor dosahuje zvlnenie výstupného napätia do 50 mV so spínacou frekvenciou približne 200 kHz. Zo zmeraných priebehov napätia je možné vidieť ako regulátor vyhľadáva a udržiava optimálny pracovný bod fotovoltaických článkov tým, že ich zaťažuje a odľahčuje, čo sa prejaví zvlnením napätia fotovoltaických článkov na vstupe. Regulátor taktiež obsahuje ochranu proti vybíjaniu akumulátora späť do fotovoltaických panelov, ktorá sa aktivuje autonómne, v prípade výstupného prúdu pod 0,5 A. Nameraná účinnosť regulátora dosahovala až 95 %, čo bolo potvrdené aj pri meraní v reálnych podmienkach pri nabíjaní akumulátora z fotovoltaických panelov. Pri

tomto meraní sa teplota výkonovej časti regulátora zvýšila o 35 °C nad teplotu okolia, čo pri okolitej teplote do 60 °C nepredstavuje problém. V prípade zvýšenia počtu článkov vo fotovoltaickom paneli, alebo v prípade vyššej okolitej prevádzkovej teploty je nutné zvážiť prídanie chladiča na výkonovú časť regulátora, alebo zabezpečiť prúdenie okolitého vzduchu pre lepšie chladenie výkonových tranzistorov. V opačnom prípade bude nabíjanie prerušované, keďže bude dochádzať k prekročeniu stanovených maximálnych prevádzkových hodnôt teploty. Z dlhodobého hľadiska by mohlo dôjsť k zničeniu výkonových tranzistorov ich prehriatím.

Literatúra

- [1] What is the Difference Between Solar Panels and Photovoltaic Cells? Infinite energy [online]. [cit. 2019-11-01]. Dostupné z: <https://www.infiniteenergy.com.au/what-is-the-difference-between-a-solar-panel-and-a-photovoltaic-cell/>
- [2] DUNLOP, James P. Photovoltaic systems. 3rd ed. Orland Park, Illinois: American Technical Publishers, c2012. ISBN 978-1-935941-05-7.
- [3] FOTOVOLTAIKA [online]. [cit. 2019-11-01]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k32.htm>
- [4] Green, MA, Hishikawa, Y, Dunlop, ED, Levi, DH, Hohl-Ebinger, J, Ho-Baillie, AWY. Solar cell efficiency tables (version 51). Prog Photovolt Res Appl. 2018; 26: 3-12 [cit. 2019-11-02]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/pip.2978>
- [5] H. FÖLL. Solar Cells From Polycrystalline Cast Si [online]. [cit. 2019-11-03]. Dostupné z: https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/semi_en/kap_3/illustr/i3_2_1.html
- [6] LOTUS EUROPE. SOLAR POLYCRYSTALLINE SILICON INGOT [online]. [cit. 2019-11-03]. Dostupné z: <http://www.lotuseurope.net/product/view/114/Solar+Polycrystalline+Silicon+Ingot>
- [7] SILICON VALLEY MICROELECTRONICS. Silicon Ingot [online]. [cit. 2019-11-03]. Dostupné z: <https://www.svmi.com/silicon-ingot/>
- [8] Solar cell. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-11-03]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell
- [9] Solar cell efficiency. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell_efficiency
- [10] INDIAMART: Solar Thin Film [online]. [cit. 2019-11-08]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/solar-thin-film-7746935462.html>
- [11] Energy Informative: Amorphous Silicon Solar Panels [online]. [cit. 2019-11-08]. Dostupné z: <https://energyinformative.org/amorphous-silicon-solar-panels/>
- [12] IMRbatteries SONY VTC6 Datasheet: Product Specifications [online]. [cit. 2019-11-08]. Dostupné z: https://www.imrbatteries.com/content/sony_us18650vtc6-2.pdf
- [13] GRABCAD Comunity: Battery 18650 [online]. [cit. 2019-11-09]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/battery-18650-2>
- [14] Battery University: Types of Battery Cells [online]. [cit. 2019-11-08]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_battery_cells
- [15] Sunpower C60 solar cell: Datasheet [online]. [cit. 2019-11-08]. Dostupné z: http://eshop.terms.eu/_data/s_3386/files/1379942540-sunpower_c60_bin_ghi.pdf

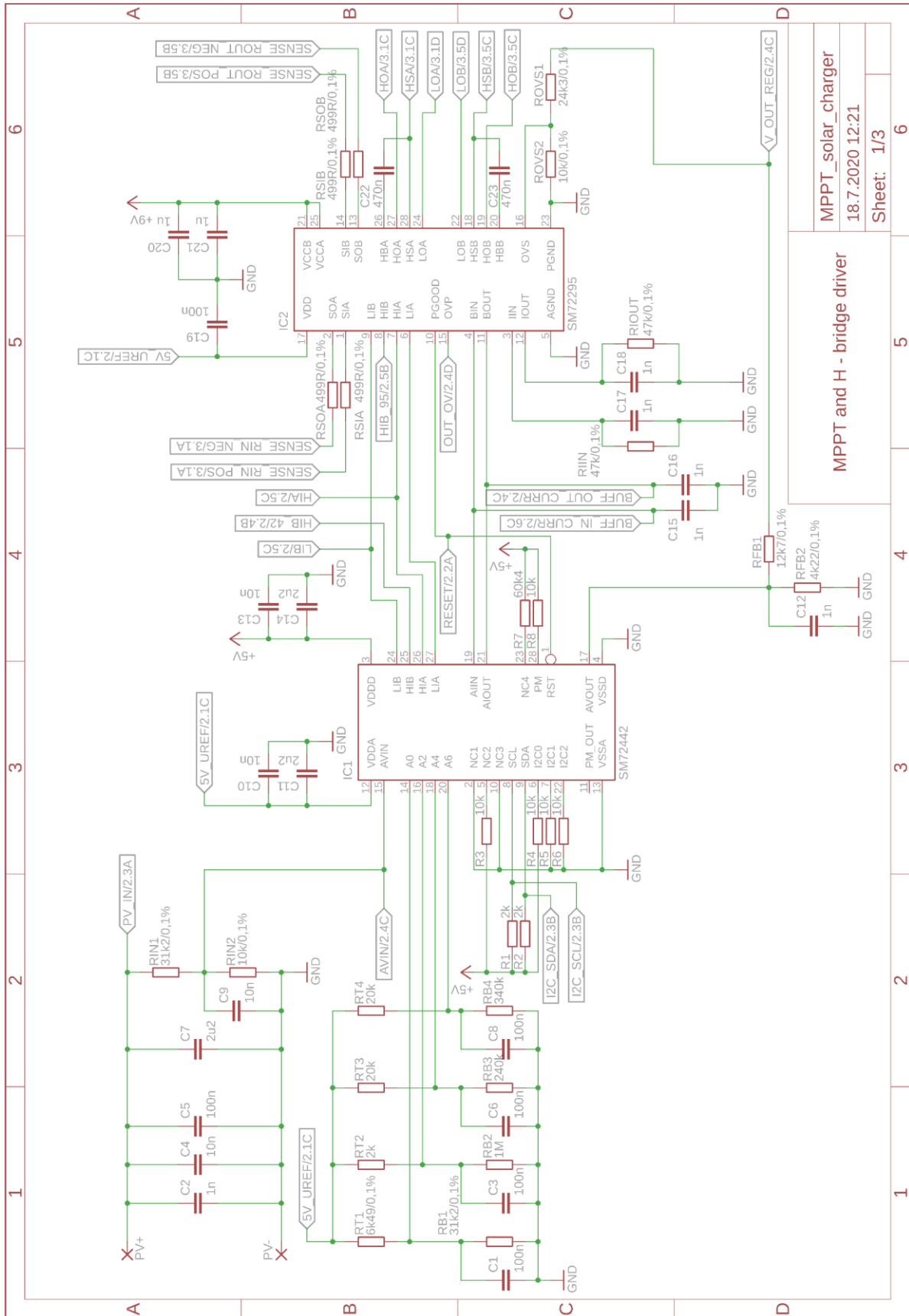
- [16] Power Electronics: Solar System Efficiency: Maximum Power Point Tracking is Key [online]. [cit. 2019-11-15]. Dostupné z: <https://www.powerelectronics.com/solar/solar-system-efficiency-maximum-power-point-tracking-key>
- [17] WU, Yuping, ed. Lithium-ion batteries: fundamentals and applications. Boca Raton: CRC Press, [2015]. Electrochemical energy storage and conversion. ISBN 978-1-4665-5733-8.
- [18] HASSOUN, Jusef, Walter van SCHALKWIJK, K. M. ABRAHAM a Bruno SCROSATI. Lithium Batteries: Advanced Technologies and Applications. USA: Wiley, 2013. ISBN 978-1-118-18365-6.
- [19] BEARD, Kirby W. a Thomas B. REDDY. Linden's handbook of batteries. Fifth edition. New York: McGraw-Hill, [2019]. ISBN 978-1-260-11592-5.
- [20] BAZITO, Fernanda F. C. a Roberto M. TORRESI. Cathodes for lithium ion batteries: the benefits of using nanostructured materials. Journal of the Brazilian Chemical Society [online]. 2006, 17(4), 627-642 [cit. 2019-11-16]. DOI: 10.1590/S0103-50532006000400002. ISSN 0103-5053.
- [21] Thin-film solar cell. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Thin-film_solar_cell
- [22] WEIXIANG SHEN, THANH TU VO a Ajay KAPOOR. Charging algorithms of lithium-ion batteries: An overview. 2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA) [online]. IEEE, 2012, 2012, , 1567-1572 [cit. 2019-11-24]. DOI: 10.1109/ICIEA.2012.6360973. ISBN 978-1-4577-2119-9. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6360973/>
- [23] QUAN OUYANG, JIAN CHEN, CHENFENG XU a HONGYE SU. Cell balancing control for serially connected lithium-ion batteries. 2016 American Control Conference (ACC) [online]. IEEE, 2016, 2016, , 3095-3100 [cit. 2019-11-29]. DOI: 10.1109/ACC.2016.7525393. ISBN 978-1-4673-8682-1. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7525393/>
- [24] LT8490 High Voltage, High Current Buck-Boost Battery Charge Controller with Maximum Power Point Tracking (MPPT) Datasheet [online]. [cit. 2019-11-29]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/8490fa.pdf>
- [25] SM72441 Programmable Maximum Power Point Tracking Controller for Photovoltaic Solar Panels: Datasheet [online]. [cit. 2019-11-29]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sm72441.pdf>
- [26] SM72442 Programmable Maximum Power Point Tracking Controller for Photovoltaic Solar Panels: Datasheet [online]. [cit. 2019-11-29]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sm72442.pdf>
- [27] SM72445 Programmable Maximum Power Point Tracking Controller With Adjustable PWM Frequency: Datasheet [online]. [cit. 2019-11-29]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sm72445.pdf>

- [28] SM72295 Photovoltaic Full Bridge Driver: Datasheet [online]. [cit. 2019-12-01]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sm72295.pdf>
- [29] AN-2124 Power Circuit Design for SolarMagic™ SM3320: Application report [online]. 2013 [cit. 2019-12-06]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/snosb84c/snosb84c.pdf>
- [30] LAKKAS, George. MOSFET power losses and how they affect power-supply efficiency: Analog Applications Journal [online]. [cit. 2019-12-09]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/slyt664/slyt664.pdf>
- [31] NTMFS4955N MOSFET – Power, Single, N-Channel, SO-8 FL 30 V, 48 A: Datasheet [online]. [cit. 2019-12-09]. Dostupné z: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/NTMFS4955N-D.PDF>
- [32] ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P: megaAVR® Datasheet [online]. 2018 [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega48A-PA-88A-PA-168A-PA-328-P-DS-DS40002061A.pdf>
- [33] LP2985 150-mA Low-noise Low-dropout Regulator With Shutdown: Datasheet [online]. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lp2985.pdf>
- [34] LT6654 Precision Wide Supply High Output Drive Low Noise Reference: Datasheet [online]. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/6654fh.pdf>
- [35] MCP131X/2X Voltage Supervisor: Datasheet [online]. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/21985d.pdf>
- [36] TC74 Tiny Serial Digital Thermal Sensor: Datasheet [online]. [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21462D.pdf>
- [37] TLV703x and TLV704x Small-Size, Nanopower, Low-Voltage Comparators: Datasheet [online]. [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/gpn/tlv7041>
- [38] TPS7A24 200-mA, 18-V, Ultra-Low IQ, Low-Dropout Voltage Regulator: Datasheet [online]. [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/gpn/tps7a24>
- [39] AN-2121 SolarMagic™ SM3320-BATT-EV Charge Controller Reference Design: Application Report [online]. [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/pdf/snosb76>
- [40] IN-S128DATRG Top View SMD LED 1210 PCB Type: Datasheet [online]. [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <http://www.inolux-corp.com/datasheet/SMDLED/Bi-Color%20Top%20View/IN-S128DATRG.pdf>
- [41] Fotovoltaická laboratoř. Centrum výzkumu a využití obnovitelných zdrojů energie [online]. [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: <http://www.cvvoze.cz/vyzkumne-programy/chemicke-a-fotovoltaicke-zdroje-energie/laboratore-chemie/fotovoltaicka-laborator/>

Zoznam príloh

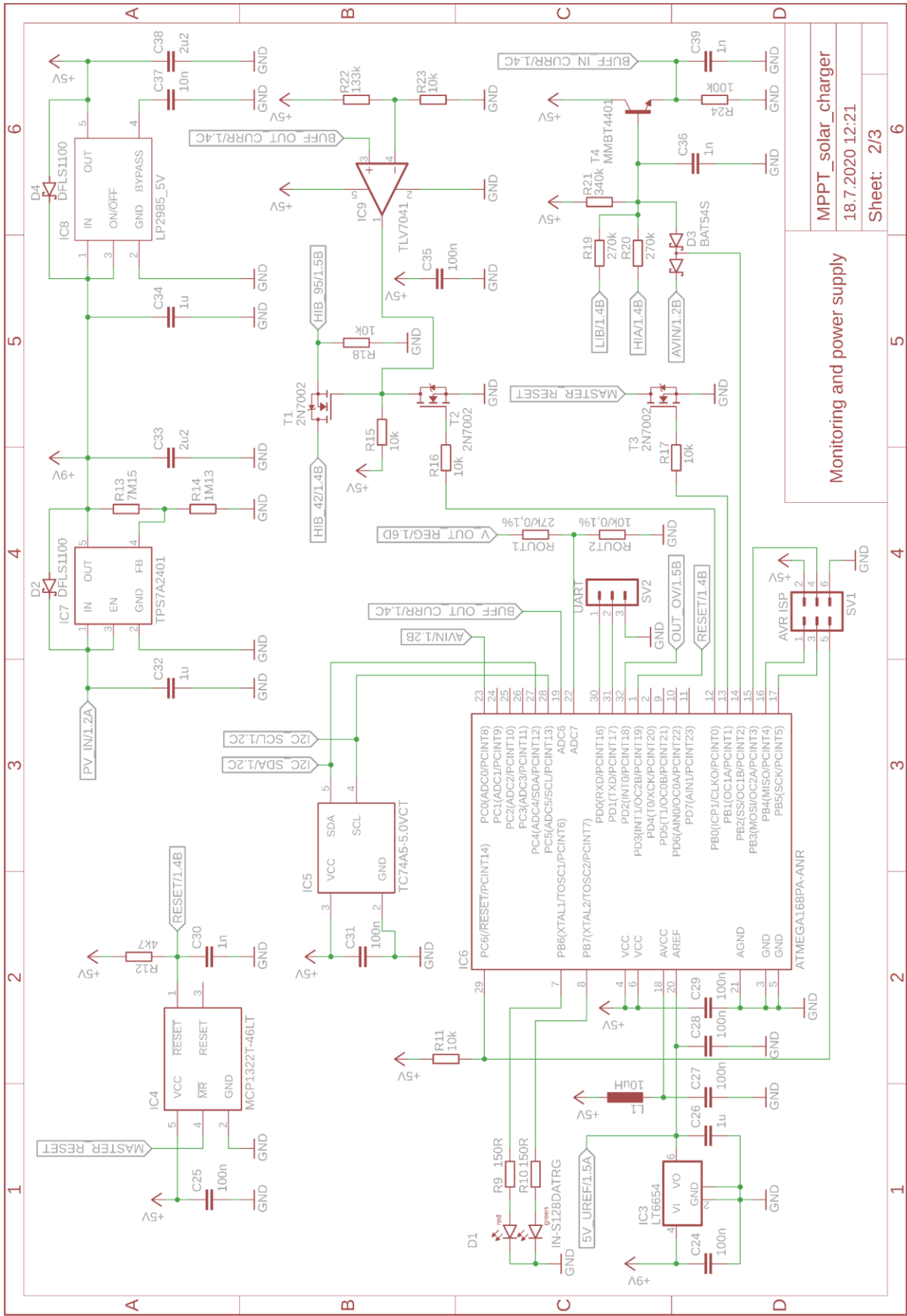
Príloha A	Schéma zapojenia.....	64
Príloha B	Návrh DPS	67
B.1	Vrstva TOP	67
B.2	Vrstva GROUND	67
B.3	Vrstva POWER	68
B.4	Vrstva BOTTOM.....	68
Príloha C	Osadzovací plán	69
C.1	TOP.....	69
C.2	BOTTOM	69
Príloha D	Zoznam použitých súčiastok	70
Príloha E	Tabuľky nameraných hodnôt účinnosti.....	72
Príloha F	Elektronické prílohy	75

Príloha A Schéma zapojenia



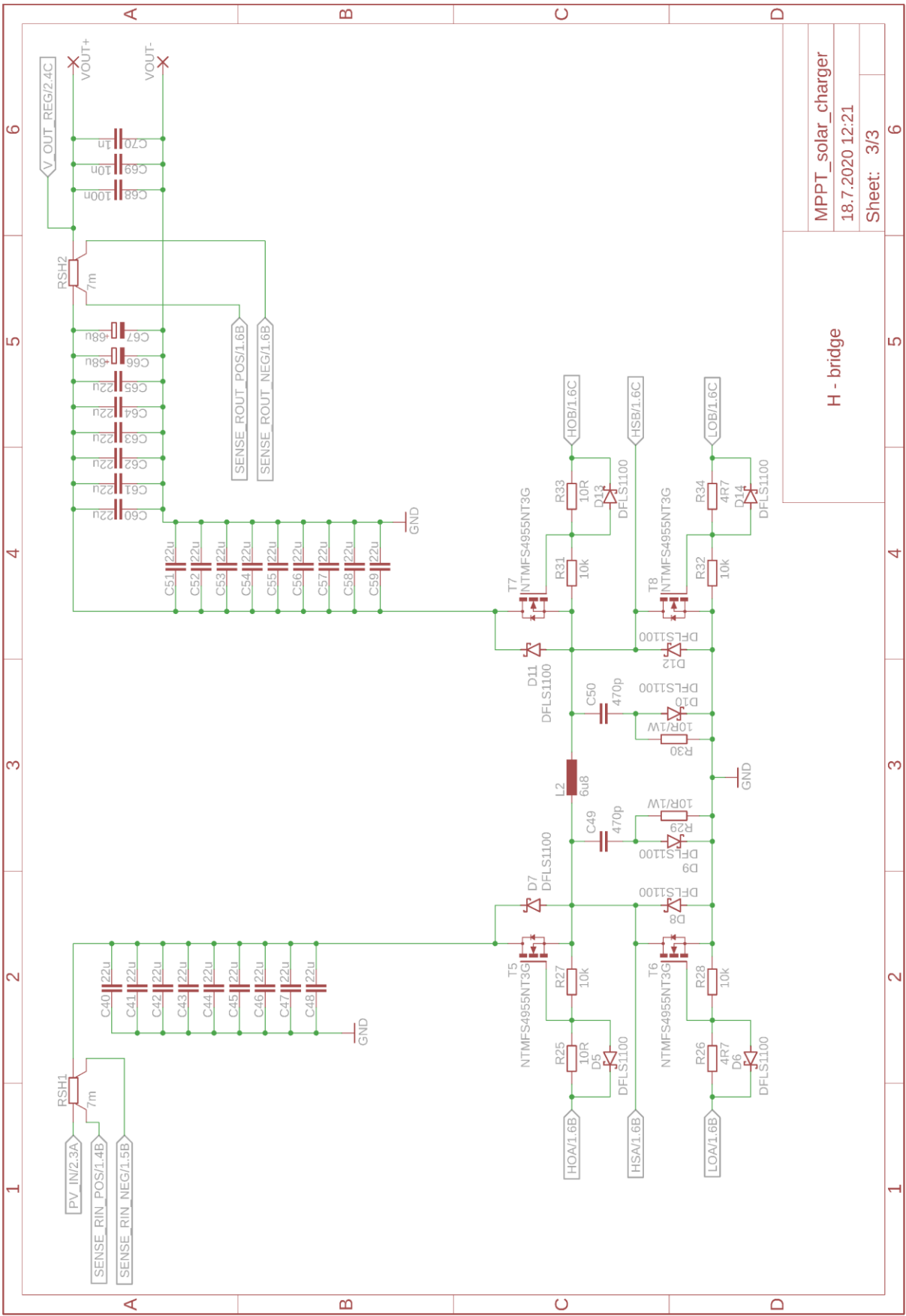
MPPT_solar_charger
18.7.2020 12:21
Sheet: 1/3

MPPT and H - bridge driver



MPPT_solar_charger
18.7.2020 12:21
Sheet: 2/3

Monitoring and power supply

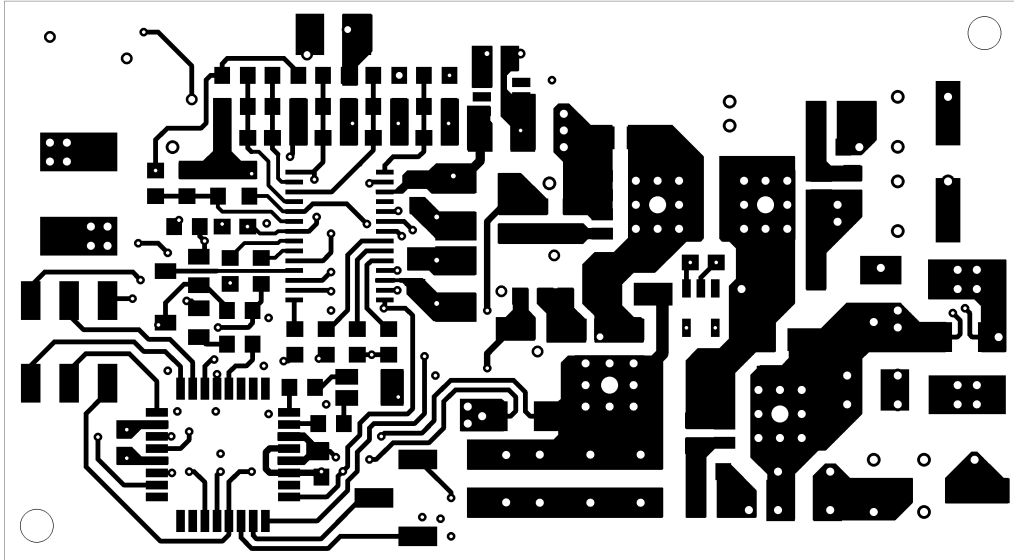


H - bridge		MPPT_solar_charger	6
		18.7.2020 12:21	6
		Sheet: 3/3	6

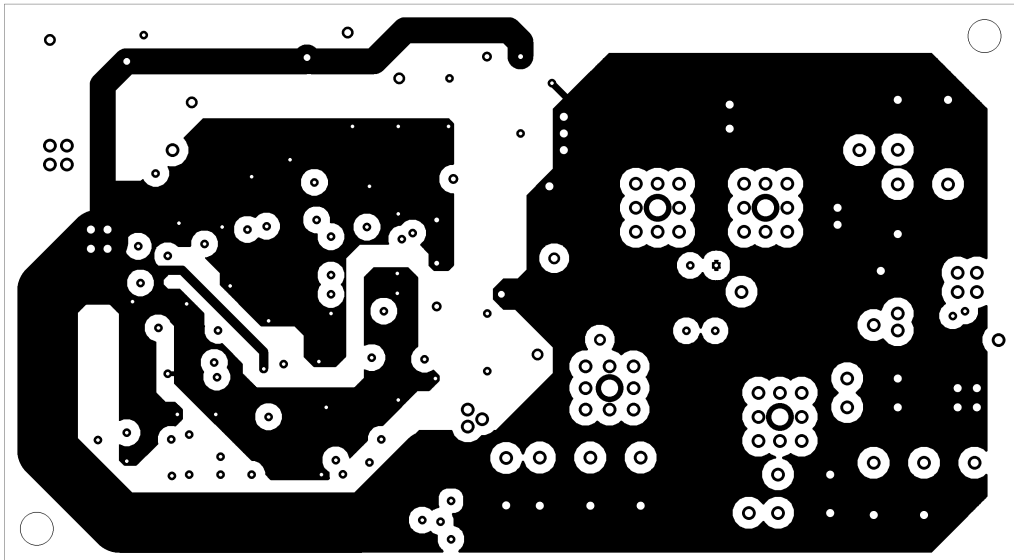
Príloha B Návrh DPS

Rozmery DPS sú 67x37 mm, zobrazené v mierke M2:1

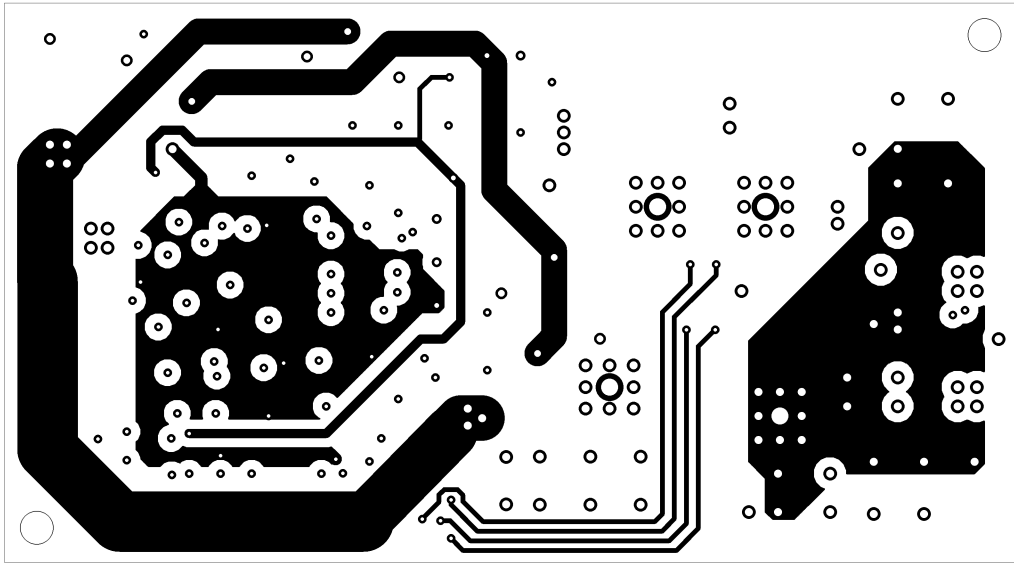
B.1 Vrstva TOP



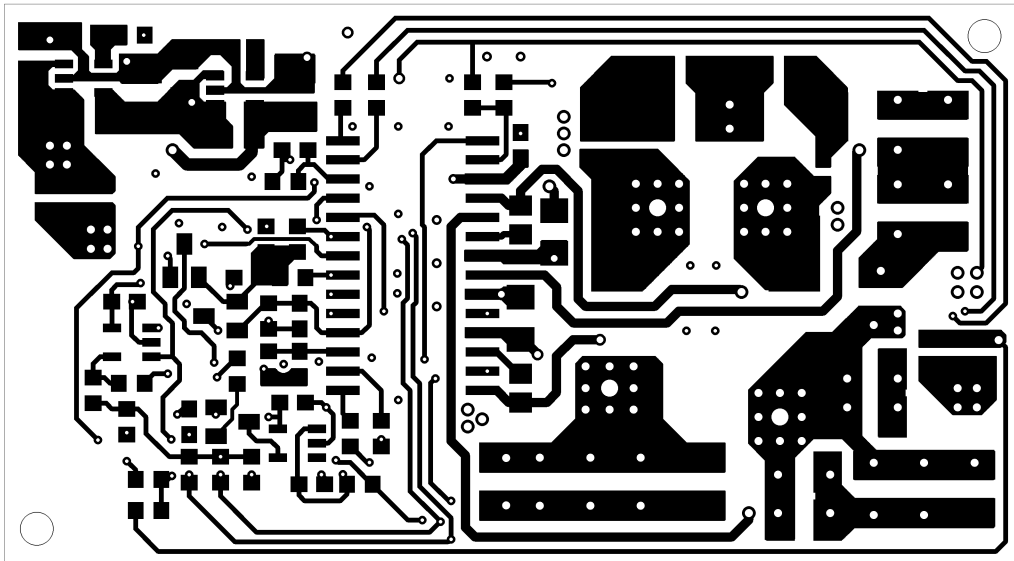
B.2 Vrstva GROUND



B.3 Vrstva POWER



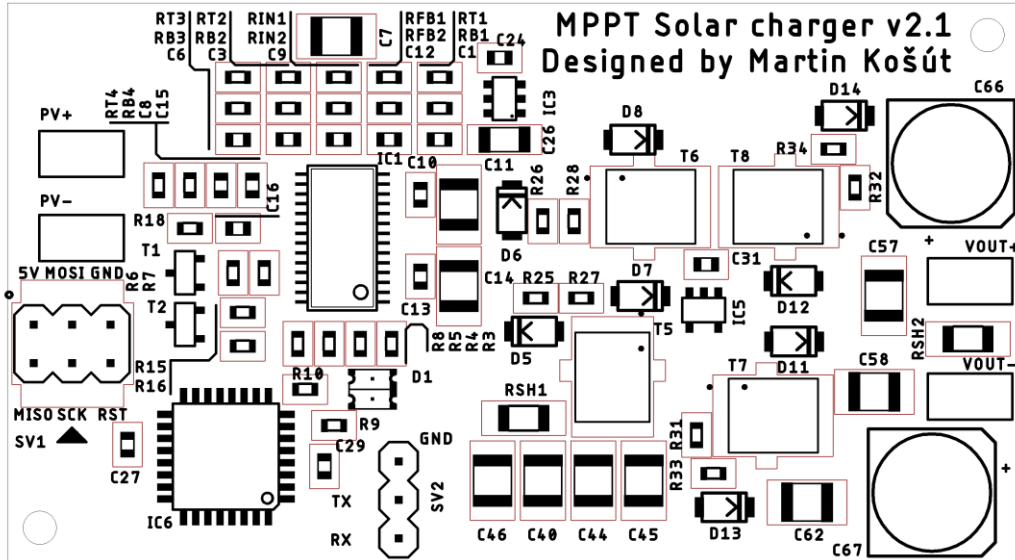
B.4 Vrstva BOTTOM



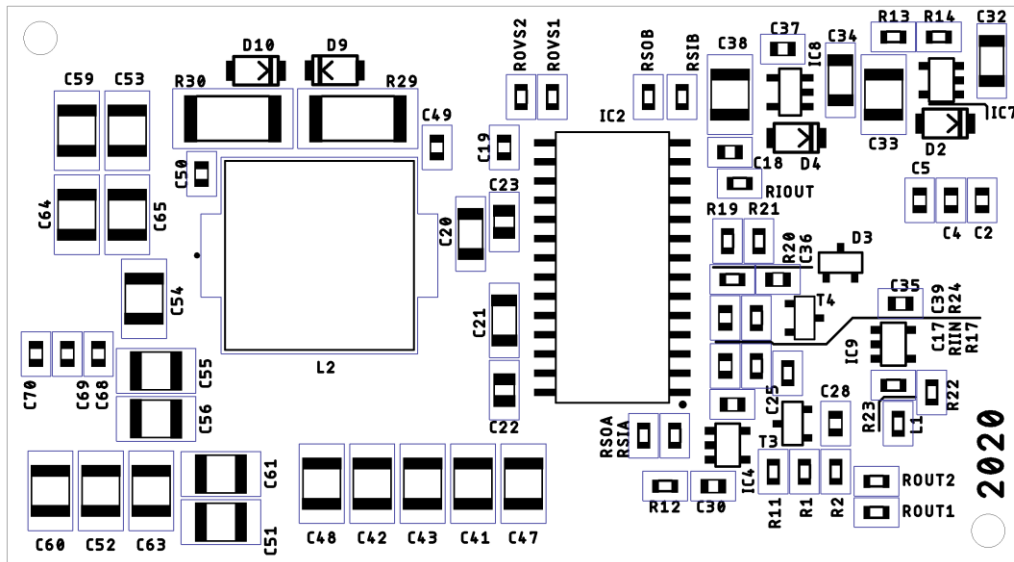
Príloha C Osadzovací plán

Rozmery DPS sú 67x37 mm, zobrazené v mierke M2:1

C.1 TOP



C.2 BOTTOM



Príloha D Zoznam použitých súčiastok

Poč.	Označenie	Hodnota	Puzdro	Popis
14	C1, C3, C5, C6, C8, C19, C24, C25, C27, C28, C29, C31, C35, C68	100n	C0603	Keramický kondenzátor
10	C2, C12, C15, C16, C17, C18, C30, C36, C39, C70	1n	C0603	Keramický kondenzátor
5	C20, C21, C26, C32, C34	1u	C1206	Keramický kondenzátor
2	C22, C23	470n	C0805	Keramický kondenzátor
6	C4, C9, C10, C13, C37, C69	10n	C0603	Keramický kondenzátor
24	C40, C41, C42, C43, C44, C45, C46, C47, C48, C51, C52, C53, C54, C55, C56, C57, C58, C59, C60, C61, C62, C63, C64, C65	22u	C1210	Keramický kondenzátor
2	C49, C50	470p	C0603	Keramický kondenzátor
2	C66, C67	68u	153CLV-0807	Hliníkový polymérový kondenzátor 15mΩ
5	C7, C11, C14, C33, C38	2u2	C1210	Keramický kondenzátor
1	D1	IN-S128DATRG	SML1210	Dvojfarebná vysokosvietivá LED
12	D2, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11, D12, D13, D14	DFLS1100	POWERDI123	Schottkyho dióda
1	D3	BAT54S	SOT23	Schottkyho dióda
1	IC1	SM72442	TSSOP28	MPPT regulátor
1	IC2	SM72295	SOIC28	Budič H-mostíka
1	IC3	LT6654	SOT23-6	5 V napäťová referencia
1	IC4	MCP1322T-46LT	SOT23-5	Resetovací obvod
1	IC5	TC74A5-5.0VCT	SOT23-5	Digitálny teplomer
1	IC6	ATMEGA168PA-ANR	TQFP32	Mikrokontrolér
1	IC7	TPS7A2401	SOT23-5	Napäťový stabilizátor (9 V)
1	IC8	LP2985_5V	SOT23-5	Napäťový stabilizátor (5 V)
1	IC9	TLV7041	SOT23-5	Napäťový komparátor
1	L1	10uH	L0603	Cievka
1	L2	6u8	SRP1265	Cievka
1	PAD1	PV+	5-2,5	PAD
1	PAD2	PV-	5-2,5	PAD
1	PAD3	VOUT+	5-2,5	PAD
1	PAD4	VOUT-	5-2,5	PAD
3	R1, R2, RT2	2k	R0603	Rezistor
1	R12	4k7	R0603	Rezistor
1	R13	7M15	R0603	Rezistor
1	R14	1M13	R0603	Rezistor
2	R19, R20	270k	R0603	Rezistor
2	R21, RB4	340k	R0603	Rezistor
1	R22	133k	R0603	Rezistor
1	R24	100k	R0603	Rezistor

2	R25, R33	10R	R0603	Rezistor
2	R26, R34	4R7	R0603	Rezistor
2	R29, R30	10R/1W	R2512	Výkonový rezistor
15	R3, R4, R5, R6, R8, R11, R15, R16, R17, R18, R23, R27, R28, R31, R32	10k	R0603	Rezistor
1	R7	60k4	R0603	Rezistor
2	R9, R10	150R	R0603	Rezistor
1	RB2	1M	R0603	Rezistor
1	RB3	240k	R0603	Rezistor
1	RFB1	12k7/0,1%	R0603	Rezistor
1	RFB2	4k22/0,1%	R0603	Rezistor
2	RIIN, RIOUT	47k/0,1%	R0603	Rezistor
2	RIN1, RB1	31k2/0,1%	R0603	Rezistor
3	RIN2, ROUT2, ROVS2	10k/0,1%	R0603	Rezistor
1	ROUT1	27k/0,1%	R0603	Rezistor
1	ROVS1	24k3/0,1%	R0603	Rezistor
2	RSH1, RSH2	7m	R1206	Snímací rezistor - WSLP1206
4	RSIA, RSIB, RSOA, RSOB	499R/0,1%	R0603	Rezistor
1	RT1	6k49/0,1%	R0603	Rezistor
2	RT3, RT4	20k	R0603	Rezistor
1	SV1	AVR ISP	MA03-2-SMD	Konektor - SSM103LDV
1	SV2	UART	MA03-1-SMD	Konektor - SSM103LSV
3	T1, T2, T3	2N7002	SOT23	Tranzistor N-MOSFET
1	T4	MMBT4401	SOT23	Tranzistor NPN
4	T5, T6, T7, T8	NTMFS4955NT3G	SO-08FL	Tranzistor N-MOSFET

Príloha E Tabuľky nameraných hodnôt účinnosti

U _{IN} = 10 V					
I _{IN} [A]	U _{OUT} [V]	I _{OUT} [A]	P _{IN} [W]	P _{OUT} [W]	η [%]
0,45	16,55	0,20	4,50	3,31	73,6
0,81	16,56	0,40	8,10	6,62	81,8
1,15	16,58	0,60	11,50	9,95	86,5
1,45	16,47	0,80	14,50	13,18	90,9
1,80	16,55	1,00	18,00	16,55	91,9
2,11	16,60	1,18	21,10	19,59	92,8
2,44	16,49	1,38	24,40	22,76	93,3
2,78	16,53	1,58	27,80	26,12	93,9
3,12	16,52	1,78	31,20	29,41	94,2
3,45	16,57	1,97	34,50	32,64	94,6
3,87	16,61	2,20	38,70	36,54	94,4
4,15	16,51	2,38	41,50	39,29	94,7
4,49	16,55	2,56	44,90	42,37	94,4
4,87	16,60	2,77	48,70	45,98	94,4
4,96	16,60	2,82	49,60	46,81	94,4

U _{IN} = 12 V					
I _{IN} [A]	U _{OUT} [V]	I _{OUT} [A]	P _{IN} [W]	P _{OUT} [W]	η [%]
0,37	16,54	0,20	4,44	3,31	74,5
0,68	16,58	0,38	8,16	6,30	77,2
0,95	16,53	0,58	11,40	9,59	84,1
1,20	16,65	0,79	14,40	13,15	91,3
1,47	16,55	0,99	17,64	16,38	92,9
1,74	16,61	1,18	20,88	19,60	93,9
2,02	16,52	1,38	24,24	22,80	94,0
2,34	16,58	1,60	28,08	26,53	94,5
2,56	16,51	1,77	30,72	29,22	95,1
2,88	16,43	2,00	34,56	32,86	95,1
3,16	16,49	2,20	37,92	36,28	95,7
3,39	16,41	2,37	40,68	38,89	95,6
3,77	16,59	2,60	45,24	43,13	95,3
3,98	16,40	2,78	47,76	45,59	95,5
4,34	16,56	3,00	52,08	49,68	95,4
4,65	16,62	3,20	55,80	53,18	95,3
4,93	16,54	3,40	59,16	56,24	95,1
5,00	16,47	3,46	60,00	56,99	95,0

U _{IN} = 14 V					
I _{IN} [A]	U _{OUT} [V]	I _{OUT} [A]	P _{IN} [W]	P _{OUT} [W]	η [%]
0,32	16,60	0,20	4,48	3,32	74,1
0,57	16,52	0,40	7,98	6,61	82,8
0,80	16,44	0,60	11,20	9,86	88,1
1,04	16,56	0,79	14,56	13,08	89,9
1,26	16,50	0,99	17,64	16,34	92,6
1,49	16,44	1,18	20,86	19,40	93,0
1,74	16,50	1,38	24,36	22,77	93,5
2,02	16,44	1,61	28,28	26,47	93,6
2,24	16,60	1,78	31,36	29,55	94,2
2,44	16,44	1,97	34,16	32,39	94,8
2,76	16,62	2,20	38,64	36,56	94,6
3,01	16,60	2,40	42,14	39,84	94,5
3,20	16,60	2,56	44,80	42,50	94,9
3,48	16,54	2,79	48,72	46,15	94,7
3,73	16,60	3,00	52,22	49,80	95,4
3,95	16,54	3,18	55,30	52,60	95,1
4,17	16,47	3,39	58,38	55,83	95,6
4,46	16,54	3,61	62,44	59,71	95,6
4,67	16,49	3,80	65,38	62,66	95,8
4,90	16,42	4,00	68,60	65,68	95,7
4,99	16,40	4,07	69,86	66,75	95,5

U _{in} = 16 V					
I _{IN} [A]	U _{OUT} [V]	I _{OUT} [A]	P _{IN} [W]	P _{OUT} [W]	η [%]
0,28	16,44	0,20	4,48	3,29	73,4
0,50	16,56	0,40	8,00	6,62	82,8
0,71	16,50	0,60	11,36	9,90	87,1
0,91	16,37	0,80	14,56	13,10	89,9
1,12	16,47	1,00	17,92	16,47	91,9
1,32	16,52	1,18	21,12	19,49	92,3
1,53	16,47	1,38	24,48	22,73	92,8
1,74	16,42	1,58	27,84	25,94	93,2
1,94	16,37	1,77	31,04	28,97	93,3
2,19	16,42	2,00	35,04	32,84	93,7
2,40	16,38	2,20	38,40	36,04	93,8
2,60	16,61	2,37	41,60	39,37	94,6
2,79	16,38	2,58	44,64	42,26	94,7
3,06	16,50	2,80	48,96	46,20	94,4
3,23	16,45	2,98	51,68	49,02	94,9
3,47	16,53	3,19	55,52	52,73	95,0
3,68	16,58	3,39	58,88	56,21	95,5
3,86	16,50	3,58	61,76	59,07	95,6
4,09	16,49	3,78	65,44	62,33	95,3
4,35	16,44	4,04	69,60	66,42	95,4
4,53	16,57	4,20	72,48	69,59	96,0
4,70	16,55	4,38	75,20	72,49	96,4
4,91	16,51	4,58	78,56	75,62	96,3
5,00	16,49	4,65	80,00	76,68	95,8

Príloha F Elektronické prílohy

Štruktúra adresára elektronickej prílohy (v ZIP):

```
\.....Koreňový adresár (ZIP)
├── DPS\
│   ├── MPPT_solar_charger_v2.1_GerberGatema.zip.....Gerber GatemaPCB
│   ├── MPPT_solar_charger_v2.1_GerberJLCPCB.zip.....Gerber JLCPCB
│   ├── eagle_9.5.1\.....Zložka návrhu schematickeho zapojenia a DPS
│   └── export\.....Zložka exportovanej dokumentácie a 3D modelu
├── firmware\.....Knižnice, firmware a skompilovaný .hex
├── fotky\.....Zložka fotografií panelu a osadenej DPS
├── namerane_charakteristiky\
│   ├── export\.....Zložka exportovaných grafov z Matlabu
│   ├── matlab\.....Zložka skriptov do Matlabu
│   └── zdrojove_data\.....Zložka zdrojových dát do Matlabu
```