

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Měnič pro malou solární elektrárnu**

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**

Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2019/2020

**ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**  
(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Michal ŠVAJNER**  
Osobní číslo: **E17N0035P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektronika a aplikovaná informatika**  
Téma práce: **Měnič pro malou solární elektrárnu**  
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

**Zásady pro vypracování**

Cílem práce je vytvořit měnič pro nabíjení 12 V olověného akumulátoru (maximální nabíjecí proud 10 A), napájeného z fotovoltaického panelu v rozsahu vstupních napětí 14 až 50 V.

1. Prostudujte vhodnou literaturu a navrhnete koncepci zařízení.
2. Zvolte vhodný řídicí prvek a navrhnete zařízení.
3. Realizujte navržené zařízení včetně základních ochranných zařízení (nadproudové, podpětové, přepětové, tepelné).
4. Odměřte základní elektrické parametry regulátoru včetně EMC.
5. Proveďte zhodnocení dosažených výsledků a případně navrhnete další možnosti zlepšení.

Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**  
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

**Seznam doporučené literatury:**

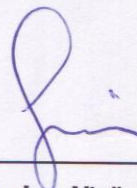
1. Khattak Muhammad Arshad: A Review & Analysis of Solar Mppt Algorithms & Hardware Architectures. LAP Lambert Academic Publishing, 2014. ISBN-13: 978-3659595059
2. Jitendra Prasad: Maximum Power Point tracker solar charge controller (MPPT): MPPT charge controller. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. ISBN-13: 978-3659185083

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Zdeněk Kubík, Ph.D.**  
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání diplomové práce: **4. října 2019**  
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2020**



**Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.**  
děkan



**Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 4. října 2019



## Abstrakt

Tato práce se zabývá kompletním návrhem měniče pro malou solární elektrárnu. Systém je navržený pro dobíjení 12 V olověného akumulátoru z fotovoltaického panelu v napěťovém rozsahu 14–50 V. Maximální nabíjecí proud akumulátorem je 10 A. Napětí z fotovoltaického panelu je transformováno snižujícím (step-down) měničem na hodnotu odpovídající potřebám akumulátoru. Celý systém je řízený mikrokontrolérem STM32F411 a systémové údaje (např. napětí na fotovoltaickém panelu, stav akumulátoru, aj.) jsou zobrazené na alfanumerickém LCD displeji. V teoretické části jsou popsány typy solárních panelů a regulátorů. Dále jsou popsány typy olověných akumulátorů, způsob jejich nabíjení a předpoklady pro zajištění dlouhé životnosti. Praktická část se zabývá samotnou konstrukcí zařízení včetně návrhu konstrukčního boxu. Práce obsahuje kompletní schémata s jejich vysvětlením. Dále obsahuje výpočty od návrhu snižujícího měniče až po výpočet ztrát výkonových polovodičů. Je uveden popis řídicího softwaru včetně vývojových diagramů. Sestavené zařízení bylo testováno při výstupním proudu 10 A po dobu přes 30 minut bez známek poškození či významného tepelného namáhání. Po krátkou dobu byl otestován spotřebič odebírající proud 14,7 A při  $U_{IN}=50,6$  V. Naměřená účinnost odpovídala 86,8 %. Bylo provedeno měření emisí. V práci jsou uvedené výsledky těchto měření a v závěru práce je zmínka o možnostech zlepšení se shrnutím všech dosažených výsledků.

## Klíčová slova

DC/DC měnič, step-down, snižující měnič, buck, LC filtr, solární regulátor, návrh tlumivky pro měnič step-down, návrh filtračního kapacitoru, ochrana proti přepólování, výpočet spínacích ztrát, fotovoltaický panel, olověný akumulátor, nabíjení olověného akumulátoru.

## Abstract

This thesis deals with the complete design of a converter for a small solar power plant. A system is designed for charging a 12 V lead-acid battery from a photovoltaic panel in the voltage range 14–50 V. The maximum charging current of the battery is 10 A. The voltage from the photovoltaic panel is transformed by a step-down converter to a value corresponding to the battery needs. Whole system is controlled by STM32F411 and system data (voltage of photovoltaic panel, battery status, etc.) are displayed on the alphanumeric LCD display. In the theoretical part of the thesis the types of photovoltaic panels and regulators are described. The types of lead acid batteries, the method of charging them and the for long live are also described. The practical part of the thesis deals with the design of device including mechanical parts. The work contains complete schematic diagrams with their explanation. It also contains all calculations of step-down converter, calculations of power losses etc. A description of software is also given. The system was tested at an output current 10 A for 30 minutes without signs of damage or significant thermal stress. For short time load draining 14,7 A at  $U_{IN}=50,6$  V was tested. The efficiency was 86,8 %. EMC tests were performed. The work presents the results of these measurements. The possibilities of improvements with a summary of all achieved results are mentioned in conclusion.

## Key words

DC/DC inverter, step-down, buck, LC filter, solar chargé controller, inductor calculation, polarity protection, lead-acid battery, charging of lead-acid batteries, calculation of a power losses,

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....  
podpis

## Obsah

<b>Seznam symbolů a zkratk</b> .....	<b>9</b>
<b>Úvod</b> .....	<b>10</b>
<b><i>Teoretická část</i></b> .....	<b>11</b>
<b>1 Typy fotovoltaických panelů</b> .....	<b>11</b>
1.1 Amorfnní (tenkovrstvý) .....	11
1.2 Monokrystalický .....	12
1.3 Polykrystalický .....	13
<b>2 Typy solárních regulátorů</b> .....	<b>15</b>
2.1 Solární regulátor se spínačem .....	15
2.2 Solární PWM regulátor .....	16
2.3 Solární MPPT regulátor .....	17
2.3.1 MPPT algoritmy .....	18
2.3.1.1 Konstantní napětí.....	19
2.3.1.2 Odchýlení a vyhodnocení.....	19
2.3.1.3 Přírůstková vodivost.....	20
<b>3 Olověné akumulátory</b> .....	<b>22</b>
3.1 Konstrukce olověných akumulátorů .....	22
3.2 Údržbové olověné akumulátory .....	23
3.3 Bezúdržbové olověné akumulátory .....	24
3.3.1 AGM VRLA akumulátory .....	24
3.3.2 Gelové VRLA akumulátory.....	25
3.4 Nabíjení olověných akumulátorů.....	26
3.4.1 Charakteristika U .....	26
3.4.2 Charakteristika I .....	27

3.4.3	Charakteristika W .....	27
3.4.4	Vícestupňová nabíjení .....	27
3.5	Sulfatace elektrod .....	28
<b>Praktická část.....</b>		<b>29</b>
<b>4</b>	<b>Návrh zařízení .....</b>	<b>29</b>
4.1	Popis zapojení .....	29
4.2	Popis obvodu LTC6102 .....	33
4.2.1	Výpočet rezistorů pro LTC6102.....	33
4.3	Popis obvodu INA190 .....	35
4.4	Popis mikrokontroléru STM32F411 .....	36
4.5	Návrh snižujícího měniče .....	38
4.5.1	Výpočet tlumivky .....	38
4.5.1.1	Volba jádra tlumivky.....	41
4.5.1.2	Výpočet počtu závitů a počtu vodičů .....	42
4.5.2	Výpočet výstupního filtračního kapacitoru .....	43
4.5.3	Výpočet vstupního filtračního kapacitoru .....	44
4.5.4	Výpočet diody .....	45
4.6	Volba a výpočet ztrát tranzistorů .....	45
<b>5</b>	<b>Řídicí program systému.....</b>	<b>47</b>
5.1	Popis řídicího softwaru .....	47
5.2	Alfanumerický LDC displej s řadičem HD44780 .....	50
<b>6</b>	<b>Mechanická konstrukce.....</b>	<b>52</b>
<b>7</b>	<b>Oživení systému .....</b>	<b>54</b>
<b>8</b>	<b>Měření systému.....</b>	<b>55</b>
8.1	Účinnost systému .....	55
8.2	Stabilita výstupního napětí.....	58
8.3	Měření emisí .....	59



<b>9</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>66</b>
<b>10</b>	<b>Zdroje.....</b>	<b>68</b>
	<b>Příloha A.....</b>	<b>71</b>
	<b>Příloha B.....</b>	<b>72</b>
	<b>Příloha C.....</b>	<b>73</b>

## Seznam symbolů a zkratek

ADC.....	Analogově digitální převodník
AGND.....	označení zemního potenciálu pro analogovou část
C [F].....	kapacita kapacitoru
D .....	drain tranzistoru
DPS .....	deska plošného spoje
ESR [ $\Omega$ ] .....	ekvivalentní sériový odpor kapacitoru
G .....	gate tranzistoru
GND .....	označení pro zemní potenciál
HW .....	hardware
J [ $A/mm^2$ ] .....	proudová hustota
L [H] .....	indukčnost
LED .....	svítivá dioda
$P_D$ [W].....	ztrátový výkon
PWM.....	pulsně šířková modulace
Q [C].....	elektrický náboj
R [ $\Omega$ ].....	elektrický odpor
RC.....	RC článek (odpor + kapacitor)
S .....	source tranzistoru
S [ $mm^2$ ].....	průřez
SW .....	software
T [s] .....	doba periody
$t_{off}$ [s].....	doba vypnutí
$t_{on}$ [s] .....	doba zapnutí

## Úvod

Solární regulátor dobíjení je nedílnou součástí fotovoltaického systému. Zapojuje se mezi fotovoltaický panel a akumulátor. Jeho funkcí je transformovat a distribuovat energii z fotovoltaického panelu a poté ji dodávat do spotřebiče a akumulátoru. Spotřebičem je míněno jakékoliv zařízení schopné pracovat při napájecím napětí poskytované akumulátorem. Při nedostatku slunečního záření regulátor poskytuje energii potřebnou pro spotřebič z akumulátoru. Regulátor má za úkol optimálně dobíjet akumulátor, po dobití ho dále nepřebíjet a zabránit jeho hlubokému vybíjení.

Cílem práce je zhotovit regulátor dobíjení pro malou fotovoltaickou elektrárnu. Napěťový rozsah připojeného fotovoltaického panelu se pohybuje v rozmezí 14–50 V. Pro dosažení vysoké účinnosti je zvolena MPPT topologie. O řízení systému se stará mikrokontrolér STM32F411. Maximální proudové zatížení výstupu je stanoveno na 45 A.

# Teoretická část

## 1 Typy fotovoltaických panelů

V této kapitole jsou popsány 3 typy komerčně dostupných fotovoltaických panelů. V závěru se uvádí mapy zprůměrovaných energií ze slunečního záření v letech 1994–2016 a další typy panelů, které jsou ve vývoji nebo nejsou na trhu běžně dostupné. Některé z nich se využívají například v NASA nebo slouží pro vojenské aplikace.

### 1.1 Amorfni (tenkovrstvý)

Amorfni panel se vyrábí napařováním tenké amorfni křemíkové vrstvy při teplotách okolo 200 °C. Jako podkladový materiál se používá sklo, plast nebo kov. Amorfni panely mají oproti krystalickým zhruba poloviční účinnost (9–13 %) a je tedy nutné počítat s dvojnásobnou zástavbou při zachování stejného výkonu. Amorfni panely trpí méně na ztrátu výkonu při přehřívání v letních měsících ( $P_{\max}$  okolo -0,37 %/K), jako je tomu u krystalických panelů ( $P_{\max}$  okolo -0,45 %/K). Dokáží také lépe zpracovávat rozptýlené světlo, a i při nízké intenzitě mají dobrou účinnost. Díky této vlastnosti se hodí na střechy, které jsou orientovány spíše k východu nebo západu [2], [3].



Obr.č.1: Amorfni (tenkovrstvý) fotovoltaický panel, převzato z [5]

## 1.2 Monokrystalický

Monokrystalické panely jsou výrobně nejnáročnější. Vyrábí se tažením krystalu za tepla, tím vznikne jednolitý a velice čistý ingot. Tento kulatý ingot se následně řeže na wafery o obvyklé velikosti 156x156 mm nebo 125x125 mm. V porovnání s polykrystalickými panely, monokrystalické panely mají v dnešní době téměř srovnatelnou účinnost (15–20 %) i cenu. Mají nepatrně vyšší účinnost na přímém světle a nepatrně pomaleji stárnou. Maximální výkon panelů tedy s časem klesá pomaleji. Díky vyšší účinnosti na přímém světle jsou vhodnější ve více slunečných oblastech [2], [3].



Obr.č.2: Monokrystalický fotovoltaický panel, převzato z [5]

### 1.3 Polykrystalický

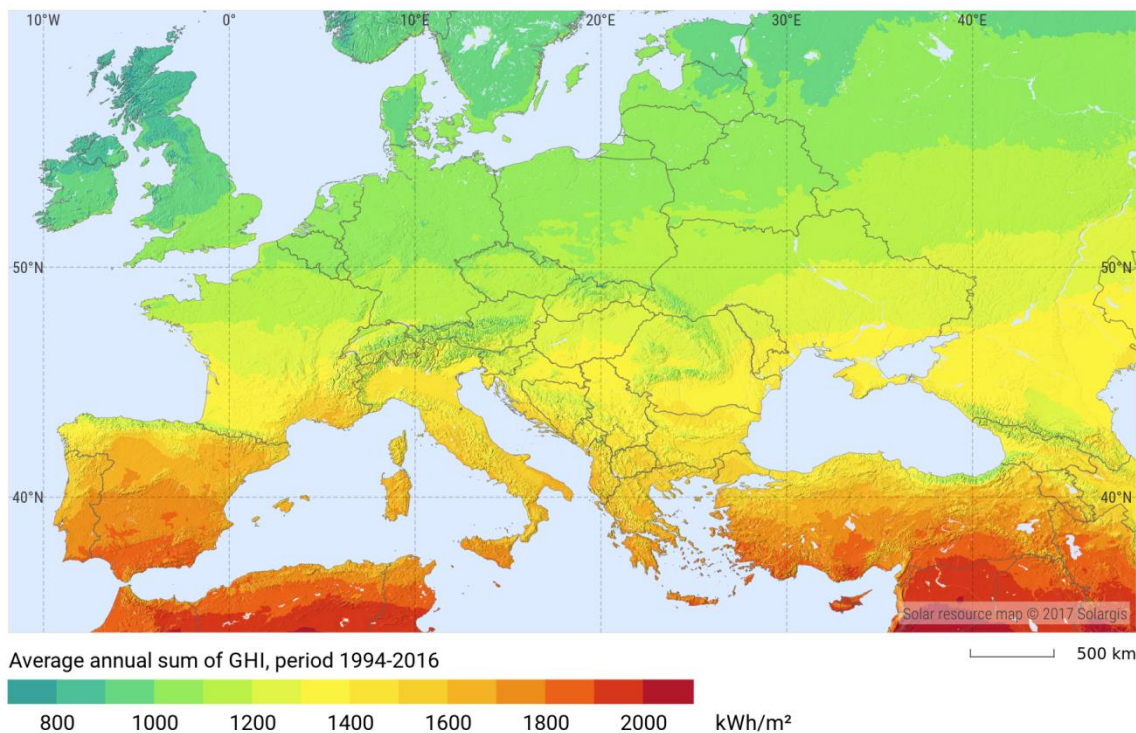
Polykrystalické panely jsou výrobně méně náročné, proto jsou i cenově výhodnější. Při výrobě se roztaví křemík, který se pod tlakem slisuje do jednoho celku. Krystaly křemíku tedy mají rozdílnou polohu. Wafery mají obvykle velikost 156x156 mm. Oproti monokrystalickým umí polykrystalické panely lépe zpracovávat rozptýlené světlo. Díky vyšší účinnosti při rozptýleném světle jsou vhodnější v oblastech, kde je méně slunečno. Dnes jsou však mezi polykrystalickými a monokrystalickými panely jen malé rozdíly [2], [3].



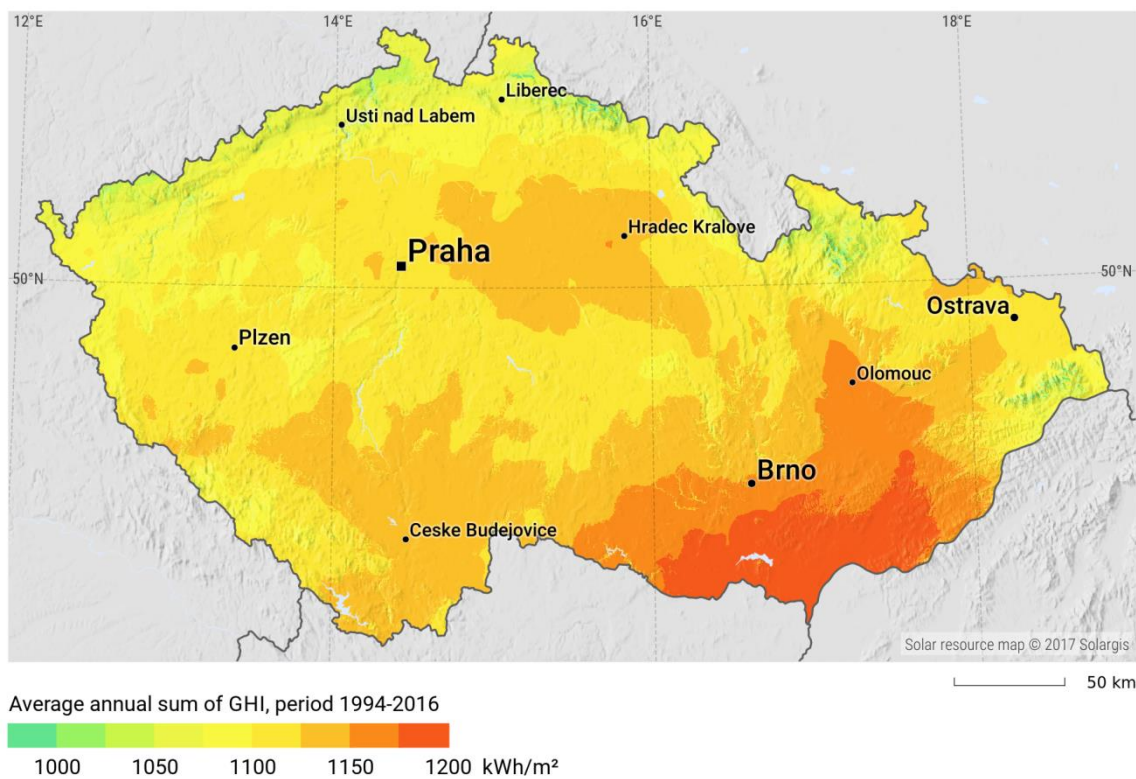
Obr.č.3: Polykrystalický fotovoltaický panel, převzato z [5]

Jedná se pouze o výčet typů, které lze zakoupit. Všechny typy jsou založené na křemíku. Experimentuje se i s fotovoltaickými články založenými na jiných prvcích. Například s více-přechodovými články s extrémně tenkými polovodičovými vrstvami. U těchto článků je sluneční světlo zpracováváno ve více vrstvách, viditelné světlo v horní vrstvě galium-indium-fosfidem (GaInP), infračervená část galium-arsenidem (GaAs) a delší vlnové délky ve spodní křemíkové vrstvě. Díky tomu dokáží tyto fotovoltaické články přeměnit na energii širší rozsah vlnových délek. Z tohoto důvodu jejich účinnost dosahuje cca 31 %. Experimentuje se samozřejmě i s jinými prvky. Výzkum se v dnešní době orientuje na organické fotovoltaické panely na bázi uhlíku, které by byly levné na produkci. Zatím ale nedosahují přijatelných účinností [4].





Obr.č.4: Mapa zprůměrované energie ze slunečního záření v Evropě od roku 1994–2016, převzato z [1]



Obr.č.5: Mapa zprůměrované energie slunečního záření v České republice od roku 1994–2016 převzato z [1]

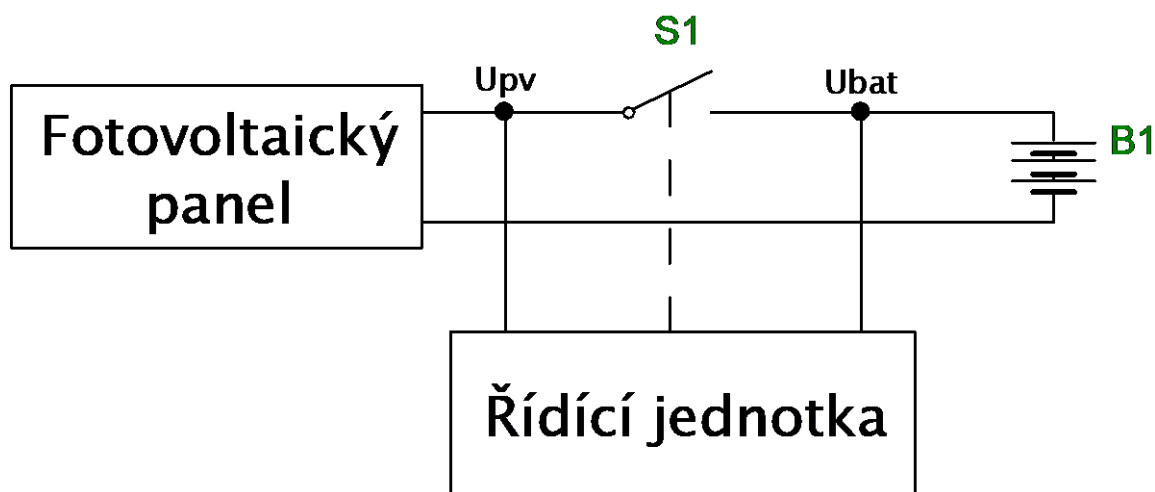
## 2 Typy solárních regulátorů

V praxi se lze setkat se třemi typy solárních regulátorů: regulátor se spínačem, PWM a MPPT regulátor. Dnes jsou na trhu dostupné regulátory PWM a MPPT. V následující kapitole jsou popsány principy, výhody a nevýhody těchto regulátorů.

### 2.1 Solární regulátor se spínačem

Solární regulátor se spínačem se řadí mezi nejjednodušší a zároveň nejstarší typ. Jedná se o systém, který pomocí spínače připojuje akumulátor přímo k fotovoltaickému panelu a odpojuje jej v momentě, kdy je na akumulátoru dostatečné napětí. Jako spínač bylo obvykle použito relé, nyní je výhodnější použít MOSFET tranzistor.

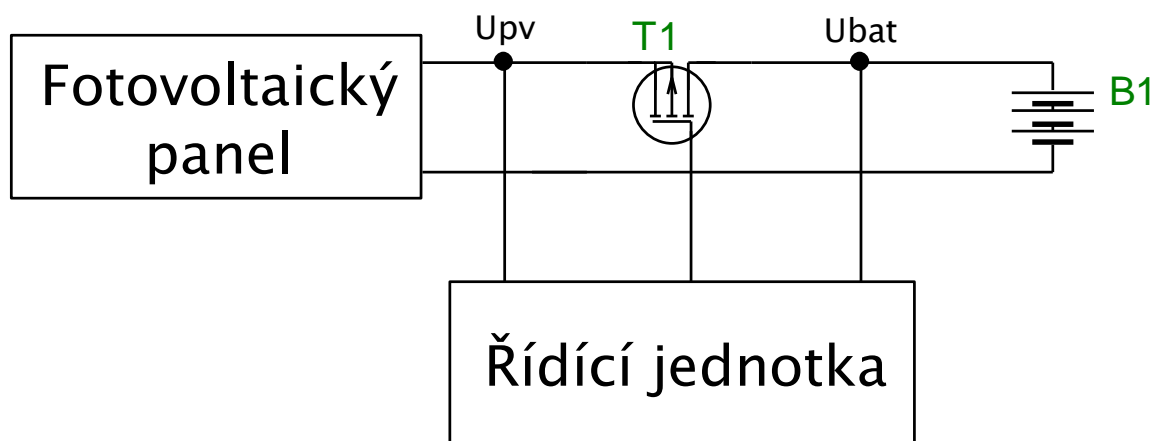
Nevýhodou tohoto systému je nemožnost regulace dobíjecího proudu, což zkracuje životnost akumulátoru. To platí zejména v případě, kdy je k akumulátoru připojen fotovoltaický panel, schopný dodat vyšší proud, než je maximální povolený proud akumulátoru. Při detekci nabitého akumulátoru je akumulátor odpojen od fotovoltaického panelu. Opětovné připojení je provedeno po snížení napětí akumulátoru pod stanovenou mez. Při návrhu je nutné počítat s hysterezí, aby nedošlo k rozkmitání spínače S1.



Obr.č.6: Principiální schéma solárního regulátoru s jedním spínačem

## 2.2 Solární PWM regulátor

Jedná se o modernější, komerčně dostupný regulátor dobíjení. Pomocí PWM regulace je možné plynule regulovat dobíjecí proud akumulátoru od nuly do maxima. To umožňuje optimálně dobíjet akumulátor různými režimy popsány v kapitole 22, a tím prodlužovat jeho životnost. Oba zmíněné typy regulátorů trpí nízkou účinností, která roste s pracovním napětím fotovoltaického panelu.



Obr.č.7: Principiální schéma solárního PWM regulátoru

Na trhu se objevují výhradně fotovoltaické panely o 36, 60 nebo 72 článcích. V modelovém příkladu jsou uvedeni dva zástupci o výkonu 100 W s 36 a 60 články. Hodnoty napětí  $U_{mpp}$  a proudu  $I_{mpp}$  jsou v maximálním zatěžovacím bodě, kdy panel dodává maximální možný výkon. Při nabíjení 12 V akumulátoru prostřednictvím výše zmíněných regulátorů nedochází k transformaci napětí a proudů ale pouze k jejich snížení.

Předpokládejme, že je k dispozici:

Fotovoltaický panel o 36 článcích, 100 W –  $U_{mpp}=19$  V,  $I_{mpp}=5,26$  A.

Fotovoltaický panel o 60 článcích, 100 W –  $U_{mpp}=30$  V,  $I_{mpp}=3,33$  A.

Při použití panelu o 36 článcích je výsledný nabíjecí výkon při vybitém a nabitém akumulátoru:

Pro  $U_{BAT} = 11$  V:  $P = U \cdot I = 11 \cdot 5,26 = 57,86$  W tj účinnost 57,86 %.

Pro  $U_{BAT} = 14$  V:  $P = U \cdot I = 14 \cdot 5,26 = 73,64$  W tj účinnost 73,64 %.

Při předpokladu použití panelu o 60 článkách bude výsledný nabíjecí výkon při vybitém a nabitém akumulátoru:

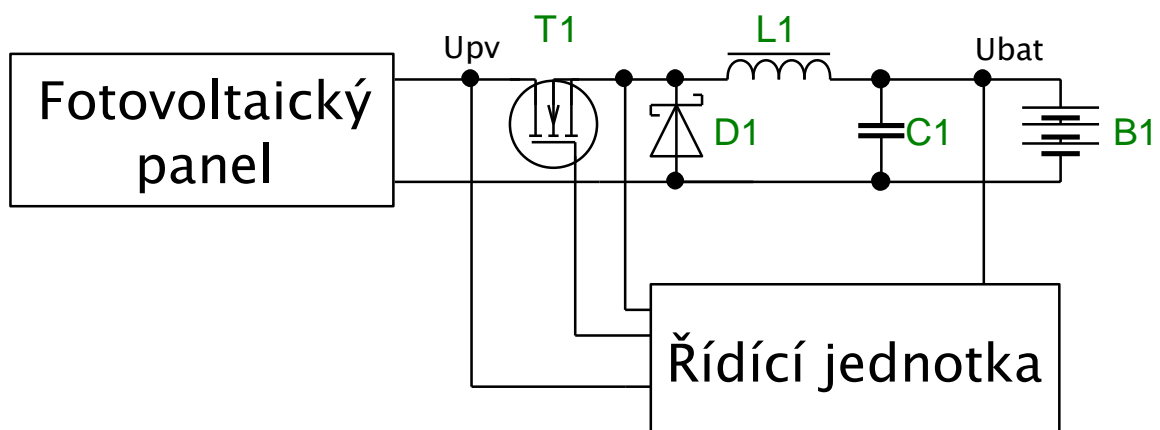
$$\text{Pro } U_{BAT} = 11 \text{ V: } P = U \cdot I = 12 \cdot 3,33 = 36,63 \text{ W tj účinnost } 36,63 \text{ \%}.$$

$$\text{Pro } U_{BAT} = 14 \text{ V: } P = U \cdot I = 12 \cdot 3,33 = 46,62 \text{ W tj účinnost } 46,62 \text{ \%}.$$

Jedná se o orientační výpočty pro ilustraci problému. Dosazené hodnoty je nutné přizpůsobit použitému fotovoltaickému panelu a akumulátoru. Z výsledků ale plyne, že pro zachování co nejvyšší účinnosti je nutné, aby fotovoltaický panel měl pracovní napětí jen o málo vyšší nebo stejné, než je napětí plně nabitého akumulátoru [6].

### 2.3 Solární MPPT regulátor

Mezi nejsložitější, nejdražší ale také nejlepší regulátory patří MPPT. Napětí z fotovoltaického panelu je pomocí měniče transformováno na napětí určené řídicí jednotkou jako optimální pro dobíjení či udržování nabitého akumulátoru. Měnič napětí zajišťuje i při použití 60 nebo 72 článkového panelu pro 12 V systém vysokou účinnost, protože při snížení výstupního napětí zvýší výstupní proud o tentýž poměr. Volba použitého měniče závisí na konkrétní aplikaci. V této práci je zvolen snižující měnič bez galvanického oddělení (step-down). Při provozu regulátoru vznikají ztráty na polovodičích a tlumivce/transformátoru, avšak dnes u nejlepších regulátorů může dosahovat účinnost až 90 %.



Obr.č.8: Principiální schéma solárního MPPT regulátoru se snižujícím měničem

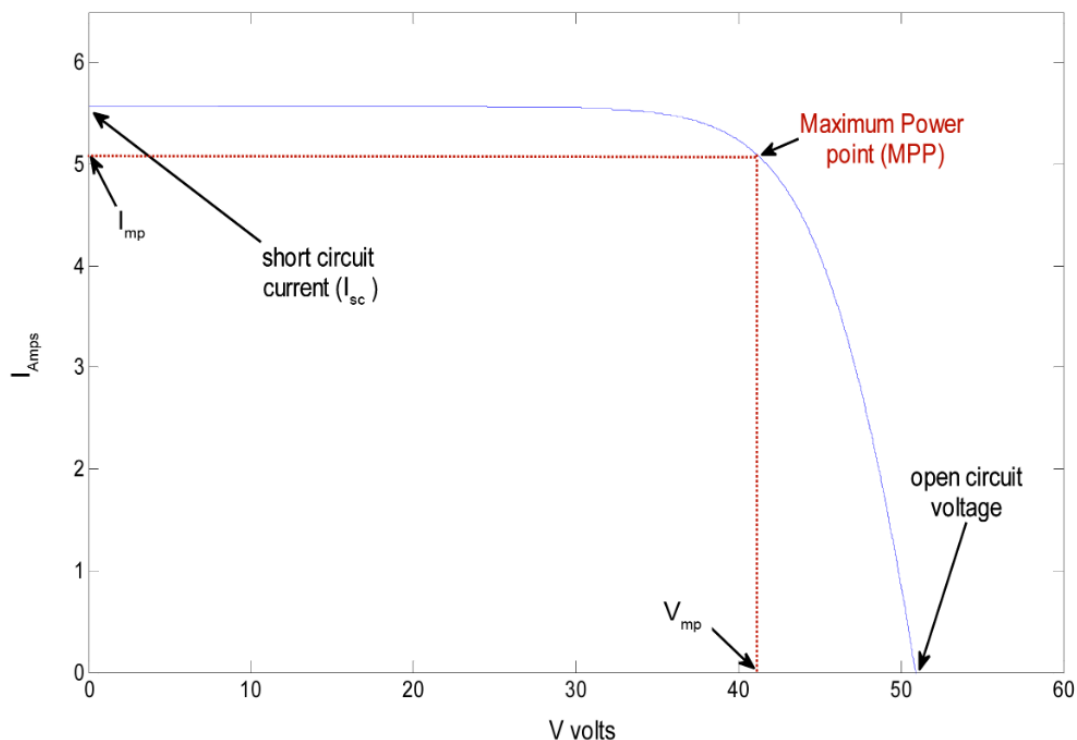
Výběr vhodného typu regulátoru závisí na aplikaci. Při použití 36 článkového panelu pro 12 V soustavu nebo 72 článkového panelu pro 24 V soustavu může být PWM regulátor volbou, pokud se uvažuje o malém výkonu, zhruba do 150 W. Oproti MPPT má PWM zhruba o 25 % nižší účinnost.

Při použití 60 nebo 72 článkového fotovoltaického panelu pro 12 V systém nelze PWM regulátor doporučit. Účinnost by byla velmi nízká, a navíc jsou těžko k dostání. V těchto případech je nutnost použít MPPT regulátor. K MPPT regulátoru lze připojit jakýkoliv panel či panely řadit sériově pokud výsledný součet napětí nepřekročí maximální vstupní napětí. Je tedy zde možnost postupně rozšiřovat systém o další fotovoltaické panely.

Cena PWM regulátoru o nabíjecím výkonu 20 A od výrobce SRNE se k roku 2020 pohybuje okolo 700 Kč. Cena MPPT regulátoru shodného výrobce a parametrů se pohybuje okolo 2200 Kč. Je tedy nutné zvážit, zda se vyplatí investovat do dražšího regulátoru [6].

### 2.3.1 MPPT algoritmy

MPPT algoritmy (Maximal Power Point Tracking) zvyšují účinnost přeměny elektrické energie z fotovoltaického panelu. Fotovoltaické panely mají nelineární VA charakteristiku a jejich výkon se mění v závislosti na teplotě a osvětlení. Cílem MPPT algoritmu je nalézt takové pracovní napětí fotovoltaického panelu, aby byl jeho dodávaný výkon co nejvyšší [29], [30].



Obr.č.9: Charakteristika fotovoltaického panelu s MPP body, převzato z [30]

### 2.3.1.1 Konstantní napětí

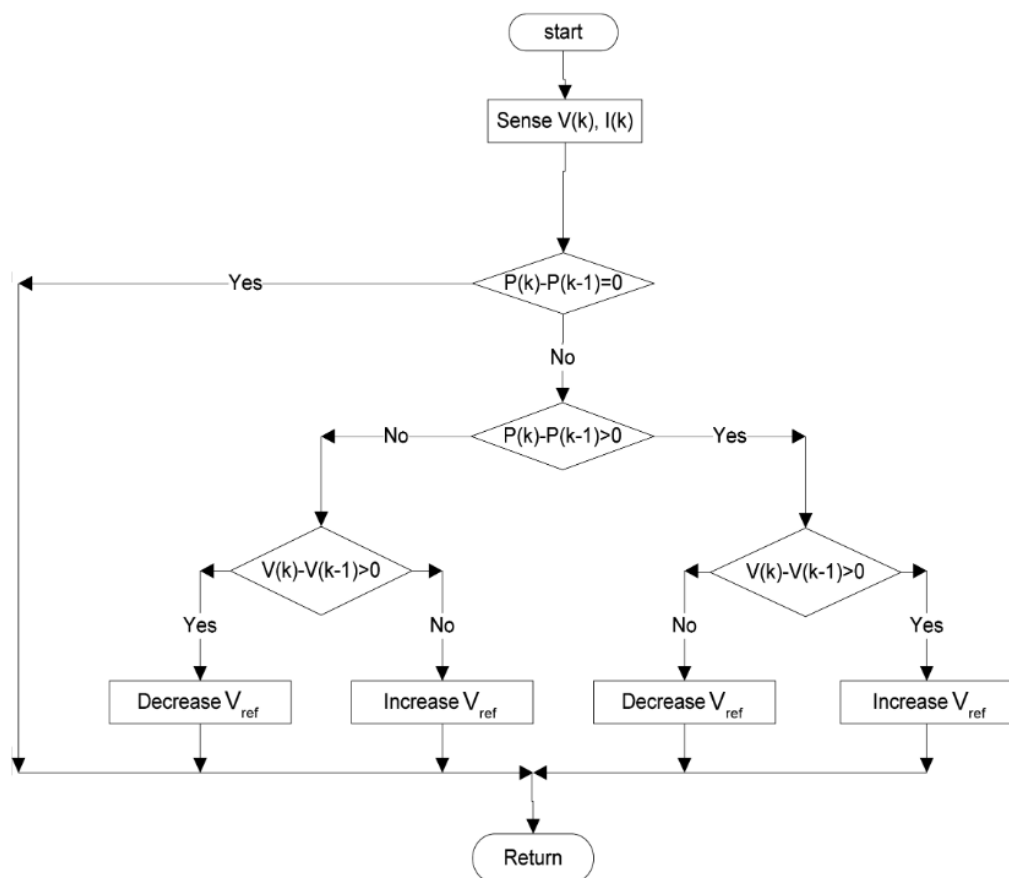
Jedná se o nejjednodušší algoritmus. Jeho úkolem je udržování takové střídy na spínacím tranzistoru, aby napětí na fotovoltaickém panelu odpovídalo bodu  $U_{MPP}$ . Pro dosažení tohoto bodu postačí PI regulátor a je zapotřebí měřit napětí na fotovoltaickém panelu. Algoritmus zanedbává změnu  $U_{MPP}$  v závislosti na teplotě a intenzitě slunečního záření. Díky tomu systém využívající tohoto algoritmu nedosáhne nikdy přesně maximálního bodu výkonu. Avšak při nízkých hodnotách slunečního záření je tento algoritmus efektivnější, než algoritmus odchýlení a vyhodnocení nebo algoritmus přírůstkové vodivosti [29], [30].

### 2.3.1.2 Odchýlení a vyhodnocení

Princip algoritmu je patrný z vývojového diagramu na Obr.č.10. Algoritmus periodicky vychyluje napětí na fotovoltaickém panelu o stanovenou hodnotu pomocí změny střídy spínání tranzistoru. Poté vyhodnotí odchylku, podle které rozhodne, zda



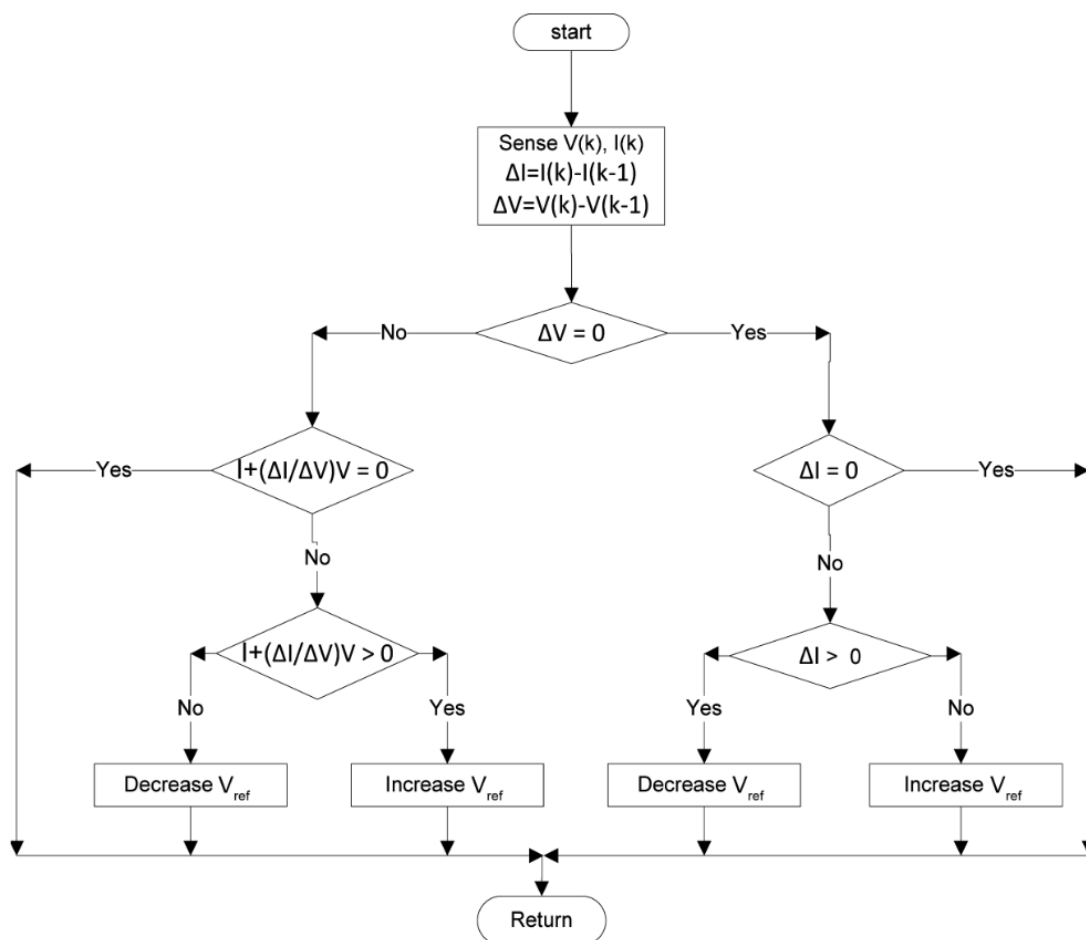
vychýlení bude v kladném či záporném směru. Po dosažení bodu  $U_{MPP}$  bude výkon fotovoltaického panelu periodicky kolísat okolo  $U_{MPP}$ . Algoritmus vyžaduje měření napětí fotovoltaického panelu i měření proudu fotovoltaickým panelem [29], [30].



Obr.č.10: Vývojový diagram metody odchýlení a vyhodnocení, převzato z [30]

### 2.3.1.3 Přírůstková vodivost

Tento algoritmus se pokouší překonat nevýhody předchozího. Algoritmus hledá pracovní napětí fotovoltaického panelu, ve kterém je vodivost rovna přírůstkové vodivosti. Při nalezení  $U_{MPP}$  jej dále přestane vychylovat. Výhodou algoritmu je přesnější sledování  $U_{MPP}$ . Algoritmus také vykazuje menší oscilace oproti algoritmu odchýlení a vyhodnocení. Nicméně při nízkých úrovních slunečního záření může být algoritmus nestabilní z důvodu šumu při měření napětí a proudu fotovoltaickým panelem [29], [30].



Obr. č. 11: Vývojový diagram metody přírůstkové vodivosti, převzato z [30]

Jedná se o stručný výčet třech používaných algoritmů pro dosažení  $U_{MPP}$  fotovoltaického panelu. Mezi stále populárnější metodou k dosažení  $U_{MPP}$  je řízení pomocí fuzzy logiky. Výhodou je, že není potřeba přesný matematický model systému a fuzzy logika zvládá i nelineární systémy. Účinnost však závisí na vhodném sestavení tabulky pravidel. Atraktivní alternativa spočívá ve využití neuronové sítě, skládající se ze vstupní, skryté a výstupní vrstvy. Do vstupní vrstvy vstupuje informace o napětí a proudu fotovoltaickým panelem. Z výstupní vrstvy vystupuje informace například o střídě spínání tranzistoru. Skrytá vrstva má za úkol dosáhnout  $U_{MPP}$ . Účinnost je pak dána tím, jak moc byla neuronová síť trénována [29], [30].

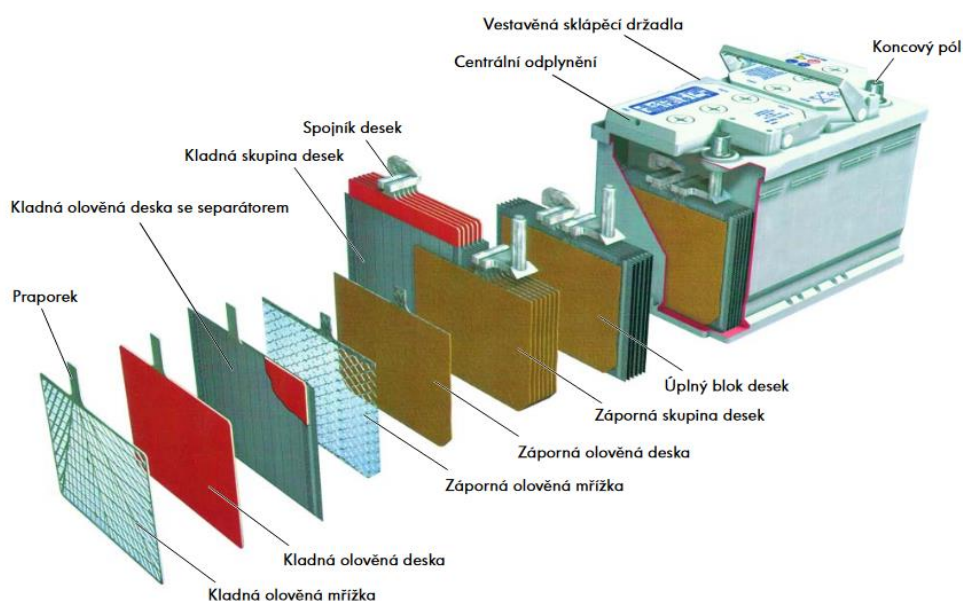
### 3 Olověné akumulátory

Olověné akumulátory patří k nejpobulárnějším. Mají dobrý výkon, přijatelnou cenu a spolehlivost danou léty prověřenou technologií výroby. Díky těmto výhodným parametrům je olověný akumulátor použit i v této práci. Tato kapitola popisuje typy a principy těchto akumulátorů se způsoby jejich nabíjení [8].

#### 3.1 Konstrukce olověných akumulátorů

Konstrukce všech olověných akumulátorů je podobná. 12 V akumulátor se skládá ze šestice článků o jmenovitém napětí 2 V. Každý z článků je uložen v bloku a tvoří ho několik desek kladných a záporných elektrod. Desky kladných ( $\text{PbO}_2$ ) a záporných (Pb) elektrod jsou od sebe odděleny separátory, které jsou pro elektrolyt propustné. Celek je ponořený do elektrolytu ze zředěné kyseliny sírové ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) s vodou ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Koncentrace kyseliny sírové je přibližně 35 % u plně nabitého akumulátoru.

Vybíjením koncentrace kyseliny sírové v elektrolytu klesá a narůstá koncentrace vody. Z aktivních hmot obou elektrod se tvoří síran olovnatý ( $\text{PbSO}_4$ ). Při nabíjení je proces opačný. Síran olovnatý se mění na aktivní hmoty a do elektrolytu se vylučuje kyselina sírová. Olověné akumulátory lze rozdělit na 2 základní typy, a to na údržbové a bezúdržbové, výhradně koncepce VRLA [7], [8], [10].



Obr.č.12: Popis konstrukce akumulátoru, převzato z [11]

### 3.2 Údržbové olověné akumulátory

Tento typ akumulátorů má zaplavené elektrody v rozředěné kyselině sírové. Údržba spočívá v kontrolování hladiny elektrolytu, která klesá vlivem elektrolyzy při nabíjení a přirozeným odparem. Pro doplňování se používá výhradně destilovaná voda, která se v případě potřeby doplňuje pomocí nápadných šroubovacích zátek. Čistota vody je podmínkou pro dostatečnou životnost akumulátoru. Voda z vodovodu obsahuje celou řadu jiných prvků (jako jsou například různé minerály, soli, aj.), které by vedly k jeho rychlému zničení. Dnešní akumulátory mají díky své konstrukci nižší ztráty vody a kontrola je vhodná zhruba jednou za 3–12 měsíců v závislosti na typu a provozním režimu akumulátoru.

Na trhu se vyskytují i akumulátory se zaplavenými elektrodami v bezúdržbové variantě. Obě elektrody akumulátoru jsou legovány vápníkem. Výhodou je jejich nižší samovybíjení (cca 0,3 % za den) a až o 80 % nižší odpar vody. Většinou vodu ani není třeba doplňovat po dobu životnosti garantované výrobcem. Ale závisí samozřejmě na provozním režimu akumulátoru. Zátky pro dolévání vody jsou často kryty víkem. Víko či zátky obsahují kanálky pro omezení úniku elektrolytu při náklonu nebo převržení a slouží také pro odvětrávání nahromaděných plynů. Různí výrobci legují i jinými prvky (například stříbrem či selenem) pro dosažení odlišných parametrů. Některé akumulátory obsahují hustoměr pro určení hustoty, a tedy i stavu elektrolytu [7], [8].



Obr.č.13: Bezúdržbový akumulátor se zaplavenými elektrodami VARTA BLUE Dynamic, 12 V, 40 Ah, převzato z [12]

### 3.3 Bezúdržbové olověné akumulátory

Bezúdržbové akumulátory se dnes vyskytují výhradně ve variantě VRLA (Valve Regulated Lead Acid). Jsou vybaveny ventilem pro regulaci pracovního tlaku akumulátoru, který se při přetlaku otevře. Pro snížení odparu vody jsou elektrody bezúdržbových akumulátorů dotované vápníkem, který zároveň snižuje plynování vznikající při nabíjení/přebíjení. Bezúdržbové akumulátory pracují na principu kyslíkové rekombinace. Při nabíjení se skrze póry separátoru dostává kyslík k záporné elektrodě, a tím dochází k rekombinaci na vodu. S vývojem kyslíku probíhá i vývoj vodíku, který se po čase uvolní pomocí přetlakového ventilu spolu s vodní párou. Bezúdržbové akumulátory jsou díky konstrukci odolné vůči otřesům a překlopení [7], [8].

#### 3.3.1 AGM VRLA akumulátory

Elektrolyt AGM (Absorbed Glass Mat) akumulátorů je vázán v separátoru ze skelných vláken dotovaných borem. Separátor těsně přiléhá na elektrody akumulátoru. Přítlakem omezuje vypadávání aktivních hmot, a tím zvyšuje životnost akumulátoru. Dále konstrukce zamezuje vrstvení hladin kyseliny s různou hustotou, jehož následkem je shromažďování elektrolytu s vyšší hustotou ve spodních vrstvách (stratifikace). Stratifikace napomáhá sulfataci elektrod, a tím dochází ke snižování životnosti [7], [10].



Obr.č.14: AGM VRLA akumulátor CSB GP12170, 12 V, 17 Ah, převzato z [12]

### 3.3.2 Gelové VRLA akumulátory

Gelový akumulátor se podobá akumulátoru se zaplavenými elektrodami, avšak rozdíl je v použitém elektrolytu. Kyselina sírová je zde smíchána se silikagelem, a tím je dosažena konzistence gelu. Výhodou oproti AGM technologii je lepší přenos tepla do okolí, protože separátor nasáklý gelem lépe vede teplo než separátor AGM akumulátorů. Díky gelovému elektrolytu se prakticky odstranil problém stratifikace. Gelové akumulátory také lépe snášejí hluboké vybití [7], [10].



Obr.č.15: Gelový VRLA akumulátor XTREME 12 V, 20 Ah, převzato z [13]

I u bezúdržbových akumulátorů se však nelze vyhnout údržby ve formě kontroly svorek, protože jejich oxidací se omezují nabíjecí či vybíjecí proudy.

Akumulátory lze dále dělit podle způsobu využití:

Startovací – pro spalovací motory kdy při startování je vyžadován velký proud i za nízkých teplot a dále už je akumulátor dobíjen alternátorem.

Trakční – Jsou odolné vůči hlubokému vybití. Využívají se pro elektrický pohon dopravních prostředků a vyznačují se robustní konstrukcí.

Staniční – Používají se tam, kde je třeba dodávat po delší dobu menší množství elektrické energie jako například v záložních zdrojích energie nebo v malých fotovoltaických elektrárnách atd.



### 3.4 Nabíjení olověných akumulátorů

Nabíjení 12 V akumulátoru probíhá ve 3 pásmech. Při nabíjení do cca 13,2 V se vytváří v pórech olověných desek kyselina sírová. Hustota elektrolytu se zvyšuje na hodnotu cca 1,15 g/cm<sup>3</sup>. Při napětí v rozsahu cca 13,4–14,7 V se mění síran olovnatý na aktivní hmoty a současně se zvyšuje hustota elektrolytu na cca 1,25 g/cm<sup>3</sup>. Od cca 14,7 V se začíná se síranem olovnatým rozkládat i voda na kyslík a vodík. Při rozložení všeho síranu olovnatého je napětí na svorkách akumulátoru mezi 16,2–16,8 V a hustota elektrolytu cca 1,3 g/cm<sup>3</sup>. Od tohoto napětí všechnu další dodanou energii spotřebovává rozklad na kyslík a vodík.

Při vybíjení se rozkládá kyselina sírová. Vzniká voda a na povrchu elektrod se tvoří síran olovnatý. Hustota elektrolytu a napětí akumulátoru klesá. Při napětí 10,5 V je hustota elektrolytu okolo 0,95 g/cm<sup>3</sup> a akumulátor se považuje za vybitý. Vybíjení akumulátoru pod 10,5 V se považuje za hluboké a snižuje jeho životnost, neboť vede k sulfataci elektrod (viz. kapitola 3.5). Pro zajištění dlouhé životnosti akumulátoru nesmí také systém akumulátor přebíjet nebo naopak dobíjet nedostatečně. Existují 3 základní charakteristiky dobíjení. Pro zajištění dlouhé životnosti a rozumné doby nabíjení je ideální využít vícestupňové nabíjení, které spočívá v kombinaci dále uvedených charakteristik [7], [8], [9], [10].

#### 3.4.1 Charakteristika U

Charakteristika U, neboli dobíjení konstantním napětím. Napětí se volí okolo 14,4 V. Dobíjecí proud musí být omezen systémem na cca 50–100 % ze jmenovité kapacity akumulátoru, neboť by byl při zahájení nabíjení značně vysoký. Při nabíjení se zvyšuje napětí na svorkách akumulátoru a klesá nabíjecí proud. Konečný nabíjecí proud je rovný zhruba 0,2 % ze jmenovité kapacity akumulátoru. Doba nabití závisí na systémové proudové limitaci. Akumulátor je už během 2 hodin nabit na cca 80 %, neboť z počátku nabíjení protéká velký proud a dochází ke značnému vývinu tepla. Z toho důvodu je také doporučeno kontrolovat teplotu elektrolytu. Vzhledem k nízkému proudu v konečné fázi nabíjení lze akumulátor přebíjet i několik hodin [7], [10].

### 3.4.2 Charakteristika I

Jedná se o nabíjení konstantním proudem, jehož hodnota je cca 8–10 % ze jmenovité kapacity akumulátoru. Vybitý akumulátor je tímto způsobem nabit za cca 11–15 hodin. Dodaný náboj v závislosti na čase má lineární charakter. Systém musí nabíjení ukončit po dosažení plynovacího napětí, protože by se akumulátor značně přebíjel poměrně vysokým proudem v konečné fázi nabíjení [7], [10].

### 3.4.3 Charakteristika W

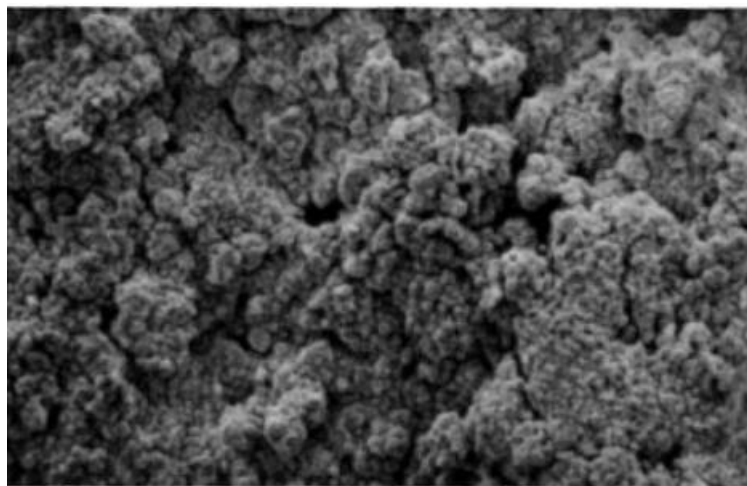
Jedná se o dobíjení se zvyšujícím se napětí v průběhu dobíjení. Při dobíjení se se zvyšujícím napětí akumulátoru zvyšuje i napětí nabíječe. Dobíjecí proud je tedy vysoký v celém průběhu nabíjení [7], [10].

### 3.4.4 Vícetupňová nabíjení

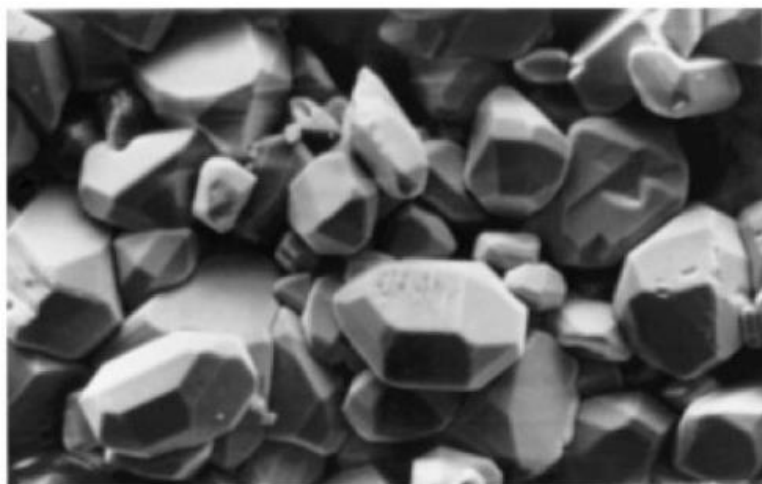
Řada nabíječek pracuje s vícetupňovým nabíjením spočívající v kombinaci výše uvedených charakteristik. Poměrně častá je charakteristika IU. Ze začátku je akumulátor dobíjen konstantním proudem a v konečné fázi dobíjení nabíječka přepne do režimu konstantního napětí. Dobrým řešením je začít nabíjení malým konstantním proudem o hodnotě cca 1 % ze jmenovité kapacity akumulátoru a tím ověřit, zda je připojený akumulátor v pořádku. Po překročení určitého prahového napětí se zvýší hodnota konstantního proudu na cca 8–10 % ze jmenovité kapacity akumulátoru a nabijí akumulátor do dosažení napětí cca 14,4 V. V ten moment přepne dobíječ do režimu konstantního napětí a dobije akumulátor na 100 %. V konečné fázi dobíječ přepne do udržovacího režimu a to tak, že sníží hodnotu napětí a akumulátor již pouze dobíjí proudem rovnajícím se samovolnému vybíjení [7], [10].

### 3.5 Sulfatace elektrod

Při vybíjení akumulátoru vzniká na jeho mřížkách síran olovnatý. Při nedostatečném nabíjení po určité době začíná síran olovnatý krystalizovat. Tyto krystaly již není snadné rozložit při nabití na aktivní složky Pb, SO<sub>4</sub> a snižují účinnou plochu elektrod. Síran olovnatý má větší objem než aktivní hmoty. To způsobuje mechanické namáhání vedoucí k postupnému oddělování a vypadávání aktivních hmot. Z tohoto důvodu je pro zachování dlouhé životnosti akumulátoru nutné, aby byl pravidelně a dostatečně dobíjen. Akumulátor nesmí být ponecháván dlouhý čas ve vybitém stavu a nesmí být vybíjen pod úroveň hlubokého vybití. Sulfataci napomáhá také nabíjení a vybíjení velkými proudy [7], [8].



Obr.č.16: Povrch desky akumulátoru bez sulfatace, převzato z [7]



Obr.č.17: Sulfatací pokrytý povrch desky, převzato z [7]

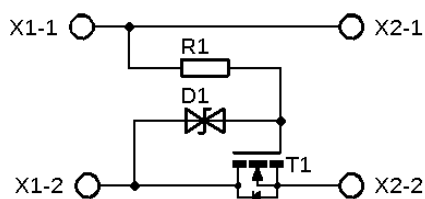
## Praktická část

### 4 Návrh zařízení

Tato kapitola je věnována popisu zapojení měniče pro malou solární elektrárnu (dále jen systému). Kompletní schémata zapojení jsou k dispozici v přílohách A, B a C. Část kapitoly se také věnuje stručným popisům zajímavých integrovaných obvodů použitých v této práci. Kapitola zahrnuje kompletní postup při jeho návrhu včetně výběru spínacích tranzistorů, výpočtů tlumivky, filtrační kapacity a jiných výpočtů nutných pro realizaci systému.

#### 4.1 Popis zapojení

Pro orientaci v této kapitole doporučuji využít přiložená kompletní schémata zapojení nebo příloh A, B a C, které jsou součástí této práce. Fotovoltaický panel je připojen prostřednictvím svorek X1-1 a X1-2 k systému (viz. Obr.č.18). Systém chrání proti přepólování fotovoltaického panelu tranzistor T1, který v případě přepólování nevede elektrický proud. Transil D1 a rezistor R1 chrání G tranzistoru proti průrazu z důvodu překročení 20 V mezi přechodem G-S. Systém umožňuje připojit fotovoltaický panel v napěťovém rozsahu 14–50 V. Po filtraci kapacitami C1–C5 se proud protékající fotovoltaickým panelem snímá pomocí paralelně zapojených rezistorů R2 a R3 o celkové hodnotě 5 mΩ. Integrovaný obvod IC1 popsáný v kapitole 4.3 snímá jejich napěťový úbytek. Operační zesilovač IC2B zapojený jako napěťový sledovač slouží k impedančnímu přizpůsobení výstupního signálu IC1 a jeho výstup je dále veden do mikrokontroléru. Napěťovým dělič z rezistorů R4 a R5 snímá napětí z fotovoltaického panelu. Operační zesilovač IC2A slouží k impedančnímu přizpůsobení signálu z výstupu děliče a jeho výstup je veden do mikrokontroléru.



Obr.č.18: Ochrana proti přepólování

Antisériové zapojení tranzistorů snižujícího měniče T4 a T5 slouží k zabránění průchodu proudu v situaci, kdy je napětí fotovoltaického panelu nižší než napětí na akumulátoru, například v noci. Oba tranzistory pracují ve spínacím režimu. Pro jejich plné otevření musí být napětí na přechodech D-S vyšší než 10 V. U snižujícího měniče je nutné použít plovoucí buzení, protože D tranzistorů nejsou na potenciálu GND. Dvojice DC-DC měničů DC2 a DC3 od firmy TRACO poskytuje galvanicky oddělených 12 V. Napájení měničů lze v případě nečinnosti snižujícího měniče vypnout tranzistorem T8 a tím zajistit menší odběr proudu z akumulátoru. Měniče slouží k napájení optočlenů IC3 a IC4 s výstupem pro buzení G tranzistoru. LED těchto optočlenů jsou skrze tranzistor T7 buzeny mikrokontrolérem. Dělič napětí složený z rezistorů R23 a R24 snímá výstupní napětí snižujícího měniče. O impedanční přizpůsobení se stará operační zesilovačem IC5 zapojený jako napěťový sledovač. Výstup IC5 je veden do mikrokontroléru a komparátoru IC6. Odporovým trimrem R25 se nastavuje referenční napětí komparátoru na takovou hodnotu, aby komparátor při překročení určité napěťové hranice překlopil svůj výstup do logické 1. Poté se pomocí tranzistoru T6 provede uzemnění RESET pinu mikrokontroléru a tím i jeho restart.

Výstupní napětí systému má rozsah cca 10,5–14,5 V. Napájecí napětí 12 V ventilátorů se pohybuje v rozsahu 11,8–13 V. Z tohoto důvodu je použit pomocný snižující měnič DC1 pracující od napětí 18–72 V s výstupním napětím 12 V pro napájení ventilátoru. Tranzistor T3 slouží k vypnutí pomocného měniče. Je použit MOSFET typu P ovládaný mikrokontrolérem prostřednictvím tranzistoru T2. Na první pin konektoru JP1 je přiveden PWM signál z mikrokontroléru pro řízení rychlosti otáček. Rychlost otáček ventilátoru se řídí střídou PWM signálu o frekvenci okolo 35 kHz. Minimální otáčky ventilátoru jsou definované jako 10 % maximálních, a to i při nulové střídě PWM signálu. Druhý pin slouží ke snímání otáček, které zatím nebylo programově implementováno. Třetí a čtvrtý pin slouží k napájení ventilátoru.

Napětí poskytované hlavním snižujícím měničem je vedené dvěma větvemi. V první větvi je napětí přivedeno na svorky pro připojení spotřebiče. Úbytek napětí na rezistorech R44, R45 a R46 o celkové hodnotě 1,67 mΩ vyvolaný průchodem proudu skrze spotřebič je měřený operačním zesilovačem pro měření proudu IC10, popsáný v kapitole 4.2. Výstup IC10 je napěťově limitován diodou D11 a impedančně přizpůsoben operačním zesilovačem IC11. Jeho výstup je dále veden do mikrokontroléru a dvojice

komparátorů. Komparátor IC12 porovnává hodnotu napětí reprezentující procházející proud spotřebičem s referencí, odpovídající procházejícímu proudu 45 A. Tento signál je veden do komparátoru skrze RC filtr z R51 a C59, jehož časová konstanta odpovídá  $\tau = 1,03$  s. V případě překročení proudu protékajícího spotřebičem se po čase závislém na časové konstantě a počátečním stavu přepne komparátor IC12 do logické 1. Dioda D12 začne vést a otevře se tranzistor T12. Následně se uzavře výkonový tranzistor T14, který odpojí spotřebič od systému a zároveň se otevřením tranzistoru T11 drží T12 trvale otevřený i po přepnutí komparátoru IC12 zpět do logické nuly. Aby ochrana pracovala i v případě zkratu, je potřeba, aby při překročení určitého proudu ochrana reagovala okamžitě. V případě překročení proudu 165 A se plnou rychlostí přepne druhý z komparátorů IC13 a opět se stejným mechanismem uzavře výkonový tranzistor T14 a tím i odpojí spotřebič od systému. Tlumivka L3 omezuje rychlost nárůstu proudu pro získání času na reakci proudové ochrany. Mikrokontrolér snímá signál na G tranzistoru T12 a tím získává informaci o stavu proudové ochrany. Po její aktivaci se při požadavku o znovu-připojení spotřebiče zpět k systému musí na krátkou dobu uzemnit G tranzistoru T12. K tomu účelu slouží tranzistor T10 řízeným mikrokontrolérem. Výkonový tranzistor T14 lze také ovládat mikrokontrolérem prostřednictvím tranzistoru T13.

V druhé větvi je napětí přivedeno na svorky pro připojení akumulátoru. Úbytek napětí snímají rezistory R33, R34, R35 o celkové hodnotě 1,67 m $\Omega$ . Proud může procházet v obou směrech. Ve směru do akumulátoru, když se akumulátor nabíjí proudem ze snižujícího měniče. Nebo ze směru z akumulátoru, když snižující měnič neposkytuje energii či neposkytuje dostatek energie. Pro obousměrné měření proudu je zvolena dvojice operačních zesilovačů pro měření proudu IC7 a IC9, kdy jeden zpracovává úbytek napětí ve směru do akumulátoru a druhý ve směru z akumulátoru. Oba výstupy operačních zesilovačů jsou impedančně přizpůsobeny a vedeny do mikrokontroléru pomocí operačního zesilovače IC8A a IC8B. Vstupní svorky akumulátoru jsou jištěné trojicí paralelně zapojených pojistek o hodnotách 15 A. Výsledný maximální proud je při jejich paralelním zapojení 45 A. Výkonový tranzistor T9 slouží pro ochranu systému před přepólováním akumulátoru.



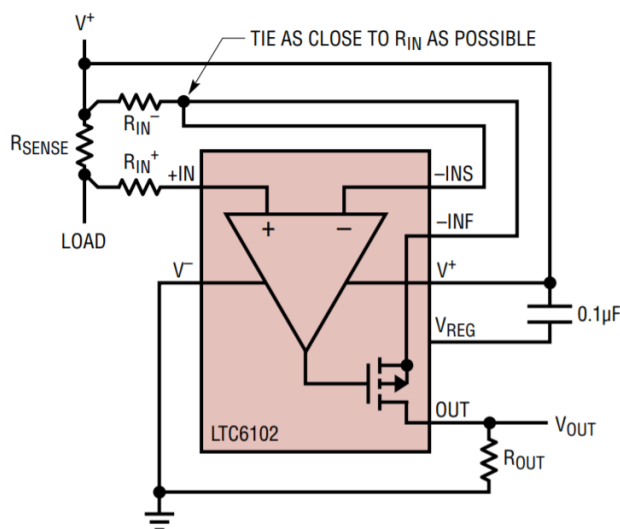
Napájení 3,3 V potřebných pro napájení většiny komponent obstarává dvojice lineárních stabilizátorů IC15 a IC16 napájených akumulátorem skrze ochrannou pojistku F5. Stabilizátor IC15 slouží k poskytování napájení pro digitální část systému a IC16 pro analogovou. Pomocné napájecí napětí 5 V poskytuje měnič IC14 připojený taktéž přes pojistku k akumulátoru. Napětí 5 V slouží pro napájení LCD displeje a galvanicky oddělujících měničů pro napájení optočlenů. O řízení systému se stará mikrokontrolér IC22 SMT32F411 popsany v kapitole 4.4.

Konektor JP4 slouží pro připojení čtyř tlačítek sloužících k obsluze systému. K indikaci stavu systému je možné připojit až 3 LED prostřednictvím konektoru JP10. V tomto systému je využita modrá LED pro indikaci činnosti fotovoltaického panelu, zelená pro indikaci nabíjení baterie a červená pro indikaci chybových stavů. Systém dále umožňuje připojení LCD alfanumerického displeje prostřednictvím konektoru JP9. V této práci je využit displej 4x20 znaky s řadičem HD44780. Signály pro řízení displeje jsou z mikrokontroléru přivedeny do budičů IC17, IC18 a IC19, sloužící k transformaci z 3,3 V logiky na 5 V. Elektromagnetický akustický měnič SG1 slouží pro zvukovou signalizaci a skrze tranzistor T15 je připojen k mikrokontroléru.

Výkonové součástky jsou kvůli značnému tepelnému namáhání přišroubovány ke chladiči. Teplota chladiče je snímána termistorem 10 k $\Omega$  připojeným ke konektoru JP8. Připojený termistor s rezistorem R83 tvoří napěťový dělič. Napětí děliče se snímá operačním zesilovačem IC21, jehož výstup je veden do mikrokontroléru. Stejné zapojení je použito i pro snímání intenzity osvětlení pomocí fotorezistoru připojeného ke svorkám JP7. Mikrokontrolér na základě změřeného osvětlení reguluje jas displeje. Programovací port JP5 slouží pro programování mikrokontroléru prostřednictvím ST-linku. V případě programování při odpojeném napájení je mikrokontrolér napájen pomocí ST-linku a poskytuje napájení pouze pro digitální část. DIP-switch SW1 slouží v tomto případě pro přemostění napájení i na analogovou část. Tlačítko S1 slouží pro ruční restart mikrokontroléru.

## 4.2 Popis obvodu LTC6102

LTC6102 je operační zesilovač pro snímání proudu pomocí bočníku v kladné napájecí části. Pracuje v napěťovém rozsahu 5–105 V a vyznačuje se především velmi malým vstupním napěťovým offsetem o maximální hodnotě  $\pm 10 \mu\text{V}$  s maximálním teplotním driftem  $\pm 50 \text{ nV}/^\circ\text{C}$ . Díky těmto parametrům je možné použít bočník o malých hodnotách odporu a dosáhnout tak nízkých ztrát [14].



Obr.č.19: Doporučené zapojení LTC6102, převzato z [14]

### 4.2.1 Výpočet rezistorů pro LTC6102

Příklad výpočtu je uveden pro U3. Prvním krokem je stanovení optimálního odporu bočníku s ohledem na ztráty a nepřesnosti LTC6102. Ztrátový výkon pro maximální proud 45 A při paralelním zapojení třech rezistorů o hodnotách 5 mΩ je:

$$P_{SENSE} = R_{SENSE} \cdot I_{SENSE}^2 = \frac{1}{\frac{1}{5 \cdot 10^{-3} \cdot 3}} \cdot 45^2 = 3,375 \text{ W}. \quad 4.1$$

Maximální ztrátový výkon takto sestaveného bočníku odpovídá 6 W při teplotě prostředí 70 °C. Ztrátový výkon při proudu 45 A je 3,38 W. Požadavkem je rozlišení snímaného proudu na jedno desetinné místo. Napětí na bočníku při proudu 0,1 A odpovídá:

$$U_{SENSE} = R_{SENSE} \cdot I_{SENSE} = \frac{1}{\frac{1}{5 \cdot 10^{-3} \cdot 3}} \cdot 0,1 = 166,7 \mu\text{V}. \quad 4.2$$

S přihlédnutím na offsety a jiné chyby operačního zesilovače je hodnota napětí bočnicku při proudu 0,1 A v pořádku. Rezistor  $R_{IN}$  určuje velikost proudu  $I_{OUT}$ , jehož absolutní maximum je 10 mA. Hodnota  $I_{OUT}$  se také se zvyšujícím napájecím napětím snižuje. Pro zvolený bočník a maximální protékající proud odpovídá hodnota  $U_{SENSE}$ :

$$U_{SENSE} = R_{SENSE} \cdot I_{SENSE} = \frac{1}{5 * 10^{-3} \cdot 3} \cdot 45 = 75 \text{ mV}.$$

Pro tuto aplikaci byla zkusmo zvolena hodnota odporu  $R_{IN} = 47 \Omega$ . Pro tuto hodnotu  $I_{OUT}$  odpovídá:

$$I_{OUT} = \frac{U_{SENSE}}{R_{IN}} = \frac{75 \cdot 10^{-3}}{47} = 1,5 \text{ mA}. \quad 4.3$$

V případě přetížení nebo zkratu může proud dosáhnout vyšších hodnot. V nejkrajnějším případě až 165 A při zkratu. Je nutné vypočítat  $I_{OUT}$  i pro tuto možnost.

$$U_{SENSE} = R_{SENSE} \cdot I_{SENSE} = \frac{1}{5 * 10^{-3} \cdot 3} \cdot 165 = 275 \text{ mV}.$$

$$I_{OUT} = \frac{U_{SENSE}}{R_{IN}} = \frac{275 \cdot 10^{-3}}{47} = 5,85 \text{ mA}.$$

$I_{OUT}$  nepřesahuje ani v kritickém okamžiku 10 mA. Je tedy možné tento rezistor použít. Při proudu 165 A by mělo být napětí  $V_{OUT}$  menší nebo rovné 3,3 V, aby nebyl překročen rozsah AD převodníku v mikrokontroléru a napájecí rozsah komparátorů.  $R_{OUT}$  odpovídá:

$$R_{OUT} = \frac{U_{max}}{I_{OUT}} = \frac{3,3}{5,85 \cdot 10^{-3}} = 564 \Omega. \quad 4.4$$

Byla zvolena hodnota  $R_{OUT} = 470 \Omega$ , se kterou při procházejícím proudu 165 A bude na výstupu LTC6102 napětí 2,75 V. Obdobným způsobem je přistupováno k návrhu ostatních rezistorů pro obvody IC7 a IC9.

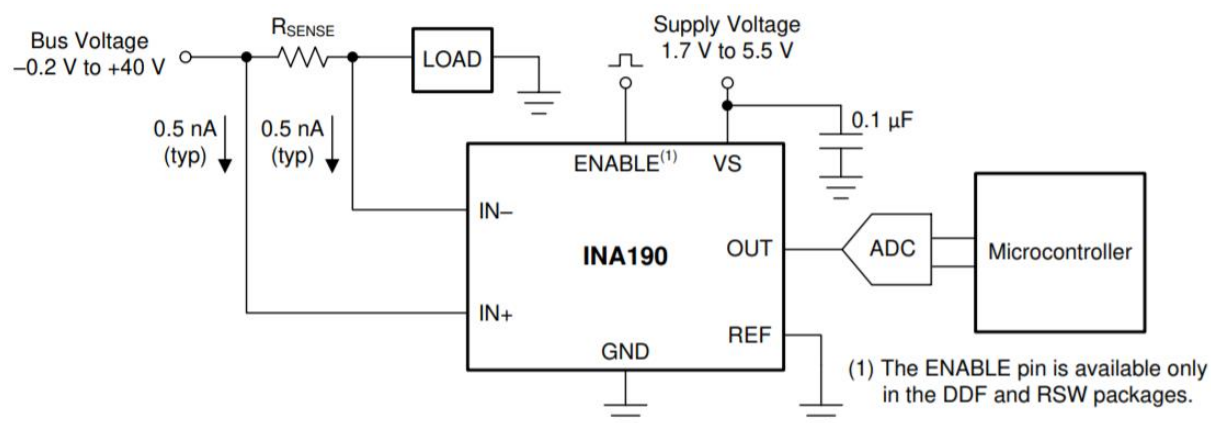
### 4.3 Popis obvodu INA190

INA190 je operační zesilovač pro snímání proudu pomocí bočnicku v kladné i záporné napájecí části. INA190 má pevně daný zisk a na trhu se vyskytuje v 5 variantách.

Varianta	Zisk
INA190A1	25 V/V
INA190A2	50 V/V
INA190A3	100 V/V
INA190A4	200 V/V
INA190A5	500 V/V

Obr.č.20: Varianty obvodu INA190 s jejich zisky

Vstupní napěťový offset je maximálně  $\pm 15 \mu\text{V}$  s teplotním driftem maximálně  $\pm 80 \text{ nV}/^\circ\text{C}$ . V systému je tento obvod použit pro snímání proudu procházejícího fotovoltaickým panelem. Bočník je zvolen ze dvou paralelně zapojených rezistorů R1 a R2 o celkové hodnotě  $5 \text{ m}\Omega$ . Zvolená varianta obvodu INA190 je A2. Maximální proud fotovoltaickým panelem může být až 10 A, pro tuto konfiguraci je výstupní napětí obvodu INA190 2,5 V. Maximální proud, který lze ještě vyhodnotit AD převodníkem mikrokontroléru je tedy 13,2 A [15].

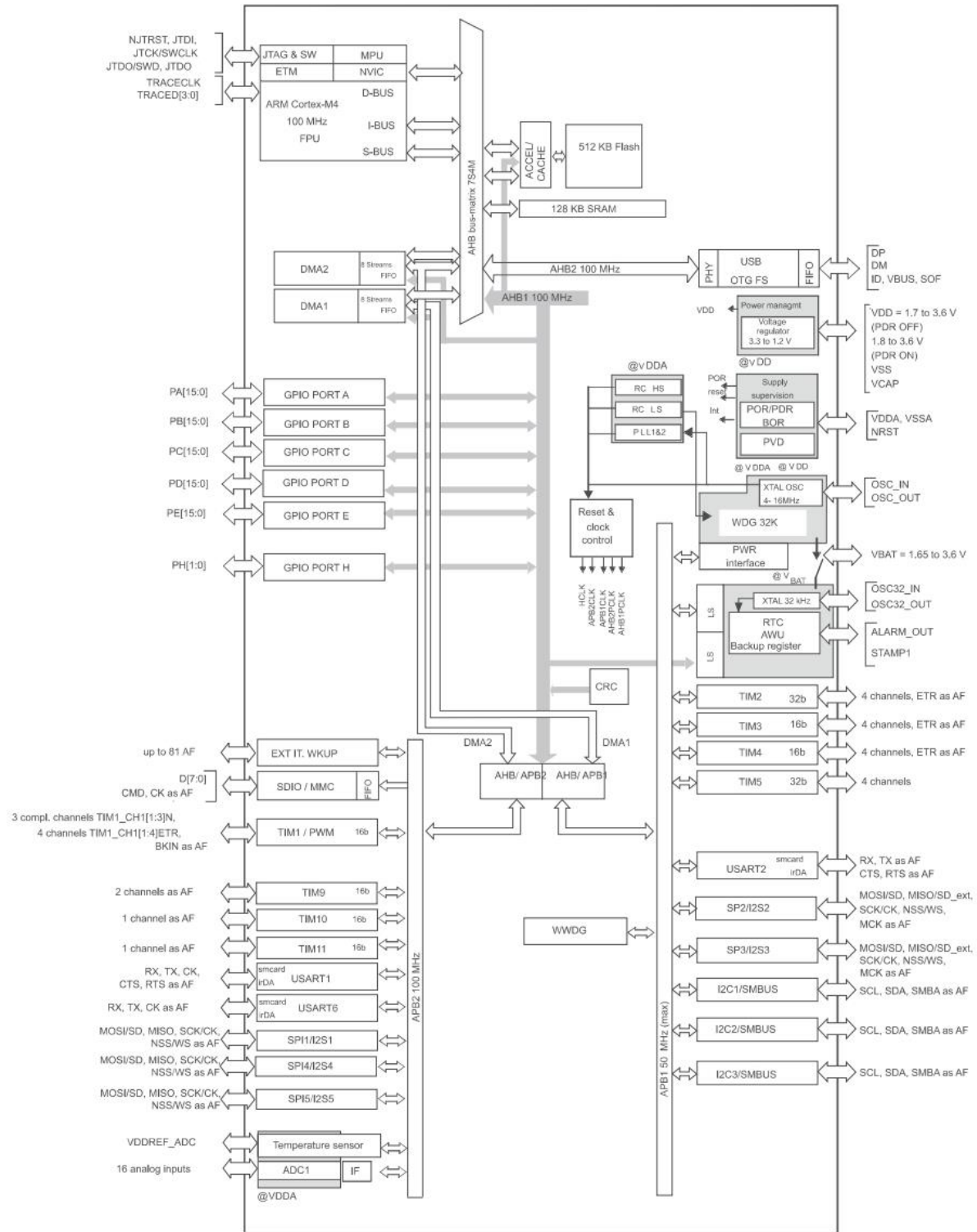


Obr.č.21: Doporučené zapojení INA190, převzato z [15]

#### 4.4 Popis mikrokontroléru STM32F411

Mikrokontrolér STM32F411 obsahuje RISC jádro řady Cortex-M4 vyznačující se harvardskou architekturou, matematickým koprocesorem zpracovávajícím údaje ve formátu float, instrukční sadou Thumb se 16bitovými instrukcemi a i Thumb-2, kde se k 16bitovým instrukcím přidávají i 32bitové. Jádra řad Cortex-M nepodporují původní instrukční sadu ARM. Výkon jádra je 1,25 DMIPS/MHz při výpočtu Dhrystone 2.1, který používá celočíselné operace. Jádra řady Cortex-M disponují řadičem NVIC (Nested vectored interrupt controller) umožňující nastavovat až 16 priorit vykonávání jednotlivých přerušení. NVIC umožňuje obsluhovat až 62 kanálů maskovatelných přerušení a 16 přerušení jádra Cortex-M4.

Samotný mikrokontrolér lze taktovat do 100 MHz o rozsahu napájecího napětí 1,7–3,6 V. V této diplomové práci je použit typ v pouzdru LQFP64 o 50 GPIO pinech s 256 kB flash pamětí a 128 kB SRAM. Dále obsahuje 8 časovačů a 12bitový AD převodník o 16 kanálech. Mikrokontrolér disponuje komunikačními rozhraními 3x I<sup>2</sup>C, 5x SPI/I<sup>2</sup>S z čehož dva mohou pracovat v režimu plného duplexu, 3x USART a 1x USB. Pro přenos dat mezi perifériemi a pamětí nebo mezi pamětí je možnost využít kanálu DMA. DMA umožňuje přenášet data bez účasti procesoru a tím zrychlit chod programu. STM32F411 obsahuje dva DMA kanály pro zajištění maximálního objemu přenášených dat [16].



Obr.č.22: Blokové schéma mikrokontroléru STM32F41, převzato z [16]

## 4.5 Návrh snižujícího měniče

Tato kapitola pojednává o výpočtech a jejich odvození pro návrh tlumivky, kapacity vstupního a výstupního kapacitoru a diody. Závěr kapitoly se zabývá výpočty ztrát výkonových tranzistorů.

### 4.5.1 Výpočet tlumivky

Vztah pro výpočet indukčnosti tlumivky potřebné pro snižující měnič lze odvodit následujícím způsobem:

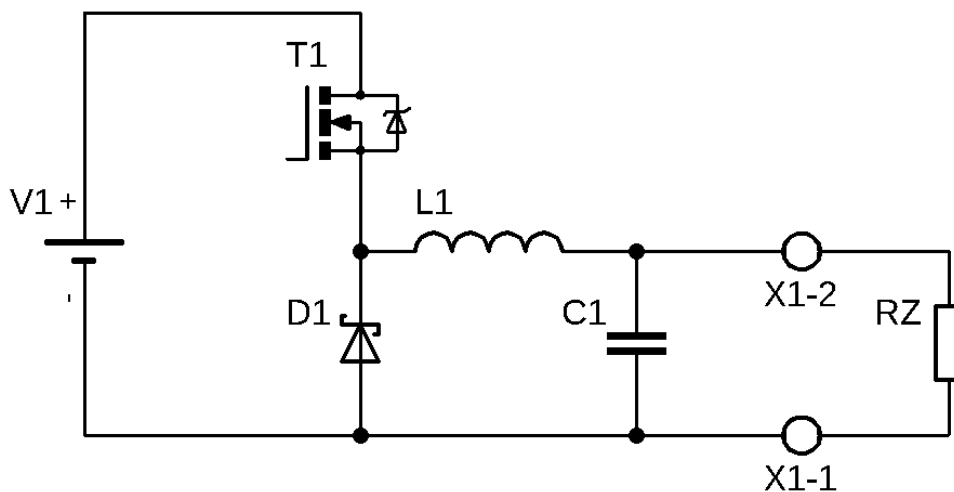
Napětí na tlumivce při sepnutém spínacím tranzistoru T1 odpovídá:

$$U_L = -L \cdot \frac{dI_L}{dt}, \quad 4.5$$

nebo:

$$U_{L(ON)} = -(U_{V1} - U_{T1} - U_{OUT}). \quad 4.6$$

$U_{V1}$  je vstupní napětí,  $U_{T1}$  je úbytek napětí na T1 v sepnutém stavu a  $U_{OUT}$  je výstupní napětí.



Obr.č.23: Schéma snižujícího měniče



Proud procházející tlumivkou při sepnutém T1 lze při použití vztahů 4.5 a 4.6 vyjádřit jako:

$$I_{LP} - I_{LT} = -\frac{(U_{T1} - U_{IN} + U_{OUT}) \cdot t_{ON}}{L}. \quad 4.7$$

$I_{LP}$  je proud tlumivkou těsně po rozeznutí T1 a jedná se tedy o jeho maximální hodnotu,  $I_{LT}$  je proud tlumivkou těsně před sepnutím T1 a jedná se tedy o jeho minimální hodnotu. Doba sepnutí tranzistoru vyjadřuje  $t_{on}$ .

Napětí na tlumivce při rozeznutém spínacím tranzistoru T1 odpovídá:

$$V_{L(OFF)} = U_D + U_{OUT}, \quad 4.8$$

kde  $U_D$  je úbytek napětí na diodě D1

Proud procházející tlumivkou při rozeznutém T1 lze při použití vztahů 4.5 a 4.8 vyjádřit jako:

$$I_{LP} - I_{LT} = -\frac{(U_D + U_{OUT}) \cdot t_{OFF}}{L}. \quad 4.9$$

Proud procházející tlumivkou odpovídá výstupnímu proudu  $I_{OUT}$ .

$$I_{LP} + I_{LT} = 2 \cdot I_{OUT}. \quad 4.10$$

Proud tlumivkou před sepnutím tranzistoru  $I_{LP}$  lze za použití vztahů 4.7 a 4.10 vyjádřit jako:

$$I_{LP} = I_{OUT} + \frac{(U_{T1} - U_{IN} - U_{OUT}) \cdot t_{ON}}{2 \cdot L}. \quad 4.11$$

Proud tlumivkou po sepnutí tranzistoru  $I_{LT}$  lze za použití vztahů 4.9 a 4.10 vyjádřit jako:

$$I_{LT} = I_{OUT} + \frac{(U_{D1} + U_{OUT}) \cdot t_{OFF}}{2 \cdot L}. \quad 4.12$$

Vztah pro střihu:

$$D = \frac{t_{ON}}{T_T} = \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}}, \quad 4.13$$

kde D je poměr mezi dobou sepnutí spínače T a spínací periodou.

Ze vztahů 4.11, 4.12 a 4.13 lze také střidu vyjádřit jako:

$$D = \frac{U_D + U_{OUT}}{U_{IN} - U_1 + U_D}. \quad 4.14$$

Dobu sepnutí spínacího tranzistoru T1 lze vyjádřit vztahem:

$$t_{ON} = \frac{D}{f_T} = \frac{(U_D + U_{OUT})}{(U_{IN} - U_T + U_D) \cdot f_T}. \quad 4.15$$

Maximální proud tlumivkou lze získat dosazením vztahu 4.15 do 4.11.

$$I_{LP} = I_{OUT} + \frac{(U_{IN} - U_T - U_{OUT}) \cdot (U_D + U_{OUT})}{(t_{ON} + t_{OFF}) \cdot 2 \cdot L \cdot f_T} \quad 4.16$$

Tento vztah znázorňuje, že zvyšováním indukčnosti tlumivky a spínací frekvence klesá maximální proud tlumivkou

Minimální proud tlumivkou lze získat dosazením vztahu 4.15 do 4.10.

$$I_{LT} = I_{OUT} - \frac{(U_{IN} - U_T - U_{OUT}) \cdot (U_D + U_{OUT})}{(t_{ON} + t_{OFF}) \cdot 2 \cdot L \cdot f_T}. \quad 4.17$$

Změna proudu:

$$\Delta I_L = I_{LP} - I_{LT} = \frac{(U_{IN} - U_T - U_{OUT}) \cdot (U_D + U_{OUT})}{(t_{ON} + t_{OFF}) \cdot L \cdot f_T}. \quad 4.18$$

Vztah pro poměr mezi změnou proudu tlumivkou a výstupním proudem

$$r = \frac{\Delta I_L}{I_{OUT}} = \frac{I_{LP} - I_{LT}}{I_{OUT}}. \quad 4.19$$

Dosažením vztahu 4.18 do 4.19 lze r vyjádřit také jako:

$$r = \frac{(U_{IN} - U_T - U_{OUT}) \cdot (U_D + U_{OUT})}{(U_{IN} - U_T + U_D) \cdot f_T \cdot I_{OUT} \cdot L}. \quad 4.20$$

Jednoduchou úpravou vztahu 4.20 lze získat vztah pro výpočet indukčnosti tlumivky:

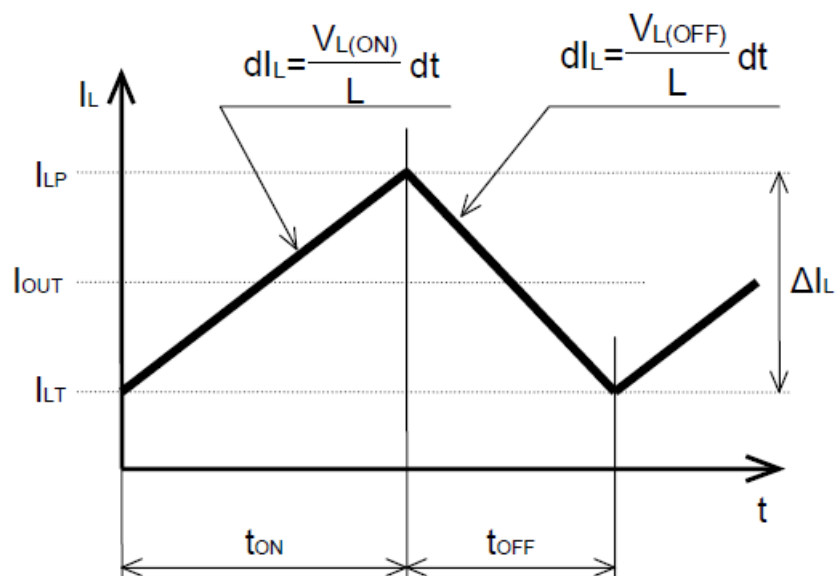
$$L = \frac{(U_{IN} - U_T - U_{OUT}) \cdot (U_D + U_{OUT})}{(U_{IN} - U_T + U_D) \cdot f_T \cdot I_{OUT} \cdot r} \quad 4.21$$

Poměr  $r$  se volí obvykle v rozsahu 0,2–0,5. V případě vyššího výstupního napětí měniče lze úbytky napětí na spínacím tranzistoru a diodě zanedbat.

Hodnota indukčnosti měniče po dosazení hodnot do rovnice 4.21 odpovídá:

$$L = \frac{(50 - 0,26 - 15) \cdot (0,6 + 15)}{(50 - 0,26 + 0,6) \cdot 50000 \cdot 20 \cdot 0,3} = 35,84 \mu H.$$

Těmito vztahy lze vypočítat tlumivku pro libovolný snižující měnič [20], [23], [24].



Obr.č.24: Průběh proudu tlumivkou, převzato z [20]

#### 4.5.1.1 Volba jádra tlumivky

Tlumivka pro požadované parametry by měla mít indukčnost okolo 35,84  $\mu H$ . Spínací frekvence měniče je 50 kHz a podle toho musí být zvolen odpovídající materiál. Na trhu figuruje spousta výrobců, avšak pro tuto aplikaci byl zvolen výrobce MICROMETALS. Tento výrobce poskytuje velké množství prstencových jader z práškového železa pro široké spektrum aplikací. Pro tuto aplikaci je nejvýhodnější

materiál 52. Tento materiál zeleno-modré barvy má permeabilitu 75 a hodí se pro různé snižující či zvyšující (step-up) měniče o pracovních kmitočtech od 50 kHz výše [18].



Obr.č.25: Prstencové jádro od výrobce MICROMETALS, materiál 52, převzato z [19]

#### 4.5.1.2 Výpočet počtu závitů a počtu vodičů

Bylo zvoleno jádro o vnitřním průměru 24,1 mm se značením T157-220. Koeficient indukčnosti tohoto jádra  $A_L$  je 99 nH/N<sup>2</sup>. Jednoduchým vzorcem lze vypočítat potřebný počet závitů pro dosažení požadované indukčnosti.

$$N = \sqrt{\frac{L}{A_L}} = \sqrt{\frac{35,84 \cdot 10^{-6}}{99 \cdot 10^{-9}}} = 19,03. \quad 4.22$$

Je dovolen ztrátový výkon 3 W. Odpor vinutí smí být maximálně:

$$R = \frac{P_{CU}}{I_{ef}^2} = \frac{3}{400} = 7,5 \text{ m}\Omega. \quad 4.23$$

Celková délka vodiče pro vinutí je 1,44 m. Celkový průřez vinutí odpovídá:

$$S = \rho_{Cu80} \cdot \frac{l}{R} = 0,022 \cdot \frac{1,44}{7,5 \cdot 10^{-3}} = 4,22 \text{ mm}^2, \quad 4.24$$

kde  $\rho_{Cu80}$  je měrný odpor mědi při 80 °C

Proudová hustota primárního vinutí je:

$$J = \frac{I_{RMS}}{S} = \frac{20}{4,22} = 4,74 \text{ A/mm}^2. \quad 4.25$$

Pro zabránění skin efektu je vhodné použít svazek izolovaných vodičů. Hloubku vniku lze stanovit pomocí zjednodušeného vzorce:

$$d_{max} = \frac{75}{\sqrt{f}} = \frac{75}{\sqrt{50000}} = 0,335 \text{ mm.} \quad 4.26$$

Průměr drátu ve svazku smí být maximálně 2  $d_{MAX}$ , čili 0,67 mm. Byl použit vodič o průměru 0,4 mm.

Počet vodičů primárního vinutí tedy bude:

$$n = \frac{4 \cdot S}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 4,74}{\pi \cdot 0,4^2} = 37,7 \text{ tedy } 38. \quad 4.27$$

V této aplikaci nebylo možno použít 38 vodičů z důvodu neprůchodnosti skrze otvor v DPS. Bylo použito 28 vodičů. Po přepočítání vychází ztrátový výkon při  $I_{OUT} = 20 \text{ A}$  na 3,6 W [21], [22].

#### 4.5.2 Výpočet výstupního filtračního kapacitoru

Vztah pro výpočet filtrační kapacity pro snižující měnič lze odvodit následujícím způsobem:

$$I_C = C \cdot \frac{dU_C}{dt}, \quad 4.28$$

nebo:

$$\Delta Q_C = C \cdot \Delta U_C = \Delta t \cdot I_{C1}. \quad 4.29$$

Kapacitor se nabíjí jen v polovině intervalu, vztah 4.29 je tedy nutné poupravit.

$$\Delta Q_C = \frac{1}{2} \cdot \Delta t \cdot \Delta I_C, \quad 4.30$$

kde  $\Delta t$  odpovídá:

$$\Delta t = \frac{1}{2} \cdot t_{ON} + \frac{1}{2} \cdot t_{OFF} = \frac{1}{2} \cdot \frac{D}{f_T} + \frac{1}{2} \cdot \frac{1-D}{f_T} = \frac{1}{2 \cdot f_T}. \quad 4.31$$

$\Delta I_{C1}$  odpovídá:

$$\Delta I_{C1} = \frac{\Delta I_L}{2}. \quad 4.32$$

Dosazením vztahů 4.31 a 4.32 do 4.30 lze vyjádřit náboj jako:

$$\Delta Q_C = \frac{\Delta I_L}{8 \cdot f_T} \quad 4.33$$

Dosazením vztahu 4.29 do 4.33 se získá vztah pro minimální výstupní kapacitu:

$$C_{MIN} = \frac{\Delta I_L}{8 \cdot f_T \cdot \Delta U_C} \quad 4.34$$

kde  $\Delta I_L$  lze vyjádřit pomocí vztahu 4.19 jako:

$$\Delta I_L = r \cdot I_{OUT} \quad 4.35$$

Minimální kapacita výstupního filtračního kapacitoru při zvlnění napětí 3 mV je:

$$C_{MIN} = \frac{\Delta I_L}{8 \cdot f_T \cdot \Delta U_C} = \frac{0,3 \cdot 20}{8 \cdot 50000 \cdot 0,003} = 5 \text{ mF} \quad 4.36$$

Pro dlouhou životnost zařízení je nutné použít kvalitní kapacitory s nízkou hodnotou ESR. Ideální volbou je paralelní zapojení více kapacitorů o menší kapacitě [23]. [24].

### 4.5.3 Výpočet vstupního filtračního kapacitoru

Ze vztahu 4.28 lze vyjádřit:

$$\Delta U_{CIN} = \frac{I_{IN} \cdot (1 - D) \cdot T_T}{C_{IN}} = \frac{I_{OUT} \cdot D \cdot (1 - D)}{C_{IN} \cdot f_T} \quad 4.37$$

Maximální zvlnění je při 50 % střídě, z toho vyplývá:

$$\Delta U_{CIN MAX} = \frac{I_{OUT} \cdot D \cdot (1 - D)}{C_{IN} \cdot f_T} = \frac{I_{OUT}}{4 \cdot C_{IN} \cdot f_T} \quad 4.38$$

Je doporučeno nepřesahovat napěťové zvlnění zhruba 75 mV, výsledná minimální hodnota vstupní filtrační kapacity odpovídá:

$$C_{IN} = \frac{I_{OUT}}{4 \cdot \Delta U_{CIN MAX} \cdot f_T} = \frac{20}{4 \cdot 0,075 \cdot 50000} = 1,33 \text{ mF} \quad 4.39$$

I zde je doporučeno využít více paralelně zapojených kvalitních kapacitorů, s nízkou hodnotou ESR. Výhodná je kombinace elektrolytických spolu s polyesterovými kapacitory [23].

#### 4.5.4 Výpočet diody

Maximální průměrný proud procházející diodou lze vypočítat z následujícího vztahu:

$$I_F = I_{OUT\ MAX} \cdot (1 - D). \quad 4.40$$

Pro nejnepríznivější případ, kdy  $U_{IN} = 50\ V$  a  $U_{OUT} = 10,5\ V$  odpovídá průměrný proud diodou:

$$I_F = I_{OUT\ MAX} \cdot \left(1 - \frac{U_{OUT}}{U_{IN}}\right) = 20 \cdot \left(1 - \frac{10,5}{50}\right) = 15,8\ A. \quad 4.41$$

Byla zvolena výkonová dioda NTST20100CTG o napěťovém úbytku cca  $0,8\ V$  při procházejícím proudu  $20\ A$ . Výkonová ztráta na diodě odpovídá:

$$P_D = I_F \cdot U_F = 20 \cdot 0,8 = 16\ W. \quad 4.42$$

Pro dosažení nejnižších ztrát je doporučeno použít Schottkyho diodu o co nejmenším napěťovém úbytku [24].

#### 4.6 Volba a výpočet ztrát tranzistorů

Při výběru tranzistorů je nutné v první řadě zohlednit jejich maximální možné napěťové a proudové namáhání. Důležitými parametry určující ztráty jsou odpor v sepnutém stavu, doba zapínání a vypínání tranzistoru.

Výkonové tranzistory pro ochranu proti přepólování fotovoltaického panelu a pro spínání snižujícího měniče T1, T4 a T5 byly zvoleny AOT410L v provedení MOSFET. Výkonový tranzistor T9 pro ochranu proti přepólování akumulátoru a T14 sloužící k odpojování spotřebiče byly zvoleny IRLB3034PBF a jsou taktéž v provedení MOSFET.

Symbol	Význam	Hodnota
$U_{DSmax}$	maximální napětí drain-source	100 V
$I_{Dmax}$	maximální (stálý) proud drainem	150 A
$R_{DSon}$	odpor v sepnutém stavu	6,5 mΩ
$t_r$	doba zapínání	22 ns
$t_f$	doba vypínání	14,5 ns

Obr.č.26: Parametry tranzistoru AOT410L [25]

Symbol	Význam	Hodnota
$U_{DSmax}$	maximální napětí drain-source	40 V
$I_{Dmax}$	maximální (stálý) proud drainem	195 A
$R_{DSon}$	odpor v sepnutém stavu	1,4 mΩ
$t_r$	doba zapínání	827 ns
$t_f$	doba vypínání	355 ns

Obr.č.27: Parametry tranzistoru IRLB3034PBF [26]

Ztráty na tranzistorech se dělí na statické a dynamické. Statické se projevují odporovými ztrátami způsobené odporem v sepnutém stavu  $R_{DSon}$ . Dynamické jsou způsobeny dobou zapínání a vypínání.

Pro výpočet statických ztrát tranzistoru AOT410L lze použít následující vztah:

$$P_{stat} = R_{DSon} \cdot I_{ef}^2 = 0,0065 \cdot 10^2 = 0,65 \text{ W.} \quad 4.43$$

Pro výpočet dynamických ztrát tranzistoru AOT410L lze použít následující vztah:

$$P_{dyn} = \frac{U_{DS}}{2} \cdot \frac{I_{DS}}{2} \cdot (t_r + t_f) \cdot f = \frac{50}{2} \cdot \frac{10}{2} \cdot (22 + 14,5) \cdot 10^{-9} \cdot 50000 = 0,23 \text{ W.} \quad 4.44$$

Dynamické ztráty jsou v praxi vyšší. Dobu zapínání a vypínání tranzistoru ovlivňuje indukčnost a odpor mezi budičem a řídicí elektrodou tranzistoru, neboť tranzistor má svoji parazitní kapacitu. Pro přesné stanovení dynamických ztrát je vhodné použít osciloskop ke změření dob zapínání a vypínání tranzistoru.

Tranzistory T5 a T6 jsou většinou permanentně sepnuté. Výjimku tvoří chybové stavy. Z toho důvodu se neuplatňují dynamické ztráty ale pouze statické. Při maximálním proudovém odběru 45 A vychází statické ztráty na jeden tranzistor 2,84 W [27].



## 5 Řídící program systému

Tato kapitola je věnována softwarové části a popisuje řídicí software pro systém za doprovodu vývojových diagramů. Ty kvůli složitosti programu nejsou rozepsané dopodrobna a slouží pouze pro základní orientaci. Software je psán pro mikrokontrolér STM32F411.

### 5.1 Popis řídicího softwaru

Po spuštění provede program inicializaci všech portů, všech potřebných periférií a zinicilizuje LCD displej. Následně se na displeji zobrazí úvodní obrazovka s názvem zařízení a aktuální verzi SW spolu s úvodní startovací melodií. Po přehrání melodie je odstartován sekvenční AD převod a program se dostane do nekonečné while smyčky.

Ve smyčce je neustále kontrolována teplota chladiče pomocí termistoru 10 k. Při překročení teploty 35 °C se spustí ventilátor, jehož otáčky se přizpůsobují aktuální teplotě. Po dosažení 75 °C dosahuje ventilátor 100 % otáček. Po překročení 80 °C systém vypne snižující měnič a tím se dále již negeneruje teplo. Systém však dále pracuje i se zapnutým ventilátorem a poskytuje energii z akumulátoru. Při poklesu teploty pod 50 °C se snižující měnič opět zapne.

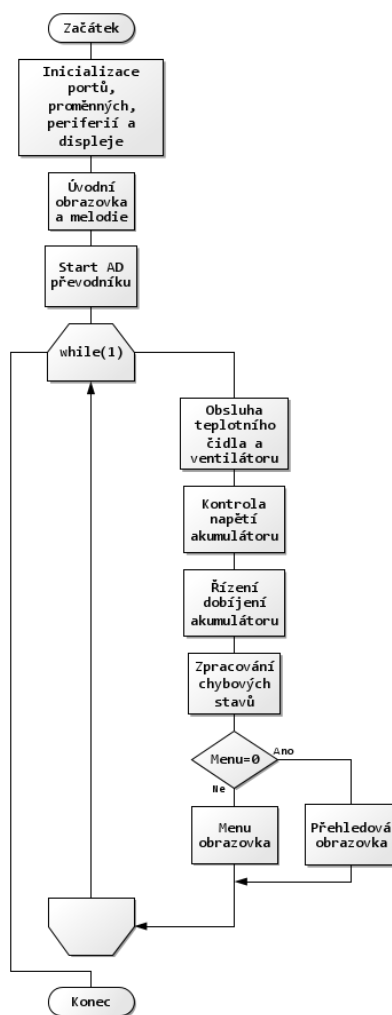
V případě poklesu napětí akumulátoru pod hranici 10,7 V se připojený spotřebič odpojí od systému. Tím se zamezí dalšímu vybíjení akumulátoru. Opětovné připojení spotřebiče k systému se provádí stisknutím tlačítka MENU/OK. Je tedy nutný uživatelský vstup. Uživatelský vstup je také nutný po přetížení či zkratu na straně spotřebiče, kdy zareaguje HW ochrana popsána v kapitole 4.1 a odpojí spotřebič od systému.

Pokud má fotovoltaický panel dostatečné napětí, spustí se dobíjení akumulátoru. Do dosažení akumulátorového napětí odpovídající absorpční fázi (okolo 14,5 V pro VRLA) se akumulátor dobíjí konstantním proudem. Po dosažení tohoto napětí systém přejde do režimu konstantního napětí. Hodnota napětí odpovídá absorpční fázi. Proud akumulátorem pomalu klesá a po poklesu pod cca 4 % ze jmenovité kapacity akumulátoru

systém přepne do režimu sníženého konstantního napětí, a to na napětí odpovídající udržovací fázi (okolo 13,5 V).

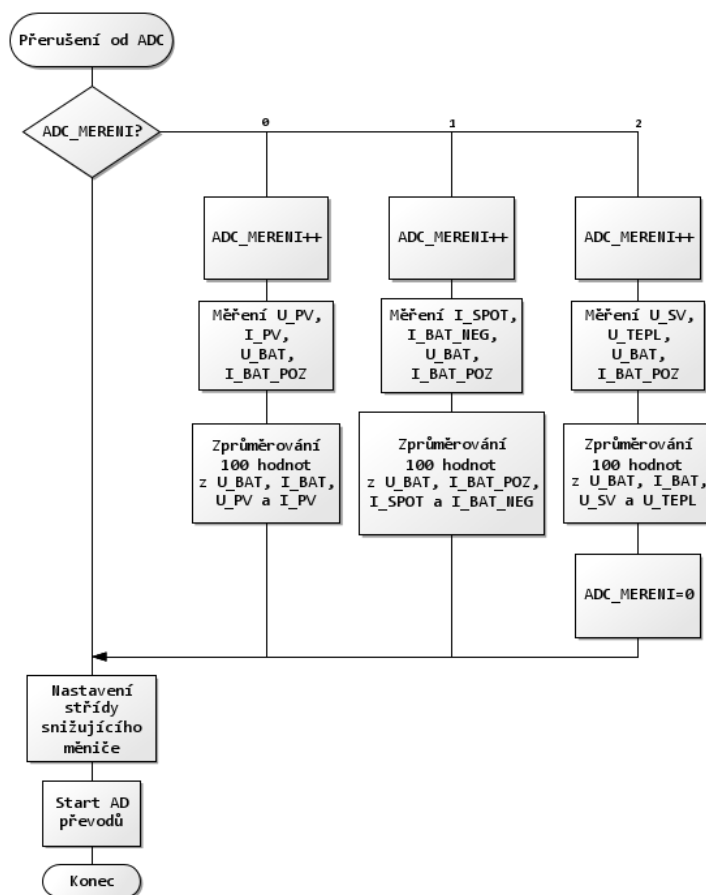
Chybové stavy jako jsou například překročení kritické teploty, odpojení termistoru, nízké napětí akumulátoru, výstupní přetížení či zkrat jsou zobrazeny na displeji za doprovodu blikající červené LED signalizující chybu.

Program se také stará o zobrazování údajů na LCD displeji. Výchozí obrazovkou je obrazovka přehledová. Tato obrazovka zobrazuje napětí akumulátoru a fotovoltaického panelu, proud akumulátorem, spotřebičem a fotovoltaickým panelem, výkon dodávaný fotovoltaickým panelem a odebíraný spotřebičem, teplotu chladiče a střidu měniče. V případě stisku tlačítka OK se vyvolá obrazovka menu, sloužící pro nastavení parametrů akumulátoru. Uživatel má možnost nastavit napětí udržovací a absorpční fáze, kapacitu akumulátoru a maximální proud akumulátorem.



Obr.č.28: Vývojový diagram main programu

Po dokončení AD převodu se zavolá obsluha přerušení. AD převodník pracuje v sekvenčním módu se 4 konverzemi. Postup provádění konverzí je patrný z Obr.č.29. V rámci každé konverze se převádí signál reprezentující napětí a proud snižujícím měničem. Tyto informace slouží jako zpětná vazba pro stanovení střídy spínání snižujícího měniče. Průměrné hodnoty ze 100 naměřených dat jsou poté zobrazována na LCD displeji. Po vyčtení a zprůměrování hodnot se zavolá funkce pro stanovení střídy snižujícího měniče. Funkce má za parametry požadované napětí a proudový limit. Na základě žádaných a aktuálních hodnot jsou pomocí PID regulátoru stanovovány střídy pro napěťovou a proudovou zpětnou vazbu. Spínací tranzistory T4 a T5 jsou ovládány střídou o nižší hodnotě. Tím je zajištěno nepřekročení požadovaného napětí a proudového limitu. Na konci se z obsluhy přerušení znovu odstartuje AD převod. Během AD převodů tedy vzniká okno, kdy se vykonává hlavní program.



Obr.č.29: Vývojový diagram obsluhy přerušení od ADC

## 5.2 Alfnumerický LDC displej s řadičem HD44780

S řadičem HD44780 pracuje značná část displejů. Vyskytují se v provedení od 1x8 až do 4x40 znaků. Pro posílání a příjem dat se využívá 4 nebo 8 vodičů. Vodič RS slouží k určení, zda se jedná o data nebo instrukci. Pro volbu mezi zápisem a vyčítáním dat slouží vodič R/W. Napájecí napětí na pinu V0 určuje kontrast displeje. Posledním vodičem vyjma napájení displeje a napájení podsvětlení je vodič E. Pulsem o minimální délce 1,2 ms se displeji podává informace o správnosti dat a po jeho přijetí displej data zpracuje.

Číslo pinu	Název	Funkce
1	VSS	Napájení (GND)
2	VDD	Napájení (+5V)
3	V0	Zdroj pro LCD
4	RS	Register Select
		RS=0 - Data
		RS=1 - Instrukce
5	R/W	Read/write
		R/W=0 - Zápis
		R/W=1 - Čtení
6	E	Enable
7	DB0	Data0
8	DB1	Data1
9	DB2	Data2
10	DB3	Data3
11	DB4	Data4
12	DB5	Data5
13	DB6	Data6
14	DB7	Data7
15	LED-(K)	Podsvětlení - katoda
16	LED+(K)	Podsvětlení - anoda

Obr.č.30: Rozvržení pinů displeje s řadičem HD44780, převzato z [28]

Znaková sada podporuje 255 znaků. Uživatel má možnost si vytvořit až 8 vlastních znaků, které se volají jako ostatní znaky. Uživatelské znaky jsou přístupné pod kódy 0–7.

b7- b3 -b0	b4	0000	0010	0011	0100	0101	0110	0111	1010	1011	1100	1101	1110	1111
0000	CG RAM (1)		0	a	P	`	P		-	夕	三	α	p	
	(2)	!	1	A	Q	a	q	.	ア	チ	△	ä	q	
0010	(3)	"	2	B	R	b	r	「	イ	ツ	×	β	θ	
	(4)	#	3	C	S	c	s	」	ウ	テ	ε	ε	∞	
0100	(5)	\$	4	D	T	d	t	、	エ	ト	ト	μ	Ω	
	(6)	%	5	E	U	e	u	.	オ	ナ	ユ	σ	Ω	
0110	(7)	&	6	F	V	f	v	ヲ	カ	ニ	ヨ	ρ	Σ	
	CG RAM (8)	'	7	G	W	g	w	フ	キ	ヌ	ラ	g	π	
1000	CG RAM (1)	<	8	H	X	h	x	ィ	ク	ネ	リ	γ	×	
	(2)	>	9	I	Y	i	y	ウ	ケ	ル	ル	´	γ	
1010	(3)	*	:	J	Z	j	z	エ	コ	ン	レ	j	≠	
	(4)	+	;	K	[	k	[	オ	サ	ヒ	ロ	×	≠	
1100	(5)	,	<	L	¥	l	l	カ	シ	フ	フ	φ	≠	
	(6)	-	=	M	]	m	]	ユ	ス	へ	ン	≠	÷	
1110	(7)	.	>	N	^	n	→	ヨ	セ	ホ	°	ñ		
	CG RAM (8)	/	?	O	_	o	←	ッ	ソ	マ	°	ö	■	

Obr.č.31: Znaková sada displeje s řadičem HD44780, převzato z [28]

V rámci této práce byla vytvořena knihovna pro práci s těmito typy displejů. V knihovně byla implementována uživatelská znaková sada obsahující znaky baterie, fotovoltaického panelu, měsíce, aj [28].

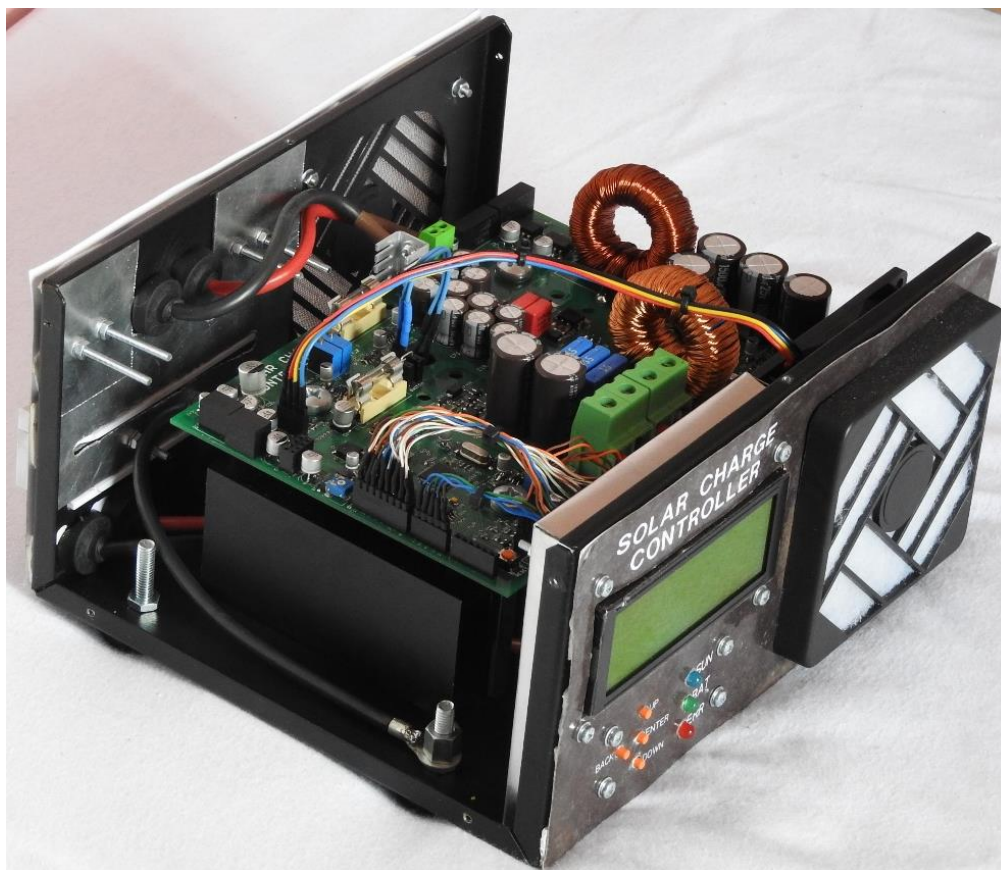
## 6 Mechanická konstrukce

Zařízení je umístěné v konstrukčním boxu o vnějších rozměrech 234x124x217 mm. Box je vyroben z ocelového plechu o tloušťce 1 mm s naneseným černým komaxitem. Do přední strany boxu jsou vyhotoveny konstrukční otvory pro LCD displej, tlačítka, LED a ventilátor. Do zadní strany boxu je vyhotoven otvor pro výfuk ventilátoru a svorkovnici sloužící k propojení systému s fotovoltaickým panelem, baterií a spotřebičem. Vodiče propojující svorkovnici se systémem procházejí skrze box pomocí průchodek. Na přední i zadní straně boxu jsou nalepené štítky s příslušnými popisy. Štítky jsou vytisknuté na čtverci a zalaminované.

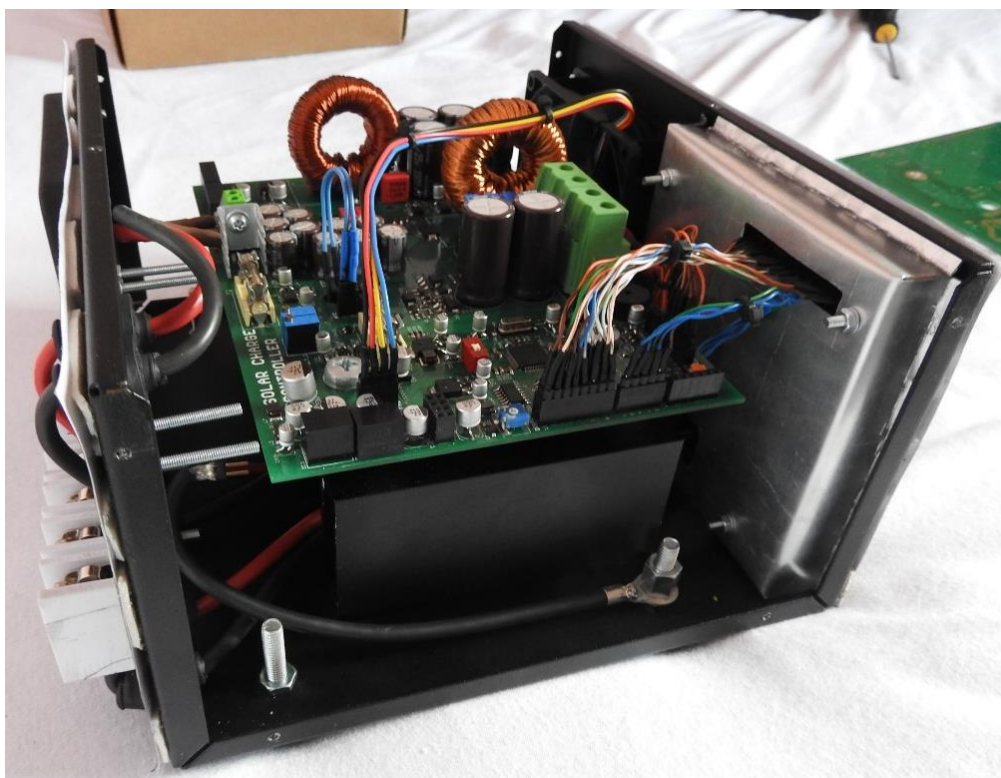
Ve spodní straně boxu jsou vyvrtány otvory pro nožičky a šrouby držící 4 distanční sloupky o délce 80 mm s vnějším závitem o délce 10 mm. Na vnějších závitech 4 sloupeků je zasazen chladič o rozměru 180x100 mm s 5 mm tloušťkou báze s přišroubovanými výkonovými polovodiči spolu s termistorem s M3 závitem. Na zbylých 5 mm vnějšího závitu distančního sloupku jsou přišroubovány distanční sloupky bez vnějších závitů o délce 10 mm. Na těchto sloupkách a vývodech výkonových polovodičů a termistoru je umístěna DPS systému o rozměrech 180x132 mm, která je přišroubována k distančním sloupkům pomocí 4 šroubů.

Otvor pro ventilátor ze přední strany boxu je z vnějšku opatřen mřížkou obsahující prachový filtr a stínící EMI mřížka. Z vnitřní strany je skrze umístěný ventilátor celek přišroubován k boxu pomocí 4 šroubů. Ze zadní strany je stejná mřížka přišroubována přímo ke konstrukčnímu boxu.

DPS obsahující indikační LED a ovládací tlačítka je přišroubována k přední straně boxu pomocí 4 šroubů, stejně jako DPS alfanumerického LCD displeje. Z důvodu omezení unikajícího elektromagnetického rušení zejména z velkého otvoru pro displej je zevnitř konstrukčního boxu umístěna krycí krabička z hliníkového plechu o tloušťce 0,65 mm.



Obr.č.32: Pohled do zařízení

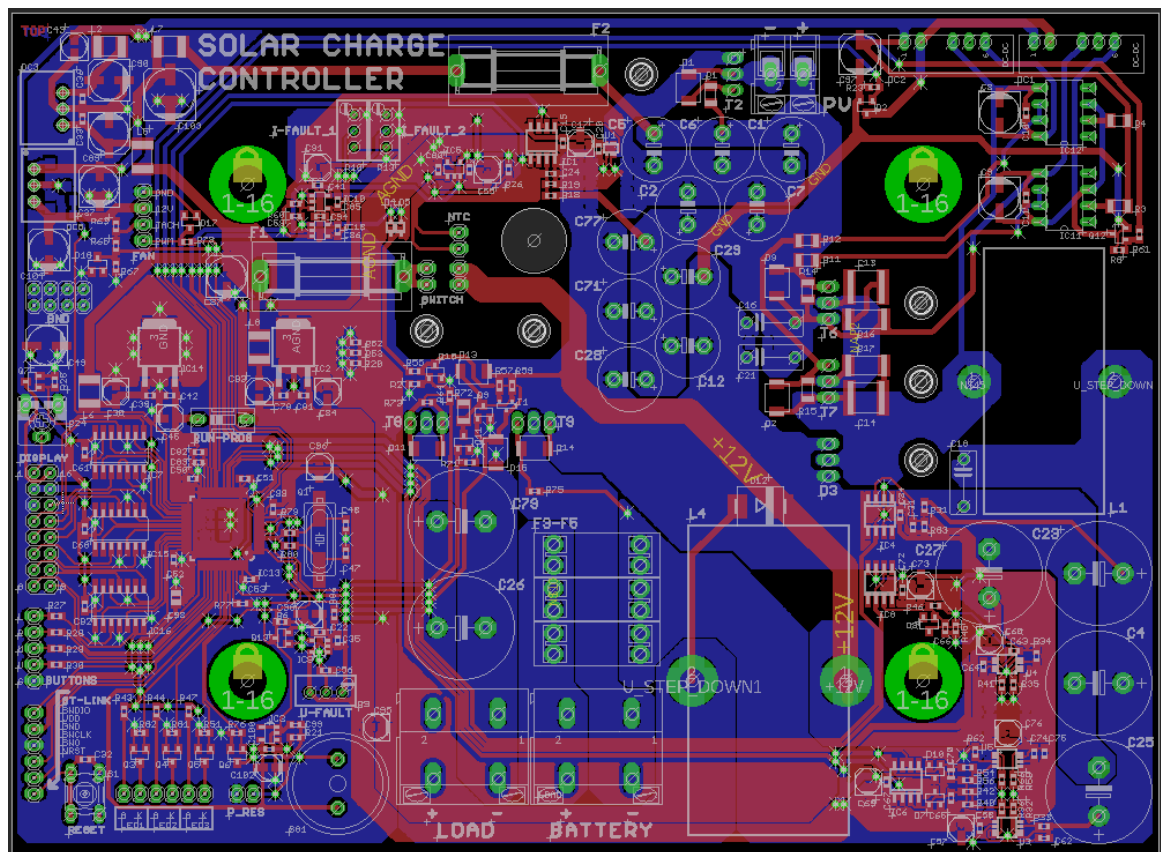


Obr.č.33: Pohled do zařízení 2



## 7 Oživení systému

DPS systému byla vyrobena na základě GERBER dat firmou ALLPCB. Následovalo osazení mikrokontroléru STM32F411 spolu s jeho podpůrnými součástkami, piezosirénou, napájecím a programovacím konektorem. Pomocí programovacího konektoru se nahrál testovací program, který měl za úkol rozezvučit piezosirénu. Po tomto základním otestování se do mikrokontroléru nahrál aktuální software a zapájel se zbytek součástek. Poté následovalo uživení displeje, tlačítek a indikačních LED. Po nastavení odporových trimrů R25, R50 a R52 na požadované hodnoty následovalo otestování funkce snižujícího měniče včetně chybového stavu, kdy se při překročení napěťové hranice dané R25 restartuje mikrokontrolér. Následně byla otestována ochrana proti přetížení a zkratu. Na závěr byl zprovozněn teplotní senzor snímající teplotu chladiče a ventilátor řízený PWM signálem z mikrokontroléru. Během oživování bylo nalezeno pár drobných chyb, jednalo se o chybějící rezistory R57, R59, R74. Bylo také nutné upravit napájení měniče DC1, aby bylo možné měnič vypínat při požadavku na nulové otáčky ventilátoru. Všechny chyby byly na DPS a ve schématech opraveny.





## 8 Měření systému

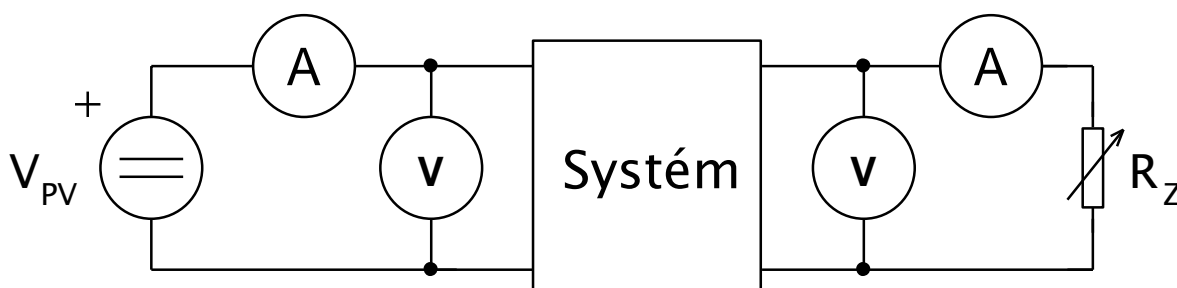
Tato kapitola se věnuje měření systému. Je zde uveden způsob měření účinnosti zařízení včetně grafů. Kapitola se dále krátce věnuje stabilitě výstupního napětí. Poslední část této kapitoly pojednává o měření emisí.

### 8.1 Účinnost systému

Účinnost systému  $\eta$  je poměr mezi výkonem získaným ze systému a výkonem dodaným.

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} = \frac{U_{OUT} \cdot I_{OUT}}{U_{IN} \cdot I_{IN}} [\%]. \quad 8.1$$

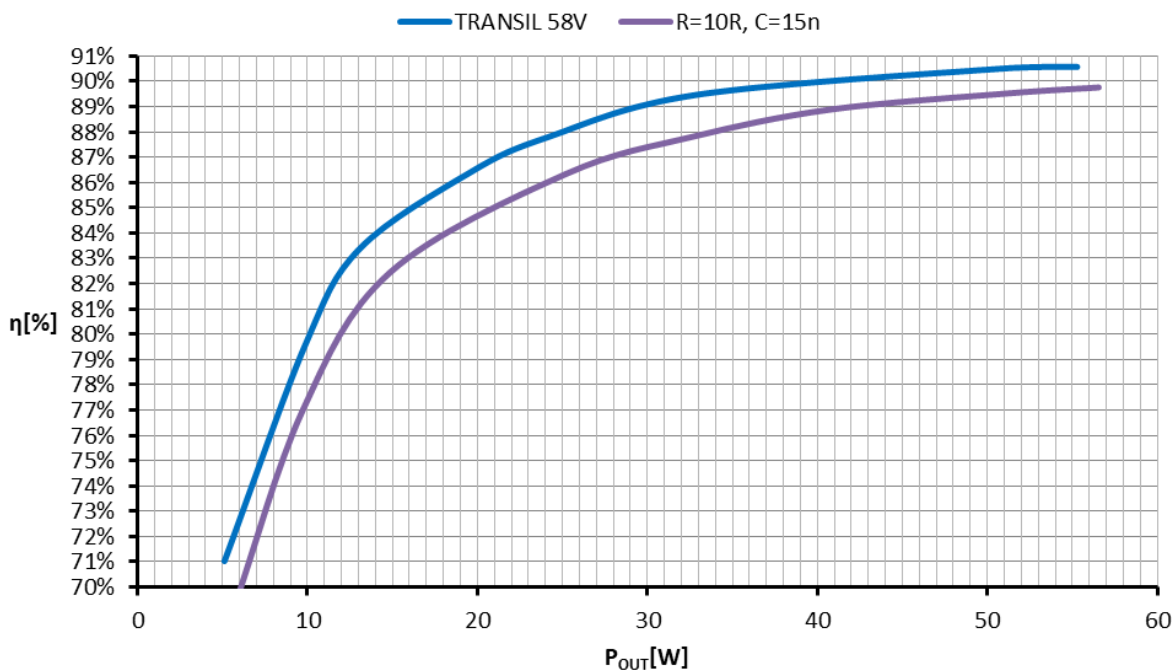
Proudy a napětí na vstupu a výstupu systému jsou měřeny pomocí dvojice voltmetrů a ampérmetrů zapojených podle následujícího schématu.



Obr.č.35: Schéma zapojení pro měření účinnosti systému

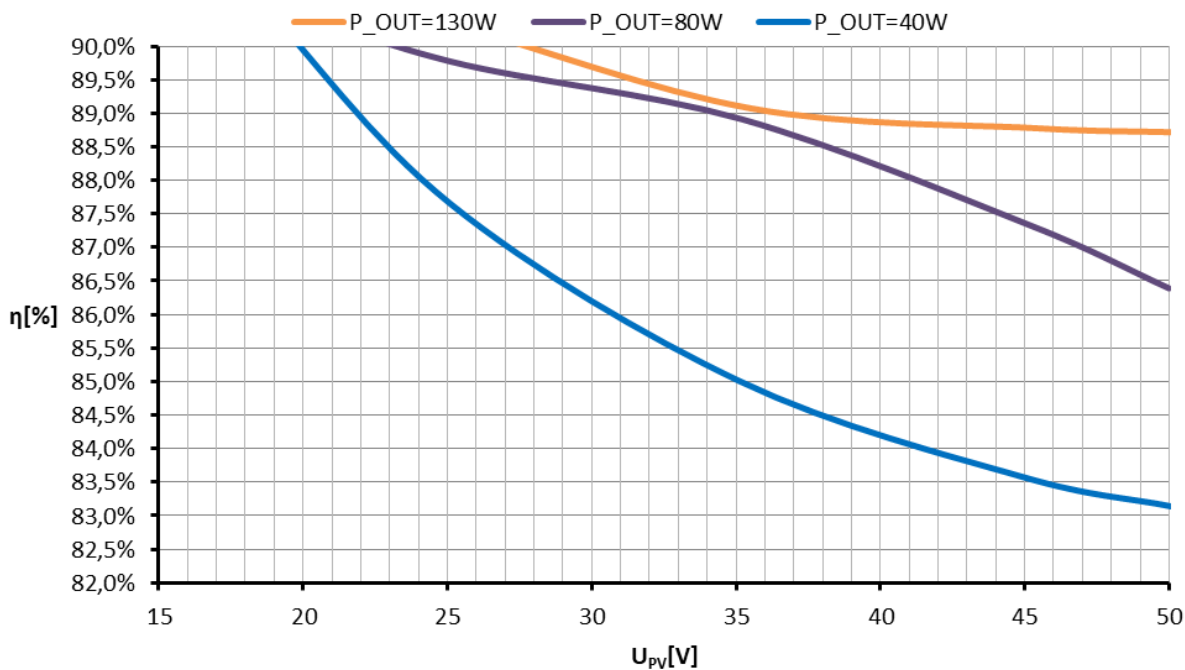
Napětí jsou měřena přímo na svorkách systému. Ve finální aplikaci je účinnost nižší, protože fotovoltaický panel, akumulátor a spotřebič se připojuje prostřednictvím vodičů, na kterých budou vznikat odporové ztráty. Pro jejich minimalizaci je vhodné používat co možná nejkratší vodiče s dostatečně velkým průřezem.

Všechna měření probíhala za výstupního napětí 13,6 V, což je hodnota pro udržovací režim akumulátoru. Změnou hodnoty odporu  $R_Z$  se mění i procházející proud, a tedy i zatěžovací výkon.



Obr.č.36: Účinnost systému v závislosti na výstupním výkonu při  $U_{IN}=18$  V,  $U_{OUT}=13,6$  V

Spínací tranzistory snižujícího měniče T4, T5 mají na přechodech D-S maximální povolené napětí 100 V. Pro omezení napěťových špiček byly využity RC články o hodnotách  $R=10 \Omega$  a  $C=15$  n. Nevýhodou je, že redukují i špičky, které nedosahují 100 V a snižují tak účinnost. R–C články byly pro zvýšení účinnosti nahrazeny obousměrnými 58 V transily, které pohlcují pouze špičky nebezpečné pro MOSFET tranzistory. Na Obr.č.36 je pro porovnání vynesena účinnost s R–C články a transily. Nižší účinnost v oblasti nižších výkonů je dána vlastní spotřebou systému.



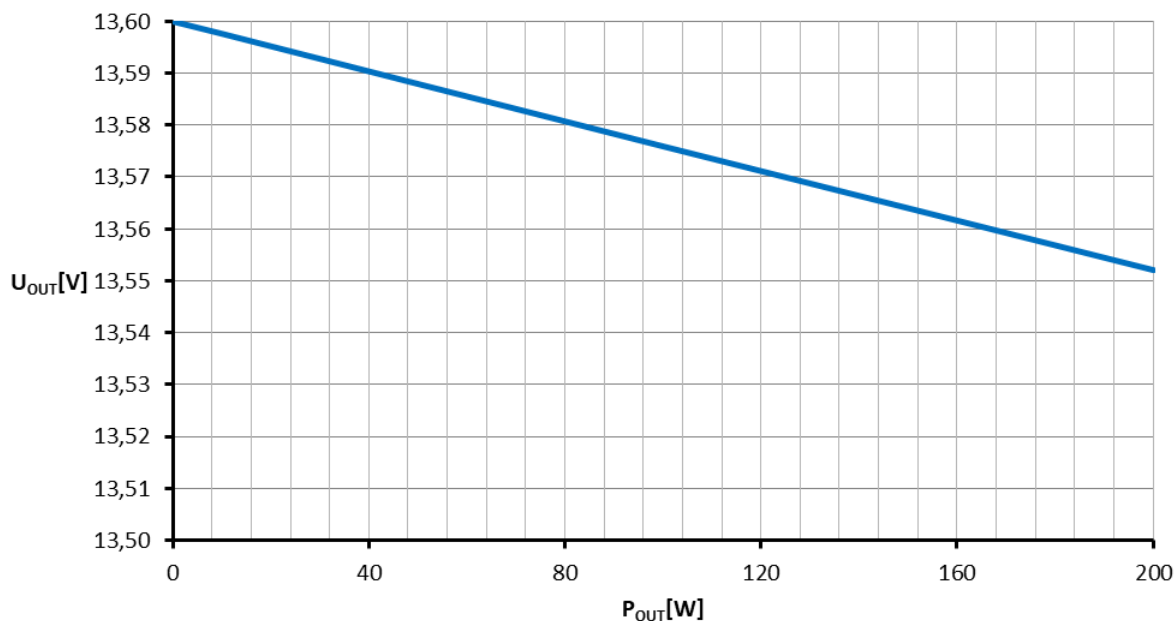
Obr. č. 37: Účinnost systému v závislosti na vstupním napětí při  $U_{OUT}=13,6V$

Při výstupním výkonu 130 W a maximálním převodním poměru dosahuje účinnost 88,7 %. Při nižším poměru samozřejmě účinnost roste. Jmenovité napětí fotovoltaických panelů o 60 článcích se pohybuje okolo 32 V. Účinnost pro taková vstupní napětí při výkonu 130 W přesahuje 89 %.

Po dobu cca 40 minut byla otestována 174 W spotřebič při  $U_{IN} = 44,5 V$ ,  $U_{OUT}=13,6 V$ . Účinnost byla 87,5 %. Po cca 30 minutách byla bez spuštěného ventilátoru teplota chladiče 36 °C. Při spuštění ventilátoru na 10% otáčky začínala teplota klesat. Po krátkou dobu byl otestován 200 W spotřebič při  $U_{IN}=50,6 V$ . Naměřená účinnost odpovídala 86,8 %.

## 8.2 Stabilita výstupního napětí

Pro nabíjení olověných akumulátorů je důležité nepřesáhnout doporučené nabíjecí napětí stanovené výrobcem. V opačném případě se zkracuje životnost akumulátoru.



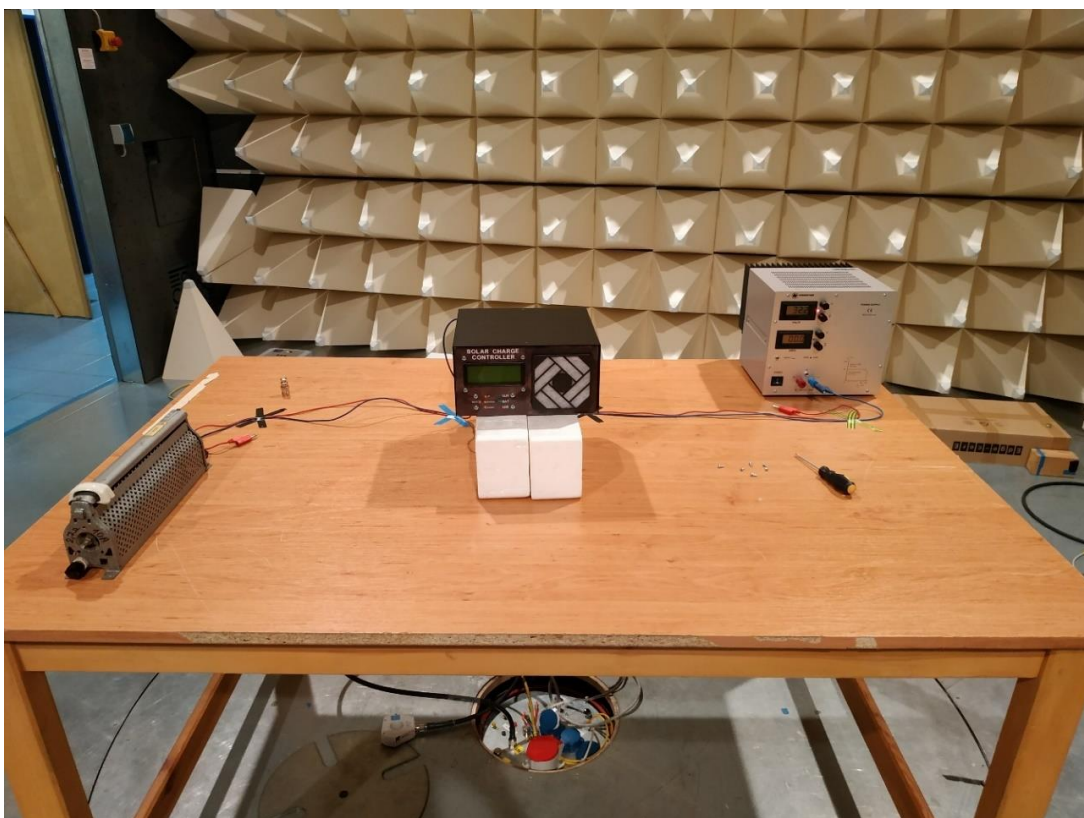
Obr.č.38: Stabilita výstupního napětí při různém výstupním výkonu

V průběhu měření účinnosti systému bylo nastaveno výstupní napětí na 13,6 V. Při testovaném výkonu 200 W je napětí na výstupu o 50 mV nižší než požadované. Tento pro akumulátor zanedbatelný úbytek způsobuje zejména bočník skládající se z R33, R34, R35 a tranzistor T9. Při dokončování nabíjení nabíjecí výkon akumulátorem klesá a v konečné fázi bude na akumulátoru přesně požadované napětí. Úbytek napětí nepřesáhl 50 mV ani při různých vstupních napětích.

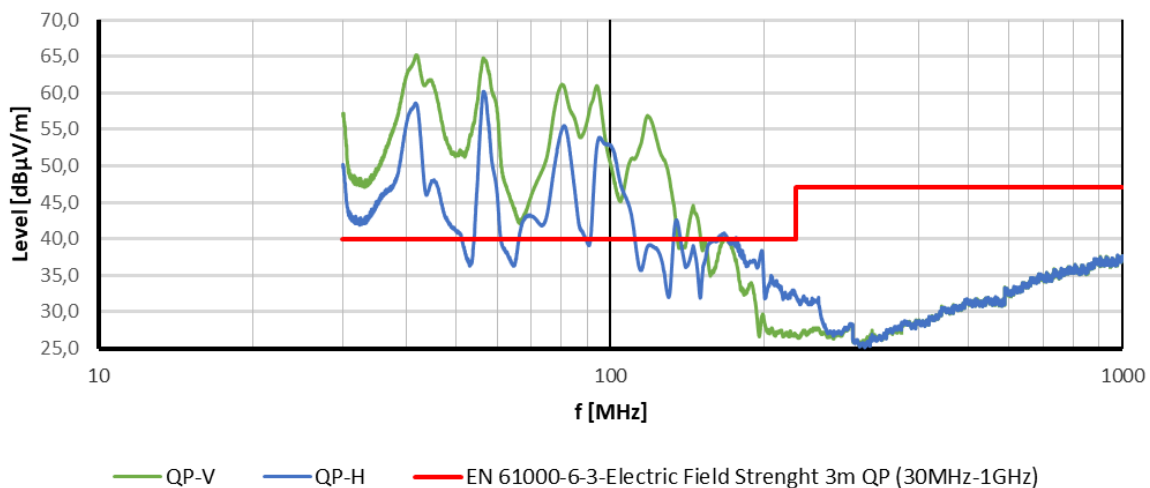
### 8.3 Měření emisí

Měření emisí probíhalo v bezodrazové komoře budovy FEL dle požadavků normy ČSN EN 61000-6-3 a ČSN EN 61000-6-4. Měnič pracoval do odporové zátěže se vstupním napětím 32 V a vstupním odebíraným výkonem 70 W. Z Obr.č.40 je patrné překročení limitu elektrického pole stanoveného normou, a to do 200 MHz až o 25 dB ve špičce. Měnič na svém vstupu neměl připojený EMI filtr. V dalším testu bylo po uzemnění konstrukčního boxu naměřeno překročení limitu elektrického pole do 200 MHz o 20 dB ve špičce. Při uzemnění konstrukčního boxu je tedy zlepšení o 5 dB. Naměřené hodnoty se od sebe nelišily ani při zvýšení zatěžovacího výkonu, a to na 150 W.

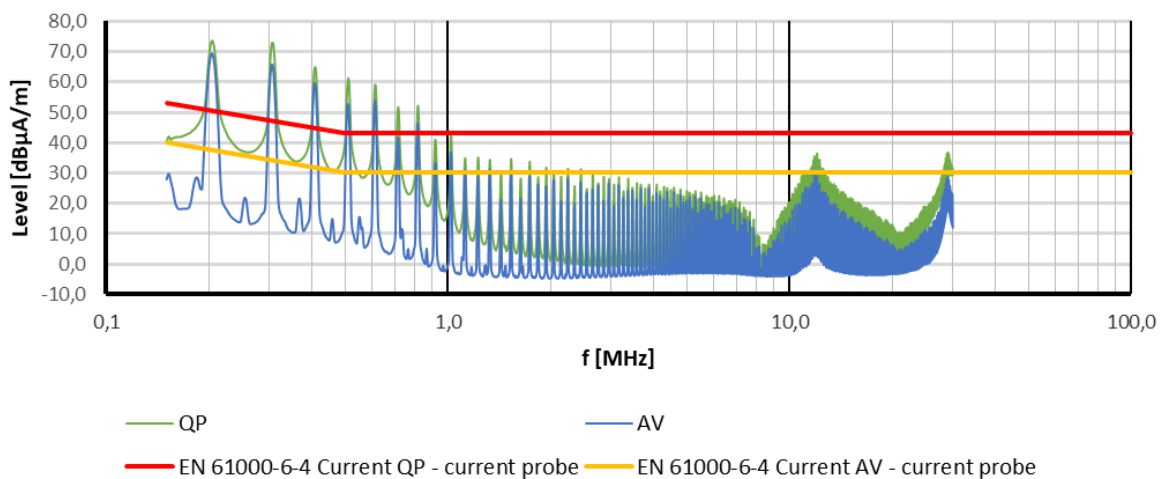
Konduktivní emise byly měřeny proudovou sondou na kladných, záporných a obou vodičích pro solární panel, baterii a odporovou zátěž. Naměřené hodnoty znázorňují grafy na Obr.č.41, Obr.č.42 a Obr.č.43. Nízké Konduktivní emise znázorňující Obr.č.42 způsobuje filtr tvořený indukčností L3 a kapacitami C63 a C64 sloužící primárně pro snížení strmosti náběhu proudu v případě zkratu na výstupních svorkách. Hodnoty na záporných vodičích jsou podobné s hodnotami na vodičích kladných. Z toho důvodu nebyly v této kapitole vyobrazeny.



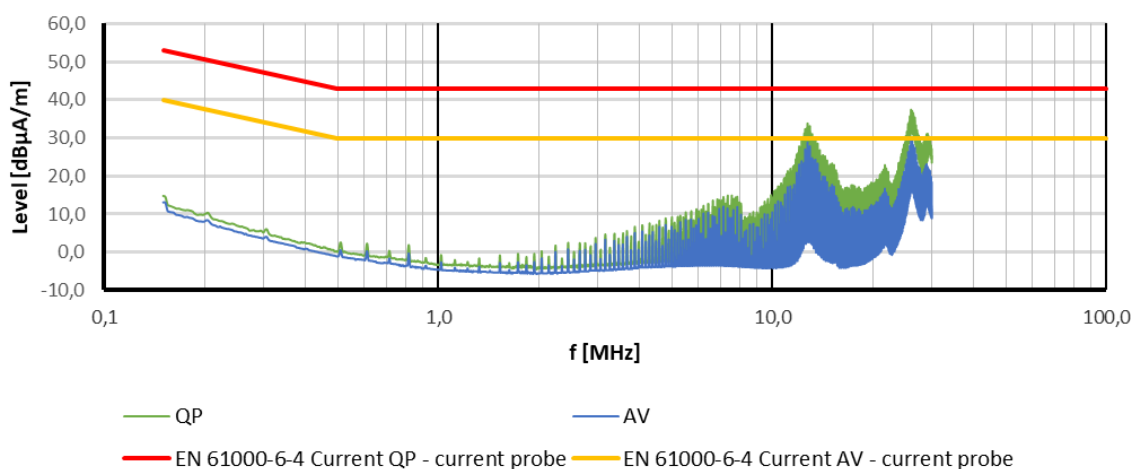
Obr.č.39: Příprava systému k testování



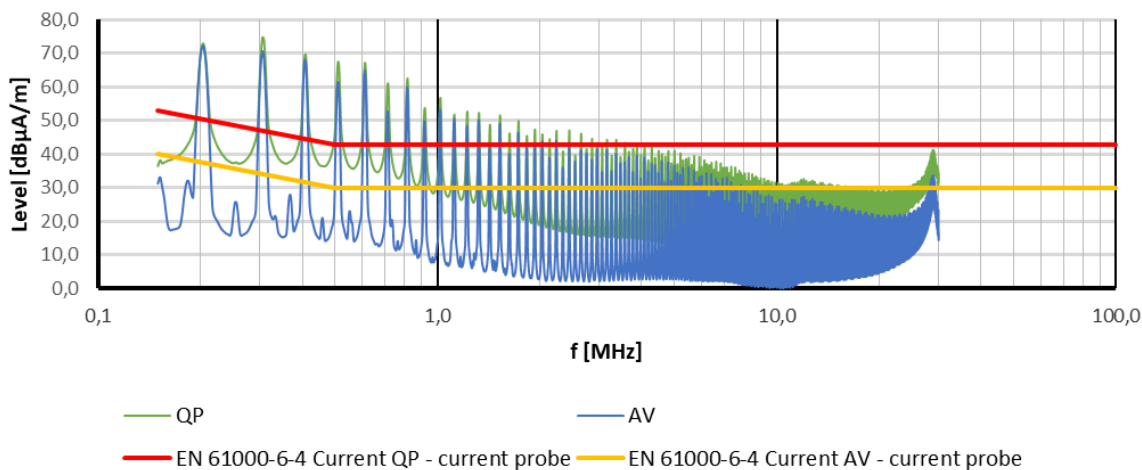
Obr.č.40: Měření intenzity elektrického pole pomocí antén v rozsahu 30 MHz – 1GHz



Obr.č.41: Měření konduktivních emisí proudovou sondou v rozsahu 150kHz – 30MHz (+SOL)

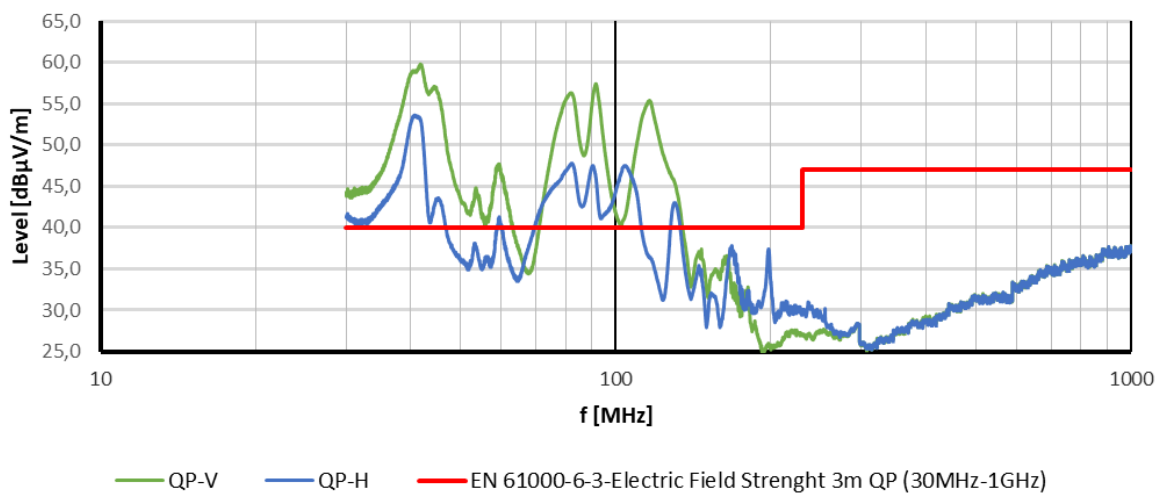


Obr.č.42: Měření konduktivních emisí proudovou sondou v rozsahu 150kHz – 30MHz (+OUT)



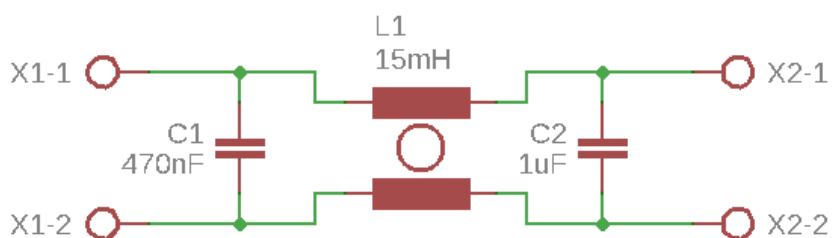
Obr.č.43: Měření konduktivních emisí proudovou sondou v rozsahu 150 kHz – 30 MHz (+BAT)

Vliv na elektromagnetické vyzařování má rychlost spínání měniče, pro zpomalení rychlosti byly rezistory R17 a R20 o původní hodnotě  $4,7 \Omega$  nahrazeny hodnotou  $12 \Omega$ . Výsledkem je menší naměřená intenzita elektrického pole dle Obr.č.44. Naměřené hodnoty konduktivních emisí se zlepšily jen nepatrně.

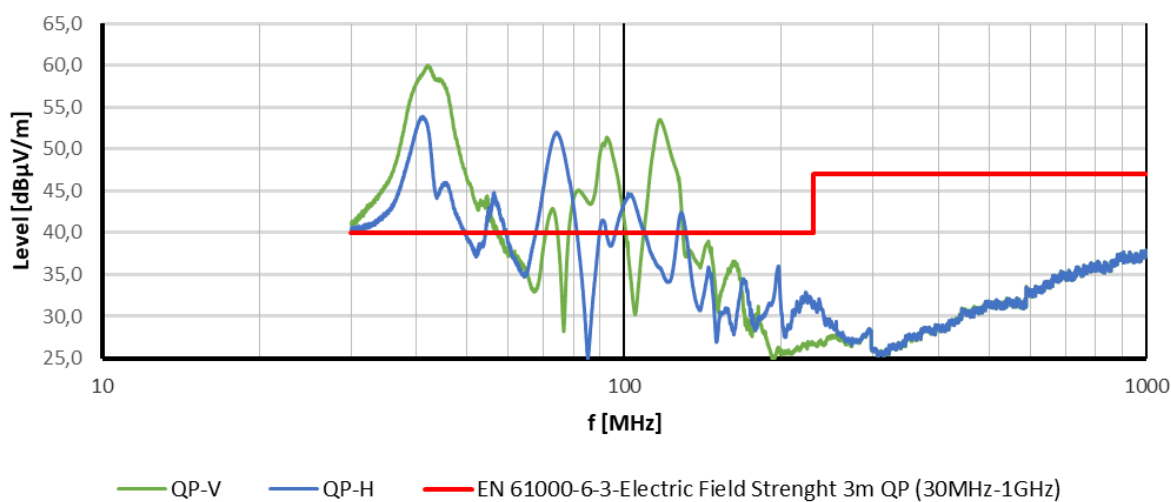


Obr.č.44: Měření intenzity elektrického pole pomocí antén v rozsahu 30 MHz – 1 GHz s  $R_G=12 \Omega$

Dalším krokem k potlačení emisí bylo připojení EMI filtru ke vstupu určeného pro připojení fotovoltaického panelu. Filtr se skládal z kapacity o hodnotě 470 nF, tlumivky pro potlačení souhlasného rušení o hodnotě 15 mH a kapacity 1  $\mu$ F. Měření intenzity elektrického pole neukazuje výraznější změnu (viz. Obr.č.46) avšak konduktivní emise na vodičích solárního panelu byly značně potlačeny (viz. Obr.č.47).

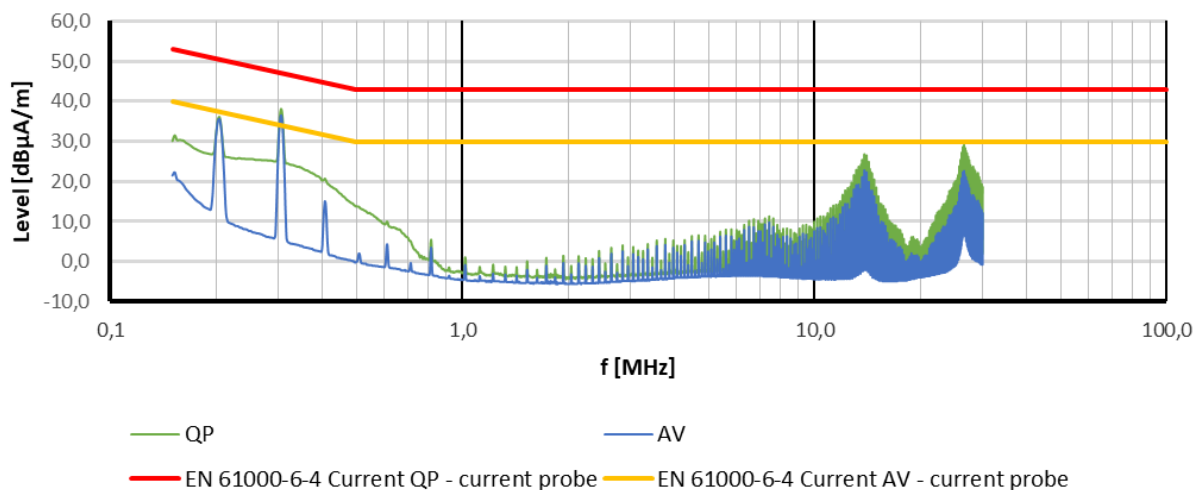


Obr.č.45: Schéma EMI filtru

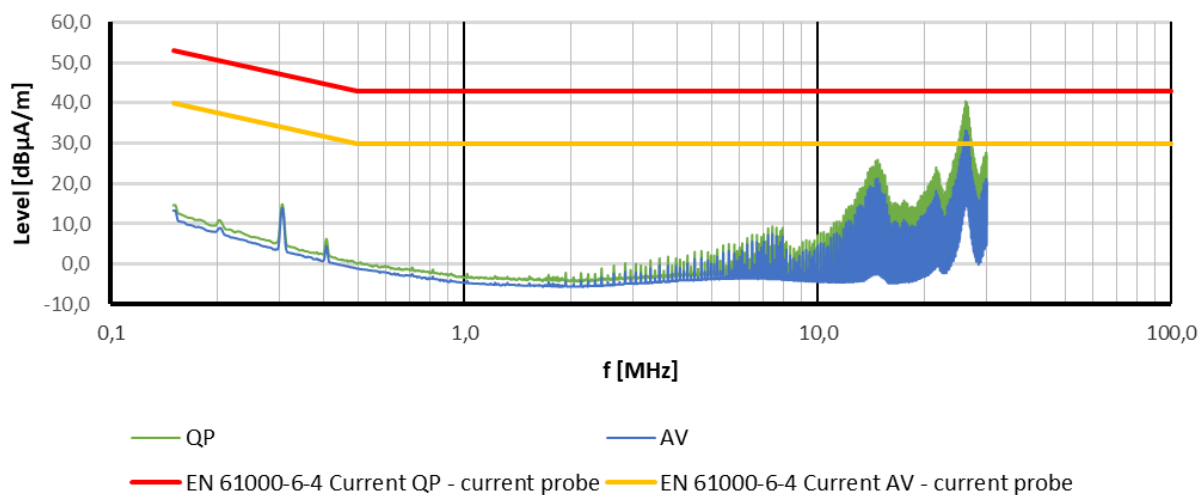


Obr.č.46: Měření intenzity elektrického pole pomocí antén v rozsahu 30 MHz – 1 GHz s  $R_G=12 \Omega$  a filtrem

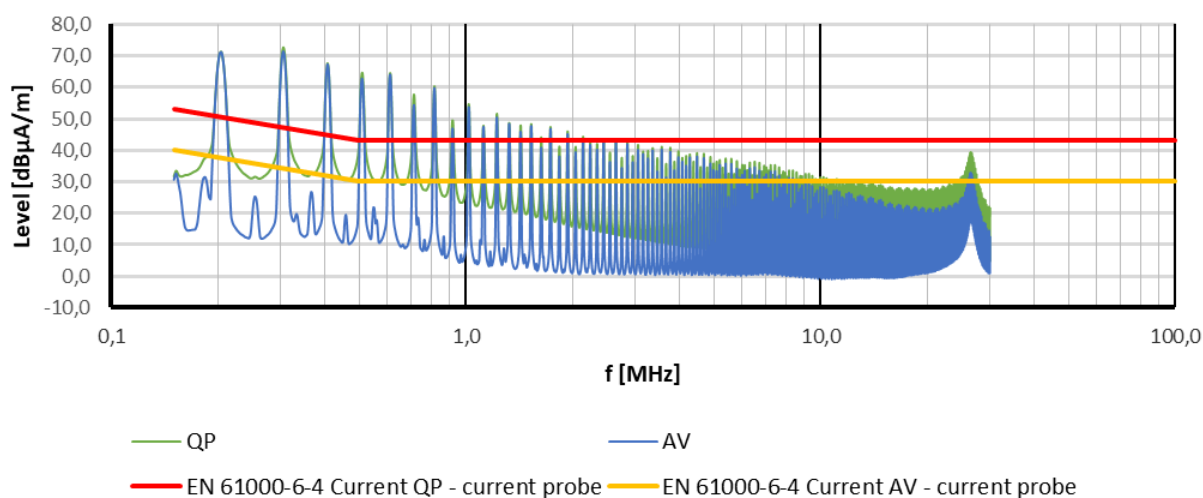




Obr.č.47: Měření konduktivních emisí proudovou sondou v rozsahu 150 kHz – 30 MHz (+SOL) s  $R_G=12 \Omega$  a filtrem

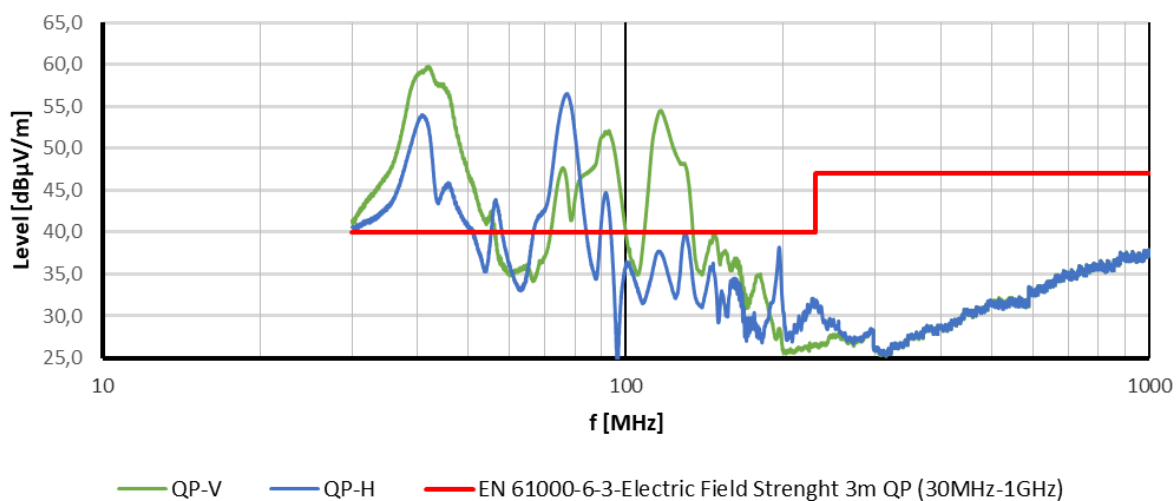


Obr.č.48: Měření konduktivních emisí proudovou sondou v rozsahu 150 kHz – 30 MHz (+OUT) s  $R_G=12 \Omega$  a filtrem

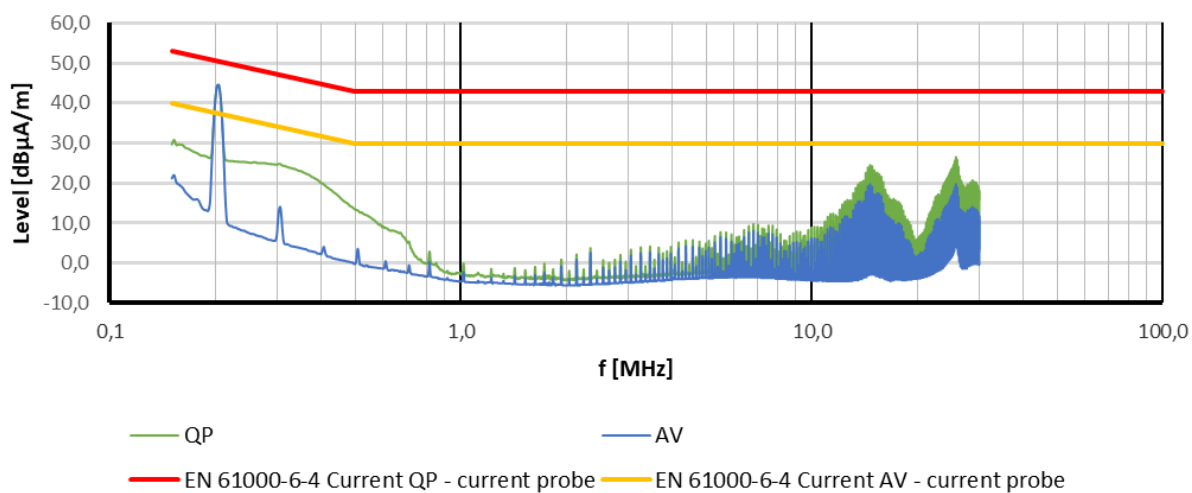


Obr.č.49: Měření konduktivních emisí proudovou sondou v rozsahu 150 kHz – 30 MHz (+BAT) s  $R_G=12 \Omega$  a filtrem

Poslední měření probíhalo za připojení 2,2  $\mu\text{F}$  kapacity k výstupu EMI filtru. Při měření intenzity elektrického pole nebylo zaznamenáno významnější potlačení. Druhá špička v průběhu AV z Obr.č.47 byla po použití kapacity potlačena (viz. Obr.č.51).



Obr.č.50: Měření intenzity elektrického pole pomocí antén v rozsahu 30 MHz – 1 GHz s  $R_G=12 \Omega$  a filtrem s přidanou 2,2  $\mu\text{F}$  kapacitou



Obr.č.51: Měření konduktivních emisí proudovou sondou v rozsahu 150 kHz – 30 MHz (+SOL) s  $R_G=12 \Omega$  a filtrem s přidanou 2,2  $\mu\text{F}$  kapacitou

Konduktivní emise by se daly poměrně účinně omezit za použití vhodných filtrů umístěných uvnitř konstrukčního boxu, připojených mezi systém – fotovoltaický panel, systém – baterie a systém – spotřebič. Pro potlačení generovaného elektrického pole by bylo zapotřebí minimalizovat otvory v konstrukčním boxu, a to zejména otvory pro displej a ventilátor. Popřípadě je možné stínit tlumivku snižujícího měniče např. hliníkovým plechem. Dobrou volbou je i použití feritových filtrů. Po jejich použití bylo zaznamenáno značné potlačení elektrického pole, avšak špička v oblasti 40 MHz byla potlačena jen zhruba o 0,5 dB. Možností je i další zvýšení  $R_G$ . Změnou  $R_G$  ze  $4,7 \Omega$  na  $12 \Omega$  se účinnost snížila jen minimálně, avšak s narůstajícím se  $R_G$  by účinnost klesala. Zvýšením  $R_G$  na hodnotu, kdy se ještě účinnost pohybuje v rozumných hodnotách by jistě napomohlo ke snížení emisí.

## 9 Závěr

Byl navržen funkční prototyp měniče pro malou solární elektrárnu. Při maximálním otestovaném výstupním výkonu 200 W se vstupním napětí 50,6 V dosahuje účinnost systému až 86,8 %. Zvýšení účinnosti lze docílit náhradou diody D7 za např. SBR40U100CT, která má až o 100 mV nižší úbytek napětí. Pokles výstupního napětí při odebíraném výkonu 200 W odpovídá cca 50 mV. Při zatěžovacím výkonu nad 240 W o vstupním napětí 50 V se začíná vyskytovat problém s občasným zastavením programu mikrokontroléru, který lze vyřešit pouze jeho restartováním, proveditelným např. časovačem watchdog. Příčina doposud nebyla lokalizována, ale zřejmě jsou důvodem vyzařované emise. Byla otestována ochrana proti přetížení a zkratu, která pracuje bez problému. Při poklesu napětí pod 10,7 V se odpojí spotřebič, aby nebyla baterie vybíjena pod kritickou mez. V případě chybné činnosti programu či mikrokontroléru by mohlo výstupní napětí dosáhnout nebezpečné úrovně. Z tohoto důvodu byla implementována hardwarová ochrana, která při překročení výstupního napětí (cca 15 V) provede restart mikrokontroléru. Výstupní napěťovou hranici pro restart mikrokontroléru lze nastavit odporovým trimrem R25. Tepelná ochrana funguje správně. Při překročení 35 °C spustí ventilátor, jehož otáčky se zvyšující se teplotou zvyšují a při překročení 80 °C vypíná snižující měnič, který je hlavním zdrojem tepla. Žádný z algoritmů MPPT nebyl doposud implementován. Měnič pro malou solární elektrárnu je po hardwarové stránce v pořádku a v současné době probíhají práce na softwaru. Práce zahrnují implementování nových funkcionalit včetně MPPT a vyladování funkcionalit současných. Při měření vyzařovaných emisí a emisí šířených vedením byla překročena limita dle normy ČSN EN 61000-6-3. Pro snížení vyzařovaných emisí by bylo nutné provést úpravy, popsané v kapitole 8.3. Ve volných a vázaných přílohách jsou umístěna kompletní schémata měniče pro malou solární elektrárnu. Tato diplomová práce bude využívána spolu s bakalářskou prací, zabývající se návrhem jednofázového střídače 12 VDC/230 VAC, 50 Hz s výstupním výkonem do cca 300 W a napětím tvaru modifikované sinusoidy. Kombinací těchto dvou prací vznikne malá solární elektrárna schopná napájet elektrická zařízení požadující 230 V do výkonu okolo 300 W.



Obr.č.52: Zkompletované zařízení měniče pro malou solární elektrárnu



Obr.č.53: Zkompletované zařízení jednofázového střídače 12 VDC/230 VAC, 50 Hz (bakalářská práce)

## 10 Zdroje

- [1] Solar resource maps and GIS data for 180+ countries | Solargis. *Bankable solar data for better decisions | Solargis* [online]. Copyright © 2019 The World Bank, Dostupné z: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download>
- [2] Můj Dům | Vše, co chcete vědět o solárních panelech. *Můj Dům | Stavíme Zařizujeme Bydlíme* [online]. Dostupné z: [https://www.mujdum.cz/rubriky/stavba/vse-co-chnete-vedet-o-solarnich-panelech\\_2310.html](https://www.mujdum.cz/rubriky/stavba/vse-co-chnete-vedet-o-solarnich-panelech_2310.html)
- [3] Panely – WATTcontrol. *WATTcontrol – Fotovoltaika není drahá!* [online]. WATTcontrol. Dostupné z: <https://www.wattcontrol.cz/panely/>
- [4] Němečtí vědci vyvinuli solární článek s rekordní účinností. *oEnergetice.cz - denní zpravodajství z energetiky* [online]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/nemecko/nemecti-vedci-vyvinuli-solarni-clanek-rekordni-ucinnosti>
- [5] Ecoprodukt.cz-Ekologické produkty, šetření energie. *Ecoprodukt.cz-Ekologické produkty, šetření energie* [online]. Dostupné z: <https://www.ecoprodukt.cz/>
- [6] Solární panely, regulátory a baterie – jak se v tom vyznat? | Nomádem.cz. *Nomádem.cz - Malá i velká obytná auta prakticky* [online]. GeoModel Solar s.r.o. Dostupné z: <https://nomadem.cz/solarni-panely-a-regulatory>
- [7] MARCONI, *Skoro vše o akumulátorech a nabíjení: Aneb letem světem startovacích akumulátorů* [online], 2008, příručka
- [8] HAMMERBAUER, Jiří. *Elektronické napájecí zdroje a akumulátory*. Vyd. 2. Plzeň: Západočeská univerzita, 1998. ISBN 80-7082-411-5
- [9] Olověné akumulátory a nabíječky - jak vybrat, jak nabíjet, údržba akumulátorů - Novinky - Antény, satelity, kamery, elektro – ATOS spol. s r.o.. *Antény, satelity, kamery, elektro – ATOS spol. s.r.o.* [online]. Dostupné z: <http://atoselektro.cz/cz/novinky/146-olovene-akumulatory-a-nabijecky-jak-vybrat-jak-nabijet-udrzba-akumulatoru.html>
- [10] Konstrukce, provoz a údržba akumulátorů aneb prodlužte životnost vaší baterie | Stavební technika. *Stavební technika* [online]. Dostupné z: <https://www.stavebni-technika.cz/clanky/konstrukce-provoz-a-udrzba-akumulatoru-aneb-prodluzte-zivotnost-vasi-baterie>

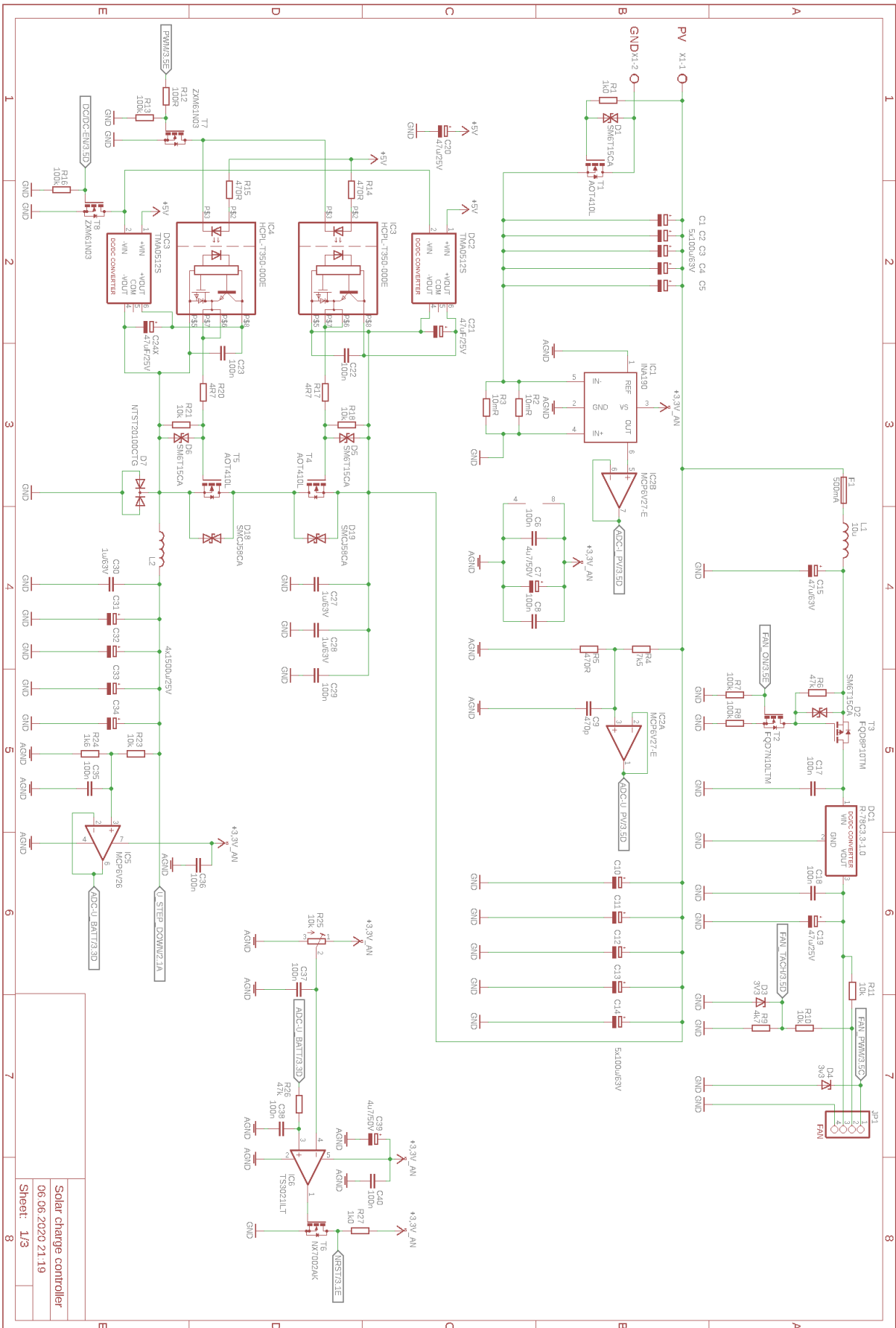
- [11] *Střední škola automobilní* [online]. Dostupné z: [https://www.skola-auto.cz/wp-content/uploads/2019/06/Lux\\_Akumulator-druhy.pdf](https://www.skola-auto.cz/wp-content/uploads/2019/06/Lux_Akumulator-druhy.pdf)
- [12] *Autobaterie, motobaterie, akumulátory a články všeho druhu | battery.cz* [online]. Dostupné z: <https://www.battery.cz>
- [13] *AtosElektro.cz. AtosElektro.cz* [online]. Dostupné z: <https://shop.atoselektro.cz>
- [14] LINEAR TECHNOLOGY. Datasheet LTC6102 [online]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/6102fe.pdf>
- [15] TEXAS INSTRUMENTS. Datasheet INA190. 2019. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/sbos871/sbos871.pdf>
- [16] ST. Datasheet STM32F411. 2017. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f411re.pdf>
- [17] ZÁHLAVA, Vít. *Metodika návrhu plošných spojů*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02193-9
- [18] MICROMETALS. IRON POWDER CORES FOR POWER CONVERSION CATALOG – ISSUE L 2007. Dostupné z: <https://www.micrometals.com/design-and-applications/literature/>
- [19] Elektronické díly. Distributor a obchod online - Transfer Multisort Elektronik. *Redirecting to /cz/* [online]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/>
- [20] ROHM SEMINDUCTOR. *Inductor Calculation for Buck Converter IC*. Dostupné z: [http://rohms.rohm.com/en/products/databook/applinote/ic/power/switching\\_regulator/inductor\\_calculation\\_appli-e.pdf](http://rohms.rohm.com/en/products/databook/applinote/ic/power/switching_regulator/inductor_calculation_appli-e.pdf)
- [21] NOVOTNÝ, Vlastislav, Pavel VOREL a Miroslav PATOČKA. *Napájení elektronických zařízení: přednášky*. Brno: Vysoké učení technické, 2002. ISBN 80-214-2300-5
- [22] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje*. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-86056-91-0
- [23] Basic Calculation of a Buck Converter's Power Stage | Richtek Technology. *Richtek Technology* [online]. Copyright © 2019 Richtek Technology Corporation. All Rights Reserved. Dostupné z: [https://www.richtek.com/Design%20Support/Technical%20Document/AN041?sc\\_lang=zh-TW](https://www.richtek.com/Design%20Support/Technical%20Document/AN041?sc_lang=zh-TW)
- [24] TEXAS INSTRUMENTS. *Basic Calculation of a Buck Converter's Power Stage*. 2011. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/slva477b/slva477b.pdf>



- [25] ALPHA & OMEGA SEMINDUCTOR. *Datasheet AOT410L*. Dostupné z: <http://www.aosmd.com/pdfs/datasheet/aot410l.pdf>
- [26] INFINEON. *Datasheet IRLB3034PbF*. Dostupné z: <https://www.infineon.com/dgdl/irlb3034pbf.pdf?fileId=5546d462533600a40153566027b22585>
- [27] ROHM SEMINDUCTOR. *Calculation for Power Loss*. Dostupné z: [https://d1d2qsbl8m0m72.cloudfront.net/en/products/databook/applinote/ic/power/switching\\_regulator/power\\_loss\\_appli-e.pdf](https://d1d2qsbl8m0m72.cloudfront.net/en/products/databook/applinote/ic/power/switching_regulator/power_loss_appli-e.pdf)
- [28] DISPLAY ELEKTRONIK. *Datasheet DEM 20485*. Dostupné z: <https://www.display-elektronik.de/filter/DEM20485SYH-LY-CYR22.pdf>
- [29] *Brunel University Research Archive: Home* [online]. Dostupné z: <https://bura.brunel.ac.uk/bitstream/2438/11103/1/Fulltext.pdf>
- [30] Overview of Maximum Power Point Tracking Control Methods for PV Systems  
Dostupné z: [https://file.scirp.org/pdf/JPEE\\_2014082811233330.pdf](https://file.scirp.org/pdf/JPEE_2014082811233330.pdf)

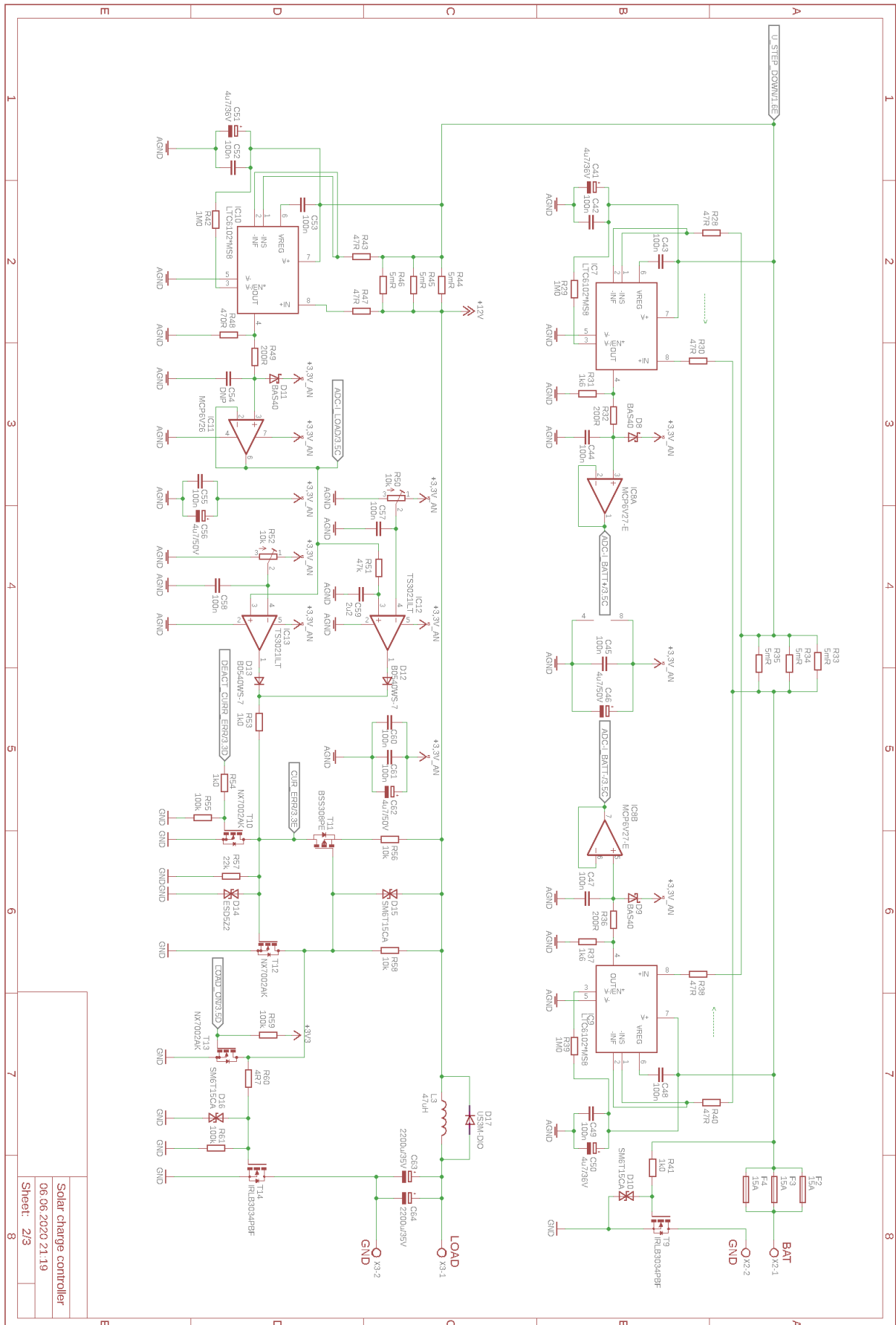


Příloha A



Solar charge controller  
06.06.2020 21.19  
Sheet: 1/3

Příloha B



Solar charge controller	
06.06.2020 21.19	
Sheet: 2/3	

# Příloha C

