

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2019

Martin Špina



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

MĚNIČ NAPĚTÍ S MPPT ALGORITMEM PRO SOLÁRNÍ ČLÁNEK

VOLTAGE CONVERTER WITH MPPT ALGORITHM FOR SOLAR CELL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Špina

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Huták, Ph.D.

BRNO 2019



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Martin Špina

ID: 186208

Ročník: 3

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Měnič napětí s MPPT algoritmem pro solární článek

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Navrhnete a odsimulujete vhodný řídicí algoritmus v programu MATLAB-Simulink.
2. Realizujete navržený regulátor ve formě funkčního vzorku.
3. Vlastnonsti regulátoru ověřte měřením.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Skalický, J.: Teorie řízení, skripta FEKT, 2002
- [2] Patočka M.: Vybrané statě z výkonové elektroniky, sv.1. Skriptum, FEKT, VUT Brno.
- [3] Patočka M.: Vybrané statě z výkonové elektroniky, sv.2. Skriptum, FEKT, VUT Brno.

Termín zadání:

Termín odevzdání:

Vedoucí práce: Ing. Petr Huták, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá konstrukcí solárního nabíječe lithium iontových akumulátorů využívající mikrokontrolér, který řídí DC/DC měnič nabíjející akumulátor. Řídící algoritmus je navržen tak, aby nabíječ využíval bod maximálního výkonu solárního fotovoltaického panelu a tím byla zajištěna maximální účinnost bez ohledu na změnu intenzity osvětlení nebo teploty.

KLÍČOVÁ SLOVA

Solární nabíječ, MPPT, Mikrokontrolér, DC/DC měnič, Li-ion, MPPT, Hledání bodu maximálního výkonu

ABSTRACT

This thesis deals with design of solar lithium ion battery charger using microcontroller controlled step down DC/DC converter. Control algorithm is designed to utilize most of the energy coming from the solar photovoltaic panel, by using maximum power point tracking technology. This makes it as efficient as possible at any irradiation intensity level or temperature.

KEYWORDS

Solar battery charger, MPPT, Microcontroller, DC/DC converter, Li-ion, Maximum Power Point Tracking

ŠPINA, Martin. *Měnič napětí s MPPT algoritmem pro solární články*. Brno, 2019, 63 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce: Ing. Petr Huták, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Měnič napětí s MPPT algoritmem pro solární články“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Petru Hutákovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora

Obsah

1	Úvod	10
2	Teoretický úvod	11
2.1	Obnovitelné zdroje energie	11
2.1.1	Solární fotovoltaické elektrárny.....	11
2.1.2	Větrné elektrárny	12
2.1.3	Vodní elektrárny	12
2.2	Fotovoltaický článek.....	12
2.2.1	Zajímavé typy fotovoltaických článků	13
2.2.1.1	CdTe fotovoltaické články.....	13
2.2.1.2	GaAs tenkostěnné fotovoltaické solární články.....	13
2.2.2	Křemíkové fotovoltaické solární články.....	13
2.2.2.1	Monokrystalické Si FV články	13
2.2.2.2	Polykrystalické Si FV články	14
2.2.2.3	Amorfní Si FV články	14
2.3	Fotovoltaický solární panel.....	15
2.4	Akumulátory elektrické energie.....	16
2.4.1	Olověný akumulátor	17
2.4.2	Akumulátory na bázi niklu	17
2.4.3	Lithiové akumulátory.....	18
2.5	MPPT	20
2.5.1	Perturb and Observe.....	20
2.5.2	Incremental Conductance	21
2.5.3	Current sweep	21
2.5.4	Constant Voltage	22
2.5.5	Open Voltage	22
3	Vlastní řešení problému	23
3.1	Koncepce	23
3.2	Řídící část	23
3.2.1	ESP32	24

3.3	Algoritmus MPPT.....	24
3.3.1	Schéma zapojení řídicí části	26
3.4	Výkonová část	27
3.5	Akumulátor	30
3.6	Ověření řešení v prostředí MATLAB-Simulink.....	31
4	Praktická realizace	37
4.1	Návrh obvodového řešení v prostředí ECAD.....	37
4.2	Návrh desky plošných spojů.....	38
4.3	Osazení součástkami.....	39
4.4	Program mikrokontroléru	40
4.5	Oživení a experimentální měření.....	42
4.5.1	Oživení.....	42
4.5.2	Měření měniče v laboratorních podmínkách	43
4.5.3	Praktický test	48
5	Závěr	49
	Literatura.....	51
	Seznam symbolů, veličin a zkratk.....	54
	Přílohy.....	56

Seznam obrázků

Obrázek 2-1 Struktura amorfního více-přechodového křemíkového článku [7].....	14
Obrázek 2-2 Delaminace a koroze FV panelu [9]	16
Obrázek 2-3 Princip funkce Li-ion akumulátoru [12]	19
Obrázek 2-4 Vznik oscilace výstupního výkonu [16]	21
Obrázek 3-1 Blokové schéma	23
Obrázek 3-2 Vývojový diagram algoritmu P&O [19].....	25
Obrázek 3-3 Zapojení řídicí části.....	27
Obrázek 3-4 Zapojení propustného měniče [20]	27
Obrázek 3-5 Parametry snižujícího měniče [21]	28
Obrázek 3-6 Zapojení výkonové části měniče.....	29
Obrázek 3-7 Zapojení obvodu LT8650S	29
Obrázek 3-8 Akumulátor LG MH1 [21].....	30
Obrázek 3-9 Parametrizace bloku Solar Cell.....	32
Obrázek 3-10 Parametrizace bloku Battery	33
Obrázek 3-11 Model průběhu intenzity osvětlení během dne	33
Obrázek 3-12 Kompletní model řešení	34
Obrázek 3-13 Vnitřní schéma bloku MPPT [31].....	34
Obrázek 3-14 Zjednodušené schéma principu bloku MPPT	35
Obrázek 3-15 Výsledek simulace – napětí na panelu a střída	35
Obrázek 3-16 Detail měnící se střídavy měniče	36
Obrázek 4-1 Osazená deska.....	40
Obrázek 4-2 P&O implementace v Arduino IDE.....	41
Obrázek 4-3 Parametry testovacího solárního FV panelu	43
Obrázek 4-4 Laboratorní měření.....	44
Obrázek 4-5 Průběh proudu Out (žlutá) a PWM (modrá)	44
Obrázek 4-6 Průběh proudu In (žlutá) a PWM (modrá).....	45
Obrázek 4-7 Průběh úbytku na bočníku Out (žlutá) a PWM (modrá).....	45
Obrázek 4-8 Průběh úbytku napětí In (žlutá) a PWM (modrá)	46
Obrázek 4-9 Průběh napětí na gate horního tranzistoru (žlutá) a PWM (modrá).....	46
Obrázek 4-10 Průběh napětí gate spodního tranzistoru (žlutá) a PWM (modrá)	47

Obrázek 4-11 Praktické měření	48
Obrázek 5-1 Pohled na PCB top	56
Obrázek 5-2 Pohled na PCB bottom.....	56
Obrázek 5-3 PCB – top (měď).....	57
Obrázek 5-4 PCB – bottom (měď).....	58
Obrázek 5-5 PCB – rozmístění součástek.....	59
Obrázek 5-6 Schéma strana 1	60
Obrázek 5-7 Schéma strana 2	61
Obrázek 5-8 Schéma strana 3	62
Obrázek 5-9 Obsah přiloženého CD.....	63

1 ÚVOD

Obnovitelné zdroje energie jsou dnes velkým a často diskutovaným tématem v souvislosti odklonu od standardních zdrojů elektrické energie a fotovoltaika se stává stále významější komponentou energetického mixu na celém světě. Proto si tato práce si klade za cíl navrhnout vhodné řešení solární nabíječky akumulátoru využívající mikrokontrolér na platformě ESP32 a jím řízený snižující synchronní napěťový měnič s tranzistory MOS-FET sloužící ke konverzi napětí solárního panelu na napětí lithium iontového akumulátoru sloužícího k uchování energie dodané ze solárního fotovoltaického panelu během doby, kdy je osvětlen slunečním světlem.

Řešením se myslí několik kroků a to zejména navrhnutí vhodného řídicího algoritmu pro mikrokontrolér, následně návrh vhodného obvodového řešení, návrh motivu desky tištěných plošných spojů, osazení desky součástkami, oživení a potvrzení požadované funkce měřením.

Algoritmus je navržen tak, aby byl schopen v širokém rozsahu podmínek osvětlení a teploty solárního panelu přenést maximum elektrického výkonu dodávaného solárním panelem do akumulátoru. Tento systém se nazývá Maximum Power Point Tracking, zkratka MPPT, z angličtiny lze přeložit jako sledování bodu maximálního výkonu. MPPT je technologie která umožňuje významně zlepšit účinnost přenosu energie ze solárního panelu do spotřebiče, což může být právě nabíječka akumulátorů nebo střídač na střídavé síťové napětí.

Solární panel má náhradní schéma složené ze zdroje proudu, k němu je paralelně dioda a parazitní vodivost, sériově k této kombinaci je ještě sériová rezistance, takový obvod má charakter proudového zdroje, jehož vlastnosti se mění s teplotou a intenzitou osvětlení. Díky tomu se napětí na jeho výstupu i proud který je schopný dodat mění a hlavním úkolem MPPT regulátoru je najít zatěžovací bod solárního panelu při kterém je jeho výstupní výkon nejvyšší. Regulátory nabíjení a střídače disponující technologií MPPT jsou však zpravidla dražší díky nutnosti použití složitějšího řízení, relativně velké indukčnosti, nebo transformátoru a celkově většího počtu součástek.

2 TEORETICKÝ ÚVOD

2.1 Obnovitelné zdroje energie

Obnovitelné zdroje energie jsou v této době neoddělitelnou součástí energetického mixu po celém světě a do budoucna lze čekat jejich masivní expanzi díky jejich klesající ceně, stoupající účinnosti a dlouhé životnosti. Jen těžko si lze zatím představit, že by celý svět byl napájen pouze z obnovitelných zdrojů elektrické energie, ale jejich již tak zásadní význam bude v budoucnu růst. Zdroj [1] rozděluje obnovitelné zdroje elektrické energie v České republice podle principu funkce na:

- Solární fotovoltaické elektrárny
- Větrné elektrárny
- Vodní elektrárny
- Geotermální elektrárny
- Elektrárny spalující biomasu

Tato práce se však omezí na solární fotovoltaické, větrné a vodní elektrárny.

2.1.1 Solární fotovoltaické elektrárny

Solární elektrárny mají výhodu, že je lze osadit téměř kdekoliv, nevyžadují složitou infrastrukturu. V praxi se osvědčilo umístování solárních elektráren relativně malých výkonů přímo na střechy obydlí, protože se jedná o využití jinak neužitečné plochy a není tak zabrána žádná zemědělská půda. V případě velkých solárních elektráren, stavěných od roku 2008 díky výhodné výkupní sazbě vyrobené elektrické energie, tomu tak často bylo. Za rok 2017 FV elektrárny vyrobily 2,2 TWh elektrické energie, což představuje zhruba 2,1 % podíl energetické bilance [2].

2.1.2 Větrné elektrárny

Větrné elektrárny v České republice představují zhruba 1,38 % instalovaného výkonu v České republice. Množství vyrobené energie představovalo 0,58 % podíl podle energetické bilance [2]. Z toho lze usuzovat, že v České republice nejsou vhodné podmínky pro efektivní provoz větrných elektráren.

2.1.3 Vodní elektrárny

Vodní elektrárny jsou stavby určené k přeměňování energie vody na elektrickou energii, děje tak pomocí turbíny, která otáčí generátorem a ten dodává výkon do elektrické sítě. Vodní elektrárny vyrobí asi 1,9 TWh elektrické energie ročně a připisují si tak 1,86 % podíl na energetické bilanci [2].

2.2 Fotovoltaický článek

Solární článek je velkoplošná dvouvrstvá P-N polovodičová součástka, která je díky fotovoltaického jevu, který byl objeven v roce 1876, schopná přímo přeměňovat světelnou energii na elektrickou.

Fotovoltaický jev je jeden z druhů fotoelektrického jevu. Foton, který je v solárním článku absorbován může vyvolat několik stavů. V prvním případě pokud foton nemá dostatečnou energii a je absorbován, nevznikne volný pár elektron-díra, pouze fonon, který zanikne, tím solární článek zvýší svou vnitřní energii (tím se zahřívá). Pokud na solární článek dopadne foton, který má energii vyšší než energie zakázaného pásu polovodiče, ze kterého je solární článek vyroben a dojde-li k absorpci, při které se vytvoří volný elektron a korespondující díra, tyto náboje jsou separovány díky působení elektrického pole vyprázdněné oblasti polovodiče a postupně se dostanou až na okraj polovodiče, kde jsou odvedeny sběrači proudu k zátěži. Pokud dojde k rekombinaci znamená to, že se tyto zaniklé náboje přemění na fonon.

Aby se tomuto jevu co nejvíce předcházelo, materiály na solární články se vyrábí velmi čisté, čímž se dosáhne dlouhé doby života nosičů náboje a tím stoupá účinnost přeměny. Energie fotonu, která je větší než energie zakázaného pásu, se po generaci volných nosičů z části přemění na fonon a solární článek se touto energií ohřívá [3].

2.2.1 Zajímavé typy fotovoltaických článků

2.2.1.1 CdTe fotovoltaické články

CdTe tenkostěnný solární článek je zajímavý svou konkurenci schopnou cenou, která se dá srovnat s cenou monokrystalických křemíkových solárních článků, účinnost v laboratořích dosáhla 22,1 % v roce 2016 [4]. Šířka zakázaného pásu je 1,5 eV, což je výhodné kvůli rozložení energií fotonů ve slunečním záření. Měrný pokles výkonu při zvýšené okolní teplotě je poloviční než u křemíkových krystalických solárních článků a ročně tak mohou vyrobít o 5 až 9 % elektrické energie navíc. Obsah toxického kadmia a nízké objemy těžby telluria brání masivnímu rozšíření, celosvětový podíl výroby CdTe solárních článků tvořil zhruba 5,1 % trhu v roce 2013 [4].

2.2.1.2 GaAs tenkostěnné fotovoltaické solární články

GaAs tenkostěnný monokrystalický solární článek drží rekord v nevyšší dosažené naměřené účinnosti pro článek s jedním polovodičovým přechodem která činí 28,8 %. Tři přechodové solární články mívají účinnost kolem 37 % což je téměř dvojnásobek polykrystalických křemíkových solárních článků. Tyto solární články jsou používány pro koncentrované solární elektrárny, kde je plocha solárních článků mnohem menší než v normální fotovoltaické elektrárně. Výhradní použití je také pro vesmírnou techniku, kde menší plocha fotovoltaických panelů významně přispívá ke snížení váhy satelitu. Jejich největší nevýhoda je, že tento typ fotovoltaických článků je velmi drahý a nelze tak čekat rozsáhlé rozšíření mimo speciální použití [5].

2.2.2 Křemíkové fotovoltaické solární články

2.2.2.1 Monokrystalické Si FV články

Monokrystalické solární články, se vyrábí z monokrystalického krystalu křemíku, který se táhne z taveniny křemíku ve formě monokrystalového ingotu. Ingot je pak následně nařezán na plátky, na nich je pak vytvořen PN přechod a sběrače proudu. Povrch se opatřuje antireflexními vrstvami zvyšujícími účinnost. Monokrystalický křemíkový solární článek byl historicky nejrozšířenějším typem solárních článků, v roce 1990 tvořil drtivou většinu vyráběných FV článků na trhu. V dnešní době jeho podíl na trhu klesá

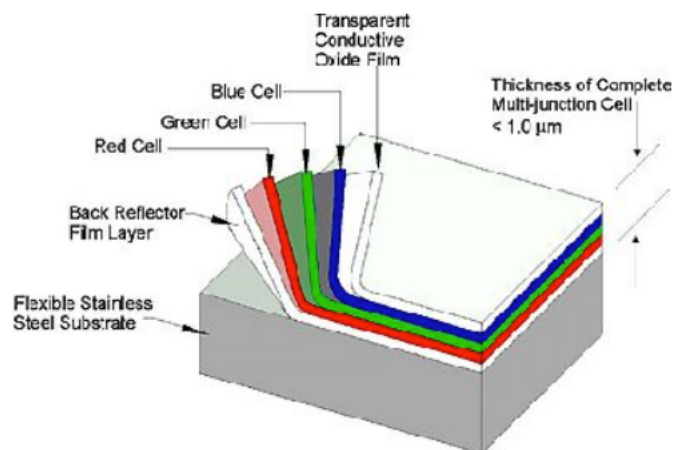
a tvoří asi 36 % trhu. Monokrystalické solární články mají oproti polykrystalickým vyšší cenu, delší životnost a vyšší účinnost. Nejvyšší dosažená účinnost byla 26,7 % [6]

2.2.2.2 Polykrystalické Si FV články

Polykrystalické solární články se vyrábějí z polykrystalu, ze kterého jsou nařezány plátky, na nich se následně vytvoří polovodičový přechod, proudosběrné elementy a antireflexní vrstvy. Nejvyšší dosažená účinnost této technologie je zatím 22,3 %, dnes tvoří 62 % podíl na trhu všech FV panelů. Podíl na trhu roste díky klesající měrné ceně a zvyšující se účinnosti [6].

2.2.2.3 Amorfnní Si FV články

Amorfnní křemíkové fotovoltaické články využívají menší množství křemíku než krystalické nebo polykrystalické Si články, jako substrát se používá sklo, kov nebo i plast. Mají relativně nízkou účinnost v porovnání s jinými křemíkovými fotovoltaickými články, která činí asi 7 % a životnost je zhruba 25 let při poklesu výkonu na 80 %, to brání masivnějšímu rozšíření. Výrobci zkoušejí přivést na trh amorfnní články s více přechody pro zvýšení účinnosti. Strukturu tohoto článku lze vidět na obrázku 2-1 [7].



Obrázek 2-1 Struktura amorfnního více-přechodového křemíkového článku [7]

2.3 Fotovoltaický solární panel

Solární fotovoltaický panel představuje základní stavební blok solárních fotovoltaických systémů. Existuje mnoho různých konstrukčních variant, tato práce se však zaměřuje pouze na konstrukci běžných komerčně dostupných křemíkových panelů [8]. Solární panel je zpravidla složen z více solárních článků spájených buď sériově, nebo sérioparalelně nemagnetickými vodiči, kvůli dosažení požadovaného napětí a proudu panelu. Pospojované solární články jsou umístěny na podkladové plastové vrstvě, polyvinylacetátu, laminované ke sklu s antireflexní úpravou. Proces laminace zajišťuje ochranu před vnějšími vlivy jako je vlhkost, která by způsobila korozi a zničení panelu, viz obrázek 2- 2 [9]. Tato sestava je následně umístěna do rámu, který je vyroben z profilů extrudovaného anodizovaného hliníku, protože hliník je lehký, pevný a dobře odolává povětrnostním podmínkám. Hliníkový rám je elektricky izolovaný od solárních článků a slouží jako prvek k mechanickému uchycení panelu na nosnou konstrukci. Zdroj [10] uvádí, že tento panel splňující normu DIN EN 50380, podle které vydrží zatížení tlakem o hodnotě 6 kPa z přední strany a 5,4 kPa ze zadní.

Hliníkový rám a související nosná konstrukce musí tedy odolat značným silám, které toto zatížení vyvolá. V praxi se jedná o zatížení větrem, sněhem a námrazou. Solární panel je často vybaven překlenovacími diodami, které jsou umístěny v boxu na zadní straně panelu. Diody slouží k zachování činnosti panelu při poruše jednoho ze solárních článků v řetězci, nebo při částečném zastínění některé části panelu, v takových situacích neprochází proud skrz jednotlivé články v řetězci, ale právě tuto diodu, napětí i proud panelu se sníží a výkon panelu klesne. Panely obsahující 60 článků výrobci osazují třemi překlenovacími diodami. Do boxu s překlenovacími diodami jsou vedou připojovací vodiče, které mají na délku typicky jeden metr a jsou zakončeny konektory typu MC4 [10].



Obrázek 2-2 Delaminace a koroze FV panelu [9]

2.4 Akumulátory elektrické energie

Akumulátor elektrické energie je sekundární elektrochemický článek, který je určen na přeměnu a akumulaci elektrické energie v chemické formě, která je v případě potřeby přeměněna opět na elektrickou, samozřejmě tento proces není bezztrátový. Akumulátory hrají v dnešním světě nezastupitelnou roli, neboť se vyskytují v mnoha různých aplikacích jako hlavní, nebo jako záložní zdroj energie. Mezi hlavní využití lze zařadit veškeré mobilní telefony, notebooky, přenosné radiostanice, ostrovní solární systémy, trakční systémy silničních elektrických vozidel, ponorek a podobně. Mezi použití jako záložní zdroje elektrické energie patří například zálohování paměti RAM, nouzových svítidel, solární poloostrovní systémy, UPS – nepřerušitelné zdroje napájení a podobně. Akumulátor principiálně se skládá z kladné a záporné elektrody, separátoru a elektrolytu [11]. Každý typ sekundárního elektrotechnického zdroje má své vlastnosti a okruhy použití, které jsou popsány v následující podkapitole.

2.4.1 Olověný akumulátor

Olověný akumulátor je jeden z nejstarších druhů akumulátorů, byl vynalezen v roce 1859 Francouzem Gastonem Planté [11], do té doby byly všechny dostupné elektrochemické zdroje primární, tedy nenabíjecí.

Olověný akumulátor se skládá z elektrod, které tvoří v nabitém stavu houbovitě olovo na záporné elektrodě, oxid olovičitý na kladné a zředěná kyselina sírová tvoří elektrolyt. Proces vybíjení snižuje koncentraci kyseliny v elektrolytu a obě elektrody se mění na síran olovnatý který zaujímá větší objem než původní materiál elektrod, což způsobuje mechanický tlak, nastává rozpad elektrod, který zkracuje životnost akumulátoru.

Olověné akumulátory jsou citlivé na hloubku vybití. Jedna z velkých nevýhod olověného akumulátoru je, že právě síran olovnatý se s časem mění na krystalickou formu, která má mnohem menší plochu než jeho amorfní forma, pokud je tedy olověný akumulátor skladován v ne zcela nabitém stavu po dostatečně dlouhou dobu (řádově týdny), tak dochází k jeho nenávratnému poškození [11].

Olověný akumulátor přesto však nachází široké uplatnění v aplikacích jako jsou akumulátory automobilů, akumulátory pro UPS systémy a solární systémy, to je umožněno především jeho nízkou měrnou cenou, která je výsledkem neustálého vylepšování recyklačních a výrobních procesů a téměř uzavřený systém recyklace umožňuje využít na jejich výrobu recyklované olovo. Jejich nevýhodou je nízká specifická gravimetrická i objemová hustota energie ve srovnání s ostatními druhy akumulátorů. V sedmdesátých letech minulého století se objevily formy navázání elektrolytu do skelné vaty, nebo gelu, což zvýšilo jejich měrný výkon, eliminovalo potřebu dolévat destilovanou vodu a umožnilo práci ve všech polohách [11].

2.4.2 Akumulátory na bázi niklu

Niklové akumulátory mají za sebou dlouhou historii, jako první byl vynalezen nikl - kadmiový nabíjecí článek v roce 1899 vynálezcem Waldemarem Jungerem [11]. Jak již název vypovídá elektrody byly tvořeny niklem a kadmiiem jejich vysoká cena bránila většímu rozšíření v tehdejší době [11].

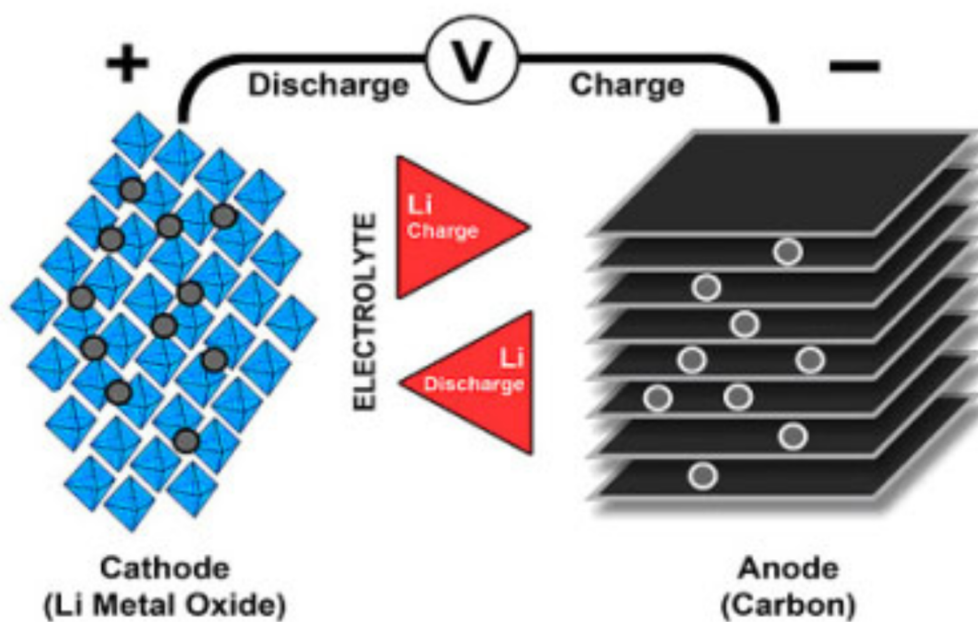
O dva roky později Thomas Edison přišel s akumulátorem typu nikl - železo a nikl - zinek, který byl levnější na výrobu, měl však velké samovybíjení, nízkou měrnou kapacitu a nízký měrný výkon za snížených teplot. NiZn akumulátory se používaly v Americe na železnici v letech mezi 1932-1948, také měly velké samovybíjení kvůli růstu tenkých krystalů (dendritů) z materiálu elektrod degradující funkci separátoru [11].

V roce 1936 se povedlo výrazně zlepšit vlastnosti NiCd akumulátoru díky vynálezu slinovaných elektrod, v roce 1947 vznikl první hermeticky uzavřený NiCd akumulátor, díky tomuto objevu se mohl NiCd akumulátor rozšířit do spousty aplikací jako jsou například přenosné radiostanice, osobní počítače a letecký průmysl.

Jejich negativní dopad na životní prostředí způsobil tlak na jejich nahrazení Nikl-metal-hydridovými akumulátory, které se vyvinuly z akumulátorů typu nikl-vodík [11]. Tento typ akumulátor byl proveden jako tlaková nádoba, ve které se skladuje plynný vodík o tlaku přibližně 8,2 MPa v plně nabitém stavu, s elektrodami z niklu a platiny, hydroxid draselný tvoří elektrolyt. Použity byly výhradně pouze pro satelitní vesmírnou techniku kvůli jejich velmi dlouhé životnosti, která je přibližně dvacet tisíc cyklů při 80 % hloubce vybití [11].

2.4.3 Lithiové akumulátory

Akumulátory založené na technologii lithium iont jsou vývojově nejmladší komerčně dostupné akumulátory. Velké množství různých kombinací materiálů anody a katody umožnilo přizpůsobení li-ion akumulátorů pro použití v různých aplikacích. Li-ion akumulátory se dělí na dva základní typy, jeden typ exceluje tím, že dokáže dodat velký měrný výkon, avšak měrná kapacita je nižší, typická oblast použití jsou například akumulátorové nářadí, nebo elektromobily a trakční použití obecně. Druhý typ je určen ke skladování co největšího objemu energie na úkor měrného výkonu. Takové akumulátory se hodí například do spotřební elektroniky, kde se klade velký důraz na výdrž na jedno nabití a odebíraný výkon napájeného zařízení není nijak zvlášť vysoký. Samozřejmě existují chemické kompozice elektrod, které do jisté míry spojují obě tyto vlastnosti.



Obrázek 2-3 Princip funkce Li-ion akumulátoru [12]

Na obrázku 2-3 je vidět princip funkce Li-ion akumulátoru. Lithiové ionty se při nabíjení přesouvají z katody na anodu a při vybíjení z anody na katodu. Přesun iontů je zajištěn elektrickým polem působícím mezi elektrodami. Díky tomu, že s každým nabíjecím a vybíjecím cyklem dojde k nenávratnému zachycení malé části iontů v anodě, akumulátor tak ztrácí postupně svou kapacitu [13]. Tento negativní jev je závislý na několika parametrech, ale hlavní faktory negativně ovlivňující životnost li- ion akumulátorů jsou velká hloubka vybíjení, zvýšená teplota a skladování v plně nabitém stavu.

2.5 MPPT

MPPT neboli Maximum Power Point Tracking je technologie, česky hledání bodu maximálního výkonu, která má za úkol maximalizovat množství energie vyrobené solárním panelem dodané do zátěže. Aby bylo dosaženo tohoto záměru, zařízení, které se stará o přenos výkonu ze solárního panelu do zátěže musí být vybaveno řízením, nejčastěji mikrokontrolérem, který měří napětí a proud, který generuje solární panel. A podle toho upravuje míru zatížení solárního panelu tím, že mění střídu měniče, který je k solárnímu panelu připojen [14]. Technologie MPPT dokáže získat mnohem více energie ze solárního panelu díky tomu, že je možné využít generovaný výkon i v době částečného zastínění například stromy, zatažení oblohy, východu a západu slunce.

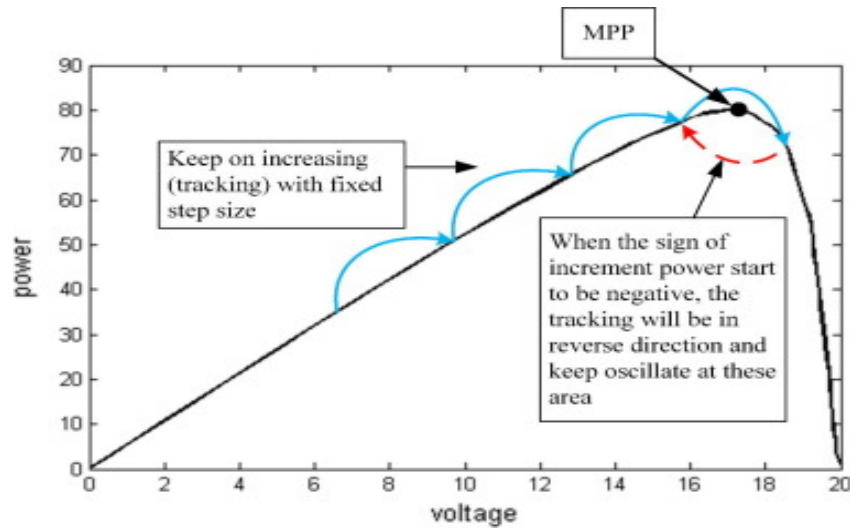
Zdroj [15] rozeznává tyto algoritmy:

- Perturb and Observe
- Incremental conductance
- Current sweep
- Constant voltage
- Open Voltage

2.5.1 Perturb and Observe

Perturb and Observe, dále jen P&O, lze do češtiny přeložit jako metoda narušení a pozorování. Tato metoda využívá měření napětí a proudu solárního panelu a spočívá v tom, že se mění napětí na solárním panelu a sleduje se výkon. Ten zprvu s rostoucím napětím roste a následně klesá. Napětí, kdy dochází k poklesu výkonu odpovídá MPP – neboli bodu maximálního výkonu. Žádoucí je, aby řízení udržovalo takovou střídu měniče, aby byl solární panel udržován na MPP. Problém však nastává, když je solární panel náhle zastíněn, například oblačností nebo stínem, proto je potřeba periodicky kontrolovat, zda je udržován MPP a pokud ne, tak hledat novou hodnotu napětí, při které je výkon nejvyšší při daných podmínkách [15]. Nevýhoda toho řešení je, že může docházet k oscilacím v hodnotě výstupního výkonu díky tomu, že krok, s jakým lze měnit napětí na solárním panelu není nekonečně malý. Tento algoritmus je využíván velmi

často, protože je snadný na implementaci. Důvod vzniku oscilace výstupního výkonu fotovoltaického panelu ilustruje obrázek 2-3 [16].



Obrázek 2-4 Vznik oscilace výstupního výkonu [16]

2.5.2 Incremental Conductance

Incremental conductance lze přeložit jako metoda přírůstové vodivosti. Využívá toho, že podíl derivace výkonu a derivace napětí je v bodě maximálního výkonu nulová. Mikrokontrolér zvyšuje vodivost měniče a zároveň měří přírůstky podílu proudu a napětí solárního panelu a porovnává je s podílem celkového proudu a napětí. V momentě, kdy se tyto hodnoty rovnají, tak je dosaženo bodu maximálního výkonu, tento bod je udržován až do změny vnějších podmínek, kdy je iniciováno hledání nového bodu maximálního výkonu. Tato metoda je náročnější na implementaci, protože je výpočetně náročnější než metoda P&O. Může také docházet k oscilaci výstupního výkonu, velká výhoda je, že dokáže rychle reagovat na změny podmínek [15].

2.5.3 Current sweep

Current Sweep lze přeložit jako metoda rozmítání proudu. Mikrokontrolér většinou v daných časových intervalech vytvoří pilovitý průběh proudu solárního panelu, u toho měří napětí, z naměřených dat se následně spočítá, kde leží bod maximálního výkonu [15].

2.5.4 Constant Voltage

Constant voltage, česky metoda konstantního napětí patří mezi nejjednodušší metody, a to díky tomu, že v paměti mikrokontroléru je uložena hodnota napětí solárního panelu při kterém je dosaženo maximálního výkonu a ta je na něm udržována. Mikrokontrolér musí měřit napětí na solárním panelu, aby nastavil potřebnou hodnotu střídavy měniče. Tato metoda nebere v potaz změny okolních podmínek jako je teplota nebo intenzita osvětlení panelu, tudíž její výsledky jsou zpravidla horší než u jiných metod zde popsaných [15].

2.5.5 Open Voltage

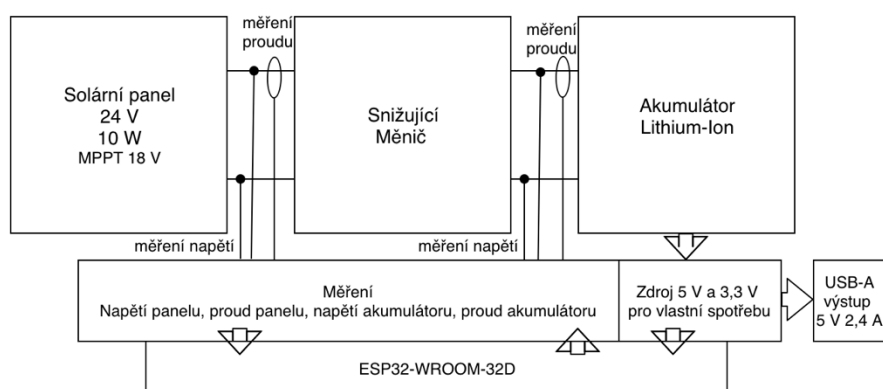
Open Voltage by se dal do češtiny přeložit jako metoda napětí na prázdko. Její funkce spočívá v tom, že jednou za daný časový interval je na měniči nastavena nulová střída a solární panel je tedy bez zátěže, v tu chvíli je změřeno napětí solárního panelu naprázdko. V mikrokontroléru je pak uložena konstanta charakteristická pro daný solární panel, napětí naprázdko je touto konstantou vynásobeno a výsledek je nová hodnota napětí odpovídající bodu maximálního výkonu, střída měniče je pak nastavena tak, aby napětí na solárním panelu odpovídalo této hodnotě [15].

3 VLASTNÍ ŘEŠENÍ PROBLÉMU

Tato část je zaměřena na návrh obvodového řešení, což zahrnuje převážně elektrické schéma měniče pro solární články. Dále se tato kapitola bude zabývat výběrem a návrhem vhodného řídicího MPPT algoritmu, výběru akumulátoru a simulací navrhovaného řešení v prostředí Matlab-Simulink.

3.1 Koncepce

Návrh měniče je rozdělen na několik částí. Konkrétně to je část řízení, kde se práce věnuje vlastnostem a výběru vhodného mikrokontroléru, který bude zajišťovat bezpečnou funkci zařízení a MPPT funkcionalitu. Dále je to výkonová část měniče, která bude zajišťovat samotnou konverzi napětí a přenos výkonu ze solárního panelu do li-ion akumulátoru, který v tomto případě tvoří elektrickou zátěž. V poslední části návrhu se práce zabývá výběrem vhodného li-ion akumulátoru jeho vlastnostmi, a simulací navrhovaného řešení. Blokové schéma je zobrazuje obrázek 3-1.



Obrázek 3-1 Blokové schéma

3.2 Řídicí část

Řídicí část je hlavní stavební blok zařízení, který obstarává požadovanou funkci při zachování bezpečného provozu zařízení, hlavní úkol je tedy zajistit, aby se co největší množství energie přeneslo ze zdroje do zátěže. K tomu je potřeba navrhnout správný algoritmus MPPT ten implementovat do mikrokontroléru.

3.2.1 ESP32

Modul ESP32-WROOM-32D od firmy Espressif je velmi výkonná platforma integrující velké množství sběrnic a rozhraní, jako je například SPI, I2C, CANBUS, ale hlavně Wi-Fi a Bluetooth Low Energy což umožňuje snadné propojení s internetem, nebo mobilním chytrým telefonem například skrz platformu Blynk.

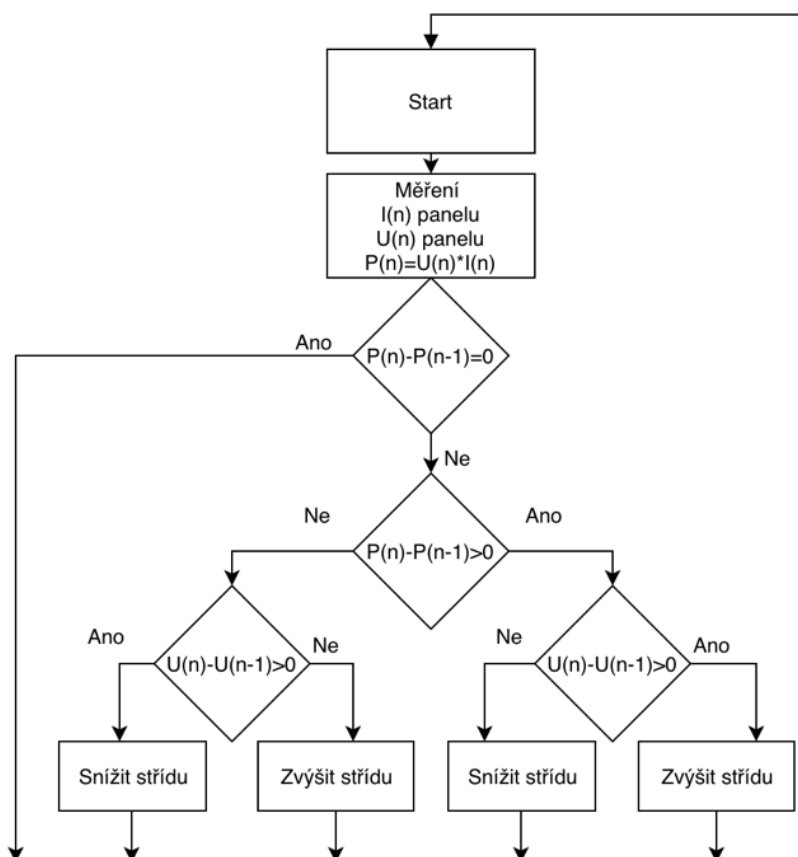
Jedná se modul o jednočipového 32 bitového dvojádrového procesoru s integrovanou 32 Mbit flash pamětí a vnitřní hodinovou frekvencí až 240 MHz. Modul disponuje 42 vývody v pouzdře provedeném jako breakout board. Programovatelných linek je celkem 36 s možností využití různých funkcí, což zahrnuje například 18 analogově digitálních převodníků s rozlišením 12 bitů, 9 linek pro bezdrátová kapacitní tlačítka, 2 linky pro digitálně analogový převodník a podobně. Nutno však pamatovat na to, že díky spojení procesoru s interní SPI flash pamětí není 6 linek doporučováno používat. [17]

Až 16 výstupů dokáže pracovat jako PWM výstupy, většina z nich na frekvenci až 40 MHz při jednobitovém rozlišení [18], s vyšším rozlišením klesá frekvence. Při nastavení například osmibitového rozlišení PWM výstupu je frekvence 312,5 kHz, což je dostačující pro většinu aplikací jako je například řízení krokových motorů, měničů a podobně [18].

Mikrokontrolér je schopný pracovat s napájecím napětím od 2,7 až 3.6 V, což je zcela dostačující pro přímé napájení z jednoho článku li-ion o nominálním napětí 3.6 V. Ne všechny obvody a komponenty použité v návrhu však dokáží pracovat ve stejném rozmezí napájecích napětí, tudíž byl nakonec zvolen akumulátor s nominálním napětím 10.8 V, který zajistí dostatečnou rezervu napájecího napětí a tím i stabilitu 3.3 V a 5 V větve pro napájení všech komponent.

3.3 Algoritmus MPPT

Jako vhodný algoritmus se jeví Perturb and Observe, známý také jako P&O, díky relativně nízkým nárokům na implementaci pro mikrokontrolér. Funkční vývojový diagram je vidět na obrázku 3-2.

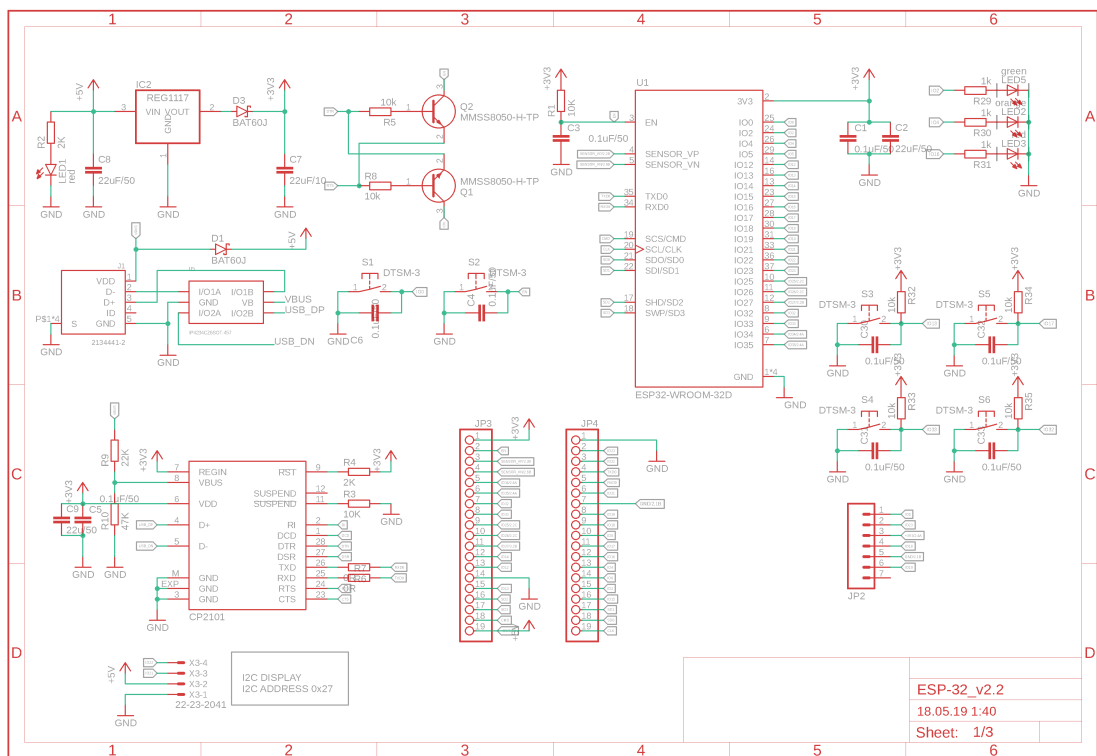


Obrázek 3-2 Vývojový diagram algoritmu P&O [19]

Na začátku každého cyklu P&O se nejprve se změří proud a napětí FV panelu a z těchto hodnot se spočítá aktuální výkon. Ten se porovná s hodnotou z předchozího cyklu, pokud je stejný, tak mikrokontrolér nemění nastavenou střidu, protože zátěž je shodná s bodem maximálního výkonu FV panelu. Pokud se výkon aktuální a předchozí liší tak, že rozdíl je kladný, porovná se napětí na panelu z aktuálního měření s předchozím a pokud je rozdíl kladný, střída je inkrementována, pokud není, střída je zmenšena. Obdobně je tomu v případě, že rozdíl výkonů aktuálního a předchozího je menší, napětí se odečtou a podle znaménka výsledku se provede změna střidy měniče [19]. Mimo požadavků MPPT algoritmu je také nutné sledovat výstupní napětí měniče, aby nedošlo k přebíjení akumulátoru, což by zapříčinilo jeho velmi krátkou životnost a ohrožení bezpečnosti provozu měniče.

3.3.1 Schéma zapojení řídicí části

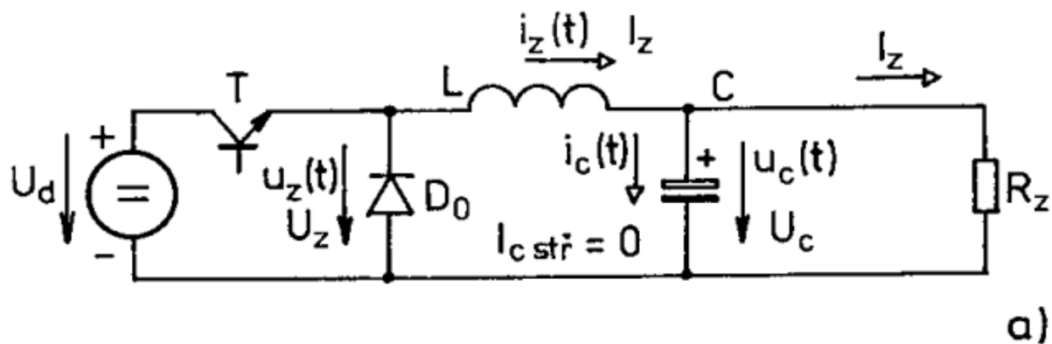
Hlavním blokem řídicí části je již zmíněný modul ESP32-WROOM-32D, ke kterému jsou připojeny napěťové děliče 470 k Ω a 18 k Ω kvůli měření napětí, saturace AD převodníku by nastala při měřeném vstupním nebo výstupním napětí nad 30 V. Dále jsou připojeny vývody z dvojitého zesilovače napětí z bočníků kvůli měření proudu. Tyto signály jsou zavedeny do vstupů s A/D převodníky. Na výstupu GPIO26 je generován PWM signál vedoucí k budiči MOS-FET tranzistorů. Zapojení je na obrázku 3-3. Maximální napětí ve standardním nastavení (ATT=0 dB) na analogově digitálních převodnicích je 1.1 V, aby nedošlo k jejich zničení, maximální napětí na vstupu ze solárního FV panelu je počítáno skrz dělič na maximálně 30 V. Kombinace 10 m Ω bočniku a zesilovače se ziskem 20 zajišťuje, že saturace vstupu nastane až pokud protékající proud nabyde hodnoty 5,5 A, což představuje dostatečnou rezervu při běžném provozu. Na vývodech GPIO21 a GPIO22 je připojen konektor na displej komunikující po sběrnici I²C. Sběrnice SPI pro připojení mikro SD karty je na vývodech GPIO23, GPIO19, GPIO18, GPIO5. Na vývodu GPIO25 je připojen vývod budiče tranzistorů sloužící pro vypínání výkonového měniče. GPIO27 slouží k vypínání 5 V měniče obvodu LT8650. Ke komunikaci po USB sběrnici je zde obvod CP2102. Schéma zapojení řídicí části je vidět na obrázku 3-3.



Obrázek 3-3 Zapojení řídicí části

3.4 Výkonová část

Hlavní prvek výkonové části je propustný měnič konstrukce podle zdroje [20]. V této práci se jedná o zapojení s N kanálovým unipolárními tranzistory, rekuperační dioda je přemostěna tranzistorem pro zvýšení účinnosti, měnič je tedy koncipován jako synchronní. Obrázek 3-4 [20] zobrazuje klasickou koncepci pouze s rekuperační diodou.



Obrázek 3-4 Zapojení propustného měniče [20]

Cívka je na feritovém jádře o indukčnosti 220 μH při zvlnění proudů 40 % a výstupním výkonu 16 W. Vstupní napětí bez zatížení je počítáno na maximálně 25 V a frekvenci PWM signálu 35 kHz. Střída tohoto signálu pro jmenovitý výstupní výkon je 63 %. Velikost I_{rms} vychází na 1,08 A, viz obrázek 3-5 [21].

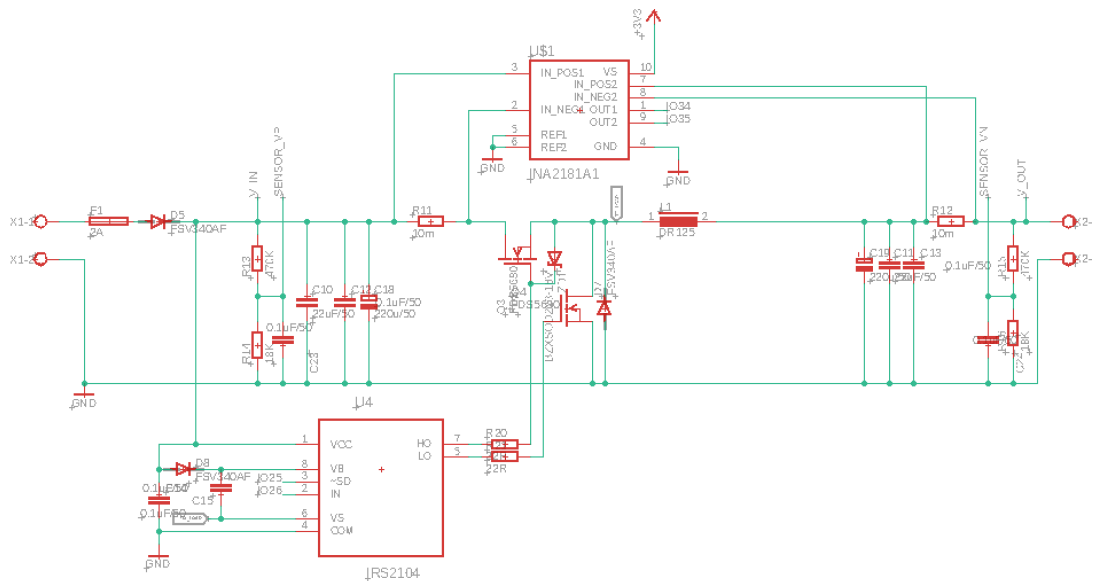
Topology: Buck - Step Down

Inductance based on the specified minimum load current.

Item	Value	Units
Volts In	20	V
Volts Out	12.6	V
Load Current	1.25	A
Freq.	35	KHz
Vripple	0.63	V
Duty Cycle	63.076923076923	%
Ipp Inductor	0.5	A
Ipk Inductor	1.5	A
Irms	1.0103629710818	A
L	259.51648351648	μH
C	35.75789290075	μF

Obrázek 3-5 Parametry snižujícího měniče [21]

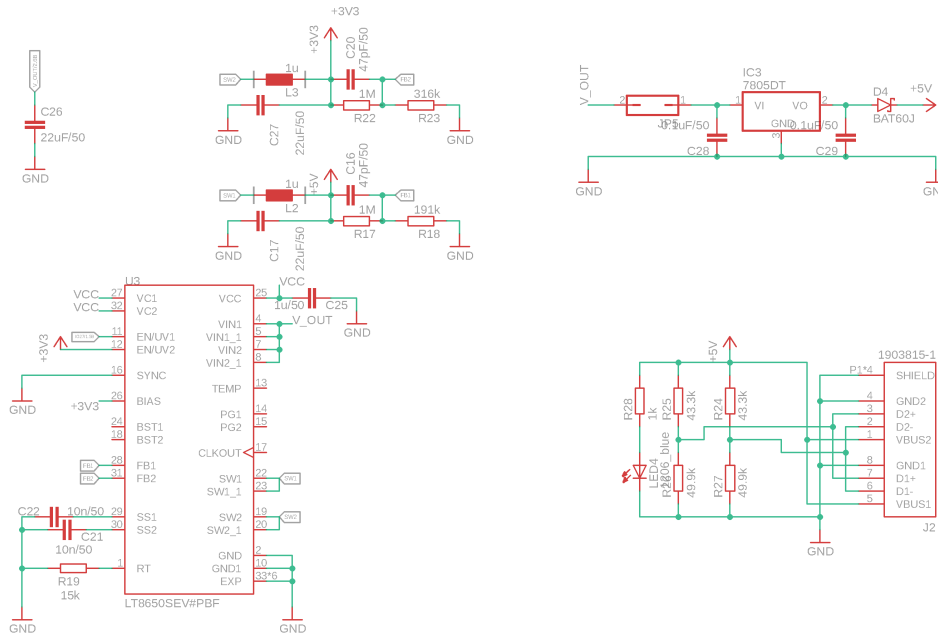
Na výstupu je kondenzátor vyhlazující výstupní napětí. Z tohoto napětí je nabíjen akumulátor a napájen obvod LT8650, případně je zde osazen i stabilizátor 7805 kvůli zálohování napětí 5 V větve. Vstup a výstup zařízení je dimenzován na 25 V naprázdno. Napětí V_{OC} FV testovacího panelu je maximálně 22,2 V při 1000 W/m^2 [24]. Flexibilita vstupního napětí zajišťuje možnost zapojení adaptovat na různé konfigurace fotovoltaických panelů, nebo různé konfigurace li-ion akumulátorů. Výkonovou část ukazuje obrázek 3-6.



Obrázek 3-6 Zapojení výkonové části měniče

Obvod IRS2104 slouží jako budič MOS-FET tranzistorů a obvod INA2181A1 slouží jako zesilovač úbytku napětí na bočnicích měřící proud na vstupu a na výstupu měniče. Zesílený signál je přiveden do řídicí části k mikrokontroléru na analogově digitální převodník.

Zapojení obvodu LT8650S, lineárního stabilizátoru a USB-A výstup je vidět na obrázku 3-7.



Obrázek 3-7 Zapojení obvodu LT8650S

3.5 Akumulátor

Akumulátor zde slouží jako uložení energie, kterou měnič přenesl a solární panel vyrobí. Nominální výkon testovacího solárního panelu je 20 Wattů při intenzitě osvětlení 1000 W/m². Maximální návrhový výkon měniče je 15 W. V oblasti východočeského kraje je průměrně nejvíce slunečných hodin v květnu, a to konkrétně 217 hodin [22]. Akumulátor je podle této hodnoty dimenzován, počítá se s tím, že uložená energie bude přes noc vyčerpána a další den začne s vybitým akumulátorem. Celková potřebná kapacita je určena pro nejhorší možný případ, a to, že by po dobu dne by byl solární panel ozářený takovou intenzitou, že jeho výkon po většinu času dosahoval jeho nominální hodnoty a teoretická účinnost měniče je uvažována 100 %. Průměrný květnový denní úhrn je tedy zhruba 7 hodin a výkon na výstupu měniče 15 W, tudíž potřebná kapacita je 105 Wh. Tento výpočet je účelně zkrácený, vyšší kapacita, než bude v praxi potřeba se projeví pozitivně na snížení hloubky vybití akumulátoru. V praxi lze takový akumulátor realizovat například spojením devíti kusů li-ion článků s kapacitou 3,2 Ampérhodin. Vhodné akumulátory jsou například LG Chem GB18650 MH1 [23]. V tomto případě by spojení bylo sérioparalelní 3S3P, podobu článků ukazuje obrázek 3-8 [21].



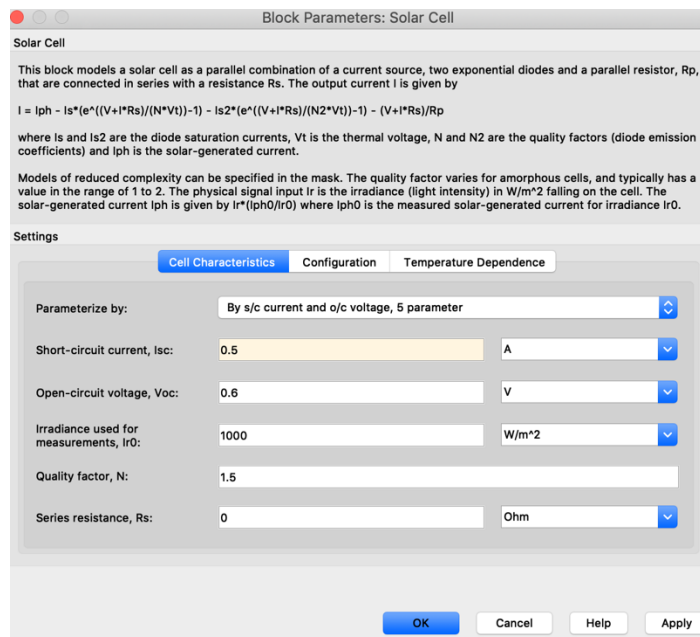
Obrázek 3-8 Akumulátor LG MH1 [21]

3.6 Ověření řešení v prostředí MATLAB-Simulink

Prostředí Matlab-Simulink obsahuje model pro fotovoltaický článek i akumulátor a všechny základní elektrické prvky jako je cívka, kondenzátor nebo MOS-FET. Tyto bloky byly použity v simulaci s parametry, které odpovídají katalogovým, například odpor kanálu u MOS-FET, úbytek na diodě v propustném směru a hodnota kapacity akumulátoru a podobně. V rámci simulačního času, který bohužel nemůže být dostatečně dlouhý se však nepodařilo dosáhnout všech výsledků simulace, ve smyslu toho, že pokud je nastaven krok simulace tak, aby byly vidět například krůběhy proudů v obvodu, tak se simulace nedokončí z důvodu vyčerpání systémových prostředků počítače. Když se nastaví krok simulace takový, že se simulace dokončí, tak hodnoty na jejím konci jsou značně nepřesné.

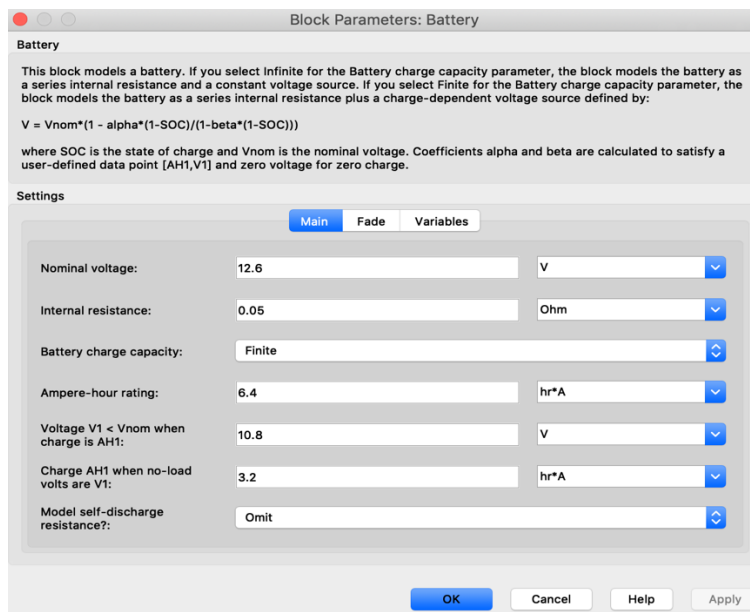
Co se týká prostředí Simulinku, je nutné zmínit, že signály simulinku nejsou přímo kompatibilní se signály fyzickými (PS) a se signály SimScape. Je nutné je převádět z matematických veličin Simulinku na fyzickou veličinu (PS) a tu teprve na veličinu elektickou pro Simscape.

Fotovoltaický panel byl charakterizován pomocí napětí naprázdno, proudu nakrátko a počtem článků v sérii v bloku Solar Cell. Nejnovější verze programu Matlab, která však nebyla k dispozici v době psaní této práce, obsahuje blok PV Array, který obsahuje parametrizace pro nejrůznější druhy solárních panelů dostupných na trhu, jedná se tak o velmi výkonný nástroj při návrhu FV systémů. Parametrizace solárního panelu na výkon 10 W je vidět na obrázku 3-9. Solární panel byl definován jako spojení 36 solárních článků v sérii. Jedná se o běžně používanou konfiguraci.



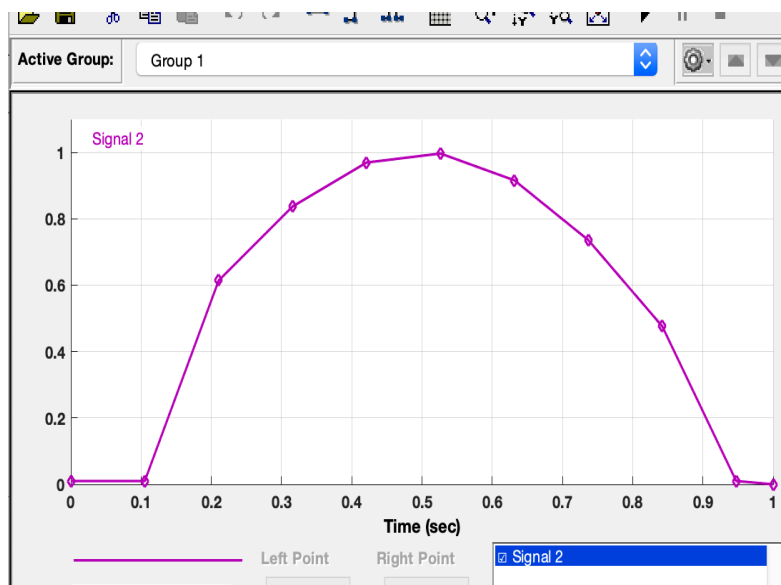
Obrázek 3-9 Parametrizace bloku Solar Cell

Akumulátor a jeho parametry jsou vidět na obrázku 3-10, akumulátor byl konfigurován jako vybitý, tedy $SOC = 0$ na kartě variables. Simulink bohužel zatím nedokáže rozlišovat o jaký akumulátor se jedná, konfigurace se provádí zadefinováním V_{nom} což je napětí v plně nabitém stavu, V_1 a AH_1 což je napětí při kapacitě v částečném stavu vybití a parametru Internal Resistance. Model spočítá vybíjecí a nabíjecí charakteristiku na základě těchto parametrů. Zde je tento blok zadefinovaný jako akumulátor o nominálním napětí 10.8 V. Jedná se tedy o model tříčlánekového li-ion akumulátoru. Stárnutí a jiné pokročilé parametrizace bloku akumulátoru nebyly použity.



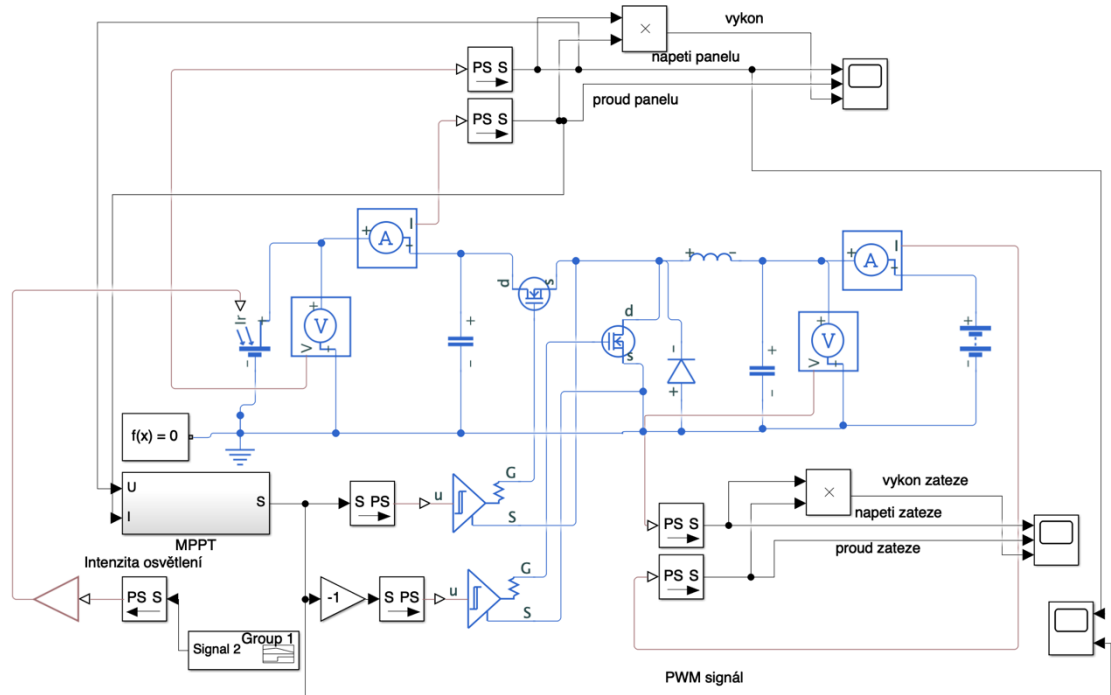
Obrázek 3-10 Parametrizace bloku Battery

Jako zdroj intenzity osvětlení byl použit blok Signal Builder, kde pomocí funkce Sampled Sin s amplitudou 2, offsetem 0 a periodou 2 a SampleRate 10, byl vytvořen průběh půlperrody sinus. Takto upravený signál připomíná průběh intenzity osvětlení za normálního dne. Jeho průběh zobrazuje obrázek 3-11.

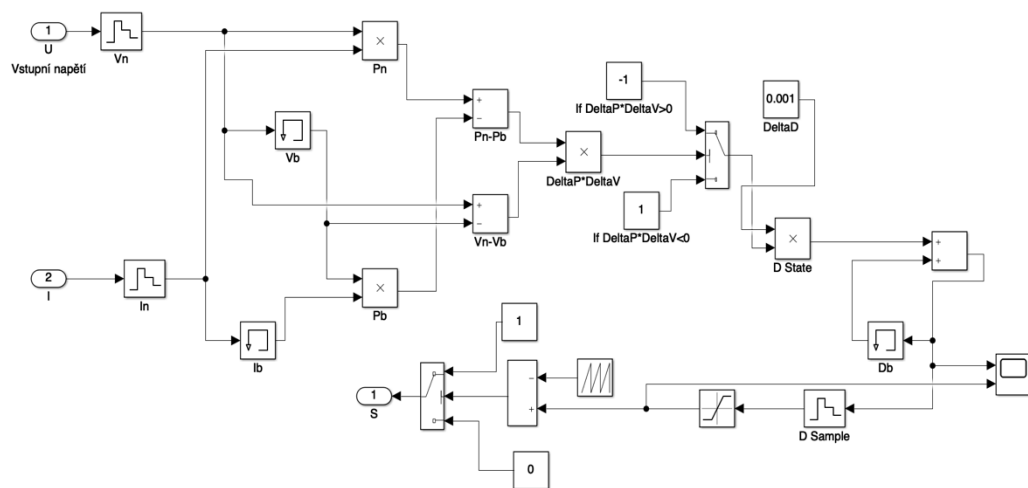


Obrázek 3-11 Model průběhu intenzity osvětlení během dne

Model zapojení v Simulinku je na obrázku 3-12 na kterém je vidět topologie měniče se solárním panelem, baterii a blokem reprezentující řídicí MPPT algoritmus. Jsou zde vidět také podpůrné bloky umožňující komunikaci jednotlivých rozhraní mezi sebou a zobrazování veličin. Blok $f(x)=0$ je podmínka solveru.



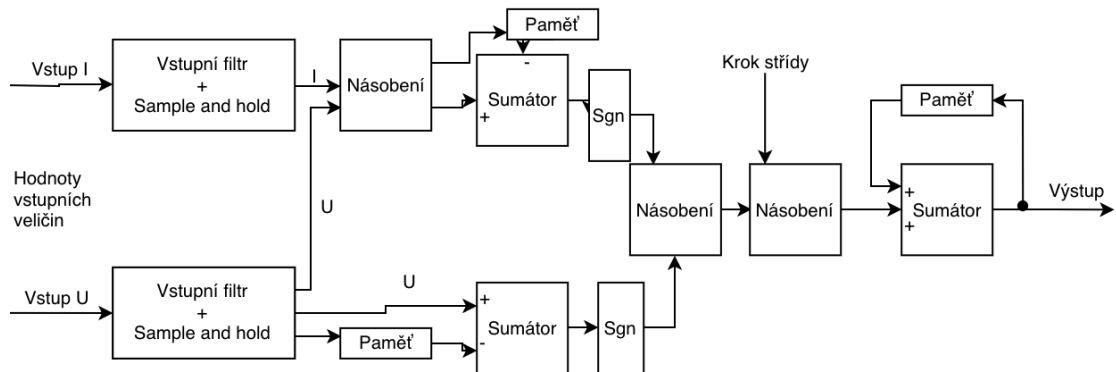
Obrázek 3-12 Kompletní model řešení



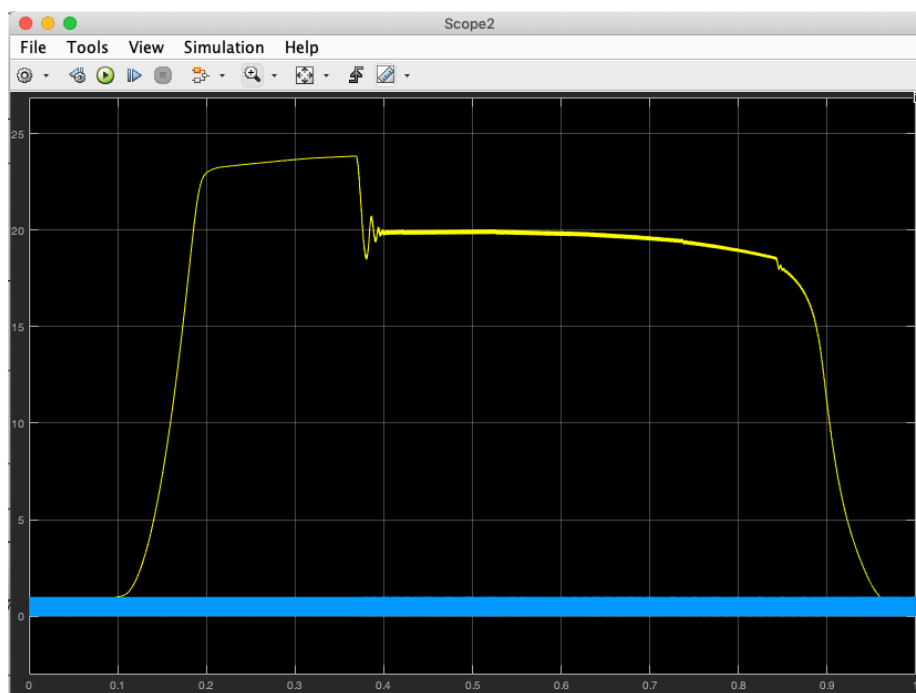
Obrázek 3-13 Vnitřní schéma bloku MPPT [31]

Obrázek 3-13 vyobrazuje vnitřní strukturu použitého MPPT bloku [31]. Tento blok obsahuje ve spodní části i generátor signálu PWM pro budič tranzistorů.

Přehlednější schéma je vidět na obrázku 3-14. Nejprve se signál na vstupu filtruje a zadrží pro potřeby výpočtu, pak se spočítá elektrický výkon, derivace výkonu a derivace napětí. Následně se v bloku Signum určí znaménko těchto derivací. Násobením se určí výsledné znaménko, které určuje směr posuvu střidy. Po vynásobení střidou se tento přírůstek integruje na výstupu a výstupem je hodnota střidy pro měnič.



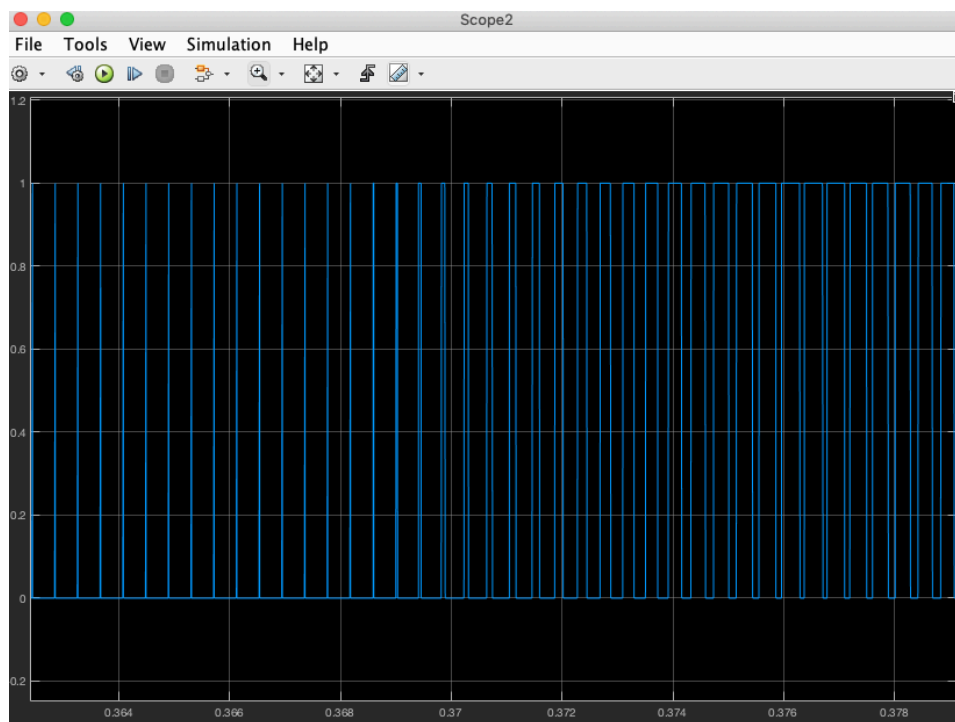
Obrázek 3-14 Zjednodušené schéma principu bloku MPPT



Obrázek 3-15 Výsledek simulace – napětí na panelu a střída

Na obrázku 3-15 je vidět, jak se mění vstupní napětí v závislosti na intenzitě osvětlení a střída měniče. Na obrázku 3-16 je vidět detail měnící se střidy v místě kdy algoritmus

našel pravý zátěžný bod FV panelu. Umístění a překmit v tomto místě souvisí jemností kroku.



Obrázek 3-16 Detail měnicí se střídá měniče

4 PRAKTICKÁ REALIZACE

V této části se práce věnuje postupu při praktické realizaci, která zahrnuje návrh elektrického schématu, návrh desky plošných spojů (PCB), objednání součástek, osazení PCB součástkami, oživení zapojení, programování firmware mikrokontroléru a měření vlastností navrženého regulátoru.

4.1 Návrh obvodového řešení v prostředí ECAD

Obvodové řešení bylo navrženo v programu z rodiny ECAD, konkrétně v programu EAGLE dříve od společnosti Cadsoft, který je nyní aktivně vyvíjen společností Autodesk Inc. Použita byla studentská licence, která v sobě zahrnuje 3 roky platnosti, omezení velikosti, respektive plochy PCB i počet vrstev mědi [28].

Jelikož základní knihovna součástek programu je omezená a zdaleka nezahrnuje dostatečné množství součástek, bylo nutné do programu importovat modely použitých součástek v projektu z internetu, například ze stránek Snapeda.com, kde si uživatelé mohou po vytvoření účtu hledat v knihovnách výrobců i ostatních uživatelů a schematické značky i pouzdra si stáhnout pro prostředí ECAD podle vlastního výběru. Nutno však kontrolovat, jestli je daná součástka vytvořena správně, neboť se model může lišit od dat výrobce, které uvádí v datovém listu. V případě čipu INA2181A1, použitého pro zesílení napětí z bočníků měření proudu, pouzdro mírně nesesedělo s realitou, zemní ploška nebyla správně slinkována tak, aby šla připojit na zemní potenciál při návrhu PCB. Další chyba se týkala TVS (ochrana před přechodnými přepětovými jevy, např. ESD) sítě pro ochranu portu microUSB. Model součástky měl propojené vstupy do výstupů a tím pádem při ožívování zařízení nechtělo komunikovat s počítačem.

Po importu potřebných modelů součástek, které nebyly v základní knihovně, byly do EAGLE přidány pasivní součástky, které knihovna nabízí. Schéma je rozděleno na tři listy formátu A4 kvůli přehlednosti. První list schématu zobrazuje řídicí část zařízení jako je modul mikrokontroléru ESP32-WROOM-32D, převodník z USB rozhraní na rozhraní UART pro nahrávání programu do mikrokontroléru a komunikaci s skrz sériový monitor. Dále se zde nachází šest tlačítek, jedno z nich slouží jak reset a dalším se mikrokontrolér přepíná do programovacího módu, jinak nelze nahrát nový program. Potom jsou zde tři LED indikátory v barvách modrá, zelená a červená sloužící pro indikaci režimu v jakém

se regulátor zrovna nachází. Funkce ostatních tlačítek je řízena programem, všechny ale mají připojený rezistor na napájecí napětí 3,3 V. V neposlední řadě je zde také regulátor s nízkým úbytkem napětí REG1117 poskytující 3,3 V jako záloha k LT8650. Čtyř pinový konektor Molex je zde pro připojení LCD zobrazovače k I2C sběrnici, v tomto případě je použitý zobrazovač se 16 znaky na řádek a celkově dvěma řádky, výrobci označují tyto LCD moduly jako 1602. Vedle tohoto konektoru se zde nachází rozhraní pro připojení modulu mikro SD karty skrz řadu vertikálních pinů.

Druhá stránka schématu obsahuje veškeré komponenty, které se týkají výkonové části. Konkrétně se jedná o snižující propustný měnič složený ze vstupních a výstupních filtračních kapacit, tranzistorů MOSFET s indukovaným N kanálem, feritové cívky s indukčností 220 uH, rekuperační diody a spodního tranzistoru. Ten je zde umístěn pro zvýšení efektivity přenosu měniče. Budič hradel tranzistorů má označení IRS2104 (vyráběný firmou International Rectifier), obvod pro zesílení napětí z bočníků INA2181A1 má napěťové zesílení 20 a dva kanály, vstupy z bočníků fungují jako diferenční a stejnosměrný odstup může být až 26 V [26].

Třetí stránka schématu se věnuje zapojení obvodu LT8650S je velmi účinný dvoukanálový snižující měnič, který má při nezatíženém výstupu odběrový proud pouze 6,2 uA, maximální výstupní proud 4 A v každém z kanálů a spínací frekvenci až několik MHz, což zajišťuje malé zvlnění proudu a napětí i malou potřebnou indukčnost výstupních cívek [27].

4.2 Návrh desky plošných spojů

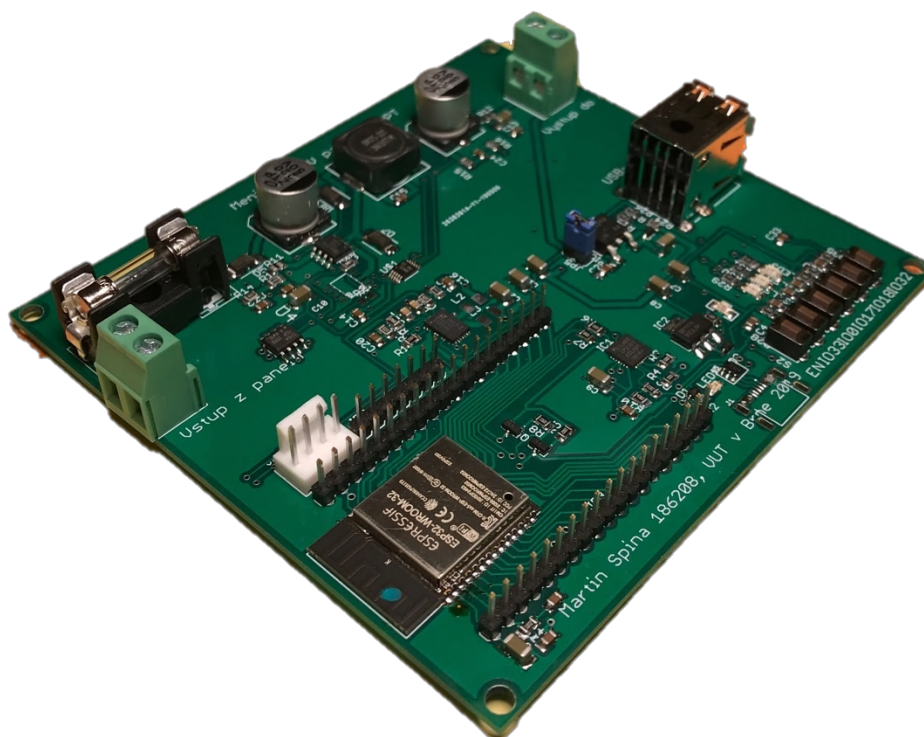
Deska plošných spojů je v angličtině známá jako PCB (Printed Circuit Board). V Layout prostředí EAGLE byly rozmístěny součástky na desku o rozměrech zhruba 100 centimetrů čtverečních. PCB je navržena jako oboustranná, což znamená, že spoje jsou provedeny na obou stranách pokrytých mědí, vrstvy jsou mezi sebou propojeny pokovenými prokovy.

Cesty, které jsou určeny pro vedení signálů do mikrokontroléru byly provedeny cestami o šířce 0,254 až 0,401 mm. Výkonové cesty byly převážně provedeny v šířce 1,016 mm, pokud to dispozice součástek na ploše desky umožňovala. Vzhledem k maximálnímu přenášenému výkonu, který činí maximálně 15 W, je zvolená šířka

dostatečná. Na PCB jsou zároveň vyvedeny všechny piny modulu mikrokontroléru ve formě hřebínku s roztečí 2,54 mm, je to kvůli usnadnění odladování zařízení při ožívování a zároveň to zachovává možnost připojení dalších periférií. Některé propojení mezi komponentami mělo být provedeno kratšími cestami, kvůli snížení indukovaného rušení do jiných částí zapojení. I přes nedodržení několika základních pravidel při návrhu PCB zapojení funguje uspokojivě.

4.3 Osazení součástkami

Deska plošných spojů došla z výroby ve firmě JLCPCB ve velmi dobré kvalitě. Pasivní součástky byly voleny ve velikostech 0805 a 1206, tudíž jejich osazení nebyl problém. Modul ESP32 byl zapájen pomocí ohřátí horkovzdušnou pájecí stanicí, zde bylo potřeba použít nejvyšší průtok vzduchu a teplotu 500 stupňů Celsia. I přes poměrně dlouhou dobu ohřevu to tento modul přežil. Nejsložitější na osazení byly obvody LT8650 a CP2102. LT8650 se bohužel během procesu poškodil a na prototypové desce tedy není osazen. Obvod CP2102 musel být osazen na několik pokusů, teprve pak začal správně komunikovat s ESP32 a počítačem. Kombinace součástek pro povrchovou montáž a THT nebyl problém. Osazená deska je vidět na obrázku 4-1.



Obrázek 4-1 Osazená deska

4.4 Program mikrokontroléru

Program pro řízení celého měniče byl napsán v prostředí Arduino IDE. Využity byly knihovny pro komunikaci s LCD po sběrnici I2C (LiquidcrystalI2C.h), dále knihovna p Wire.h a driver/adc.h, ta je využívána pro řízení vestavěných ADC v modulu ESP32. Využit byl rozsah 0 dB, což odpovídá 1,1 V na vstupu při plném rozsahu převodníku, Bitová hloubka byla snížena z výchozích 12 bitů, kvůli snížení šumu a aditivní chyby ADC na 10 bitů. Lze samozřejmě využít funkci analogRead(), která je standardně součástí příkazů Arduino, ale rozsah vstupního napětí je pak daný na 3,3 V a bitová hloubka 12 bitů. Při použití této funkce byly naměřené hodnoty příliš nepřesné pro spolehlivé určení střídý. Po implementování těchto nových parametrů ADC byly výsledky lepší, ale i přes to je v programu implementováno průměrování z několika měření a další opatření zajišťující správnou funkci. V hlavní funkci void loop() je implementována ochrana proti přebíjení baterie i funkce vypínající měnič, pokud je vstupní napětí menší nebo rovno napětí výstupnímu, je tím zajištěno to, že měnič se vypne v případě, že solární FV panel je nedostatečně osvětlen. Ve funkci void loop() se pak také nachází implementovaný algoritmus MPPT P&O, který se skládá z dotazu na několik podmínek pro snižování

střídy, pokud jsou k tomu splněné podmínky a stejně tak i pro zvyšování střídy. Podmínek je zde několik a přesně kopírují princip funkce algoritmu P&O, mimo jiné se kontrolují podmínky, zda nebylo dosaženo maximálního výstupního napětí nebo maximálního výstupního proudu, v takovém případě musí dojít ke snížení střídy měniče, aby měnič nebyl přetěžován, anebo nebyl přebíjen akumulátor, tyto podmínky jsou v logickém uspořádání OR. U zvyšování střídy se algoritmus ptá, jestli výstupní proud není maximální a výstupní napětí maximální, zde jsou tyto podmínky řazeny s logickým členem AND [29].

Střída je definována jako integer a může nabývat hodnoty od 0 do 255, její krok se řídí proměnnou s názvem krok. Rozsah různých 256 hodnot střídy je dostatečný vzhledem ke strmosti A-V charakteristiky solárního FV panelu. Zároveň je tento algoritmus ošetřený tak, aby nedošlo k přetečení hodnoty střídy mimo výše zmíněné meze. I přes pokročilé ADC v modulu ESP32 se však nepodařilo algoritmus navrhnout tak, aby reportované hodnoty proudů a napětí byly přesné v celém rozsahu měření. Projevuje se zde jistá nelinearita ADC hlavně v první desetíně rozsahu [30]. Na obrázku 4-2 je vidět implementace P&O v prostředí Arduino IDE.

```

223     }
224     else if((Vout_sense>Vout_max) || (Iout_sense>Iout_max) || ((Pin>=Pin_previous && Vin_sense>=Vin_last)
225     || (Pin<=Pin_previous && Vin_sense<=Vin_last))) {
226     if(duty_cycle>krok) {
227     duty_cycle-=krok;
228     }
229     ledcWrite(ledChannel,duty_cycle);
230     }
231
232     else if((Vout_sense<Vout_max) && (Iout_sense<Iout_max) && ((Pin>Pin_previous && Vin_sense<Vin_last)
233     || (Pin<Pin_previous && Vin_sense>Vin_last))) {
234
235     if(duty_cycle<255-krok) {
236     duty_cycle+=krok;
237     }
238     ledcWrite(ledChannel,duty_cycle);
239     }
240

```

Obrázek 4-2 P&O implementace v Arduino IDE

Proměnná	Význam	Proměnná	Význam
Vin_sense	Vstupní napětí [V]	Vout_sense	Výstupní napětí [V]
Iin_sense	Vstupní proud [A]	Iout_sense	Výstupní proud [A]
duty_cycle	Střída [-]	krok	Krok změny střídy [-]
Pin	Vstupní výkon [W]	Pin_previous	Vst. výk. starého cyklu [W]
Vout_max	Maximální výst. nap. [V]	Vin_last	Vst. nap. starého cyklu [V]
Iout_max	Maximální výst. proud [A]	ledChannel	Zástupce výstupních kanálů

Tabulka 1 Význam použitých proměnných

4.5 Oživení a experimentální měření

4.5.1 Oživení

Měnič byl po osazení součástkami připojen skrz USB k port k počítači a následně proběhl pokus o zprovoznění komunikace mezi počítačem a převodníkem USB na UART skrz obvod CP2102. Ukázalo se, že některé vývody převodníku nebyly dobře připájené. Po přepájení se již tento problém neobjevil.






Následně bylo připojeno napětí na výstup do akumulátoru, pak bylo voltmetrem zkontrolováno, jestli se napětí dostane všude tak, tam má.

Potom byl na výstup do akumulátoru připojen akumulátor, na vstup stejnosměrný laboratorní zdroj a počítač do programovacího USB. Skrz sériový monitor byla ověřena funkce děličů pro měření vstupního a výstupního napětí.

Následně byla ověřena funkce PWM výstupu z ESP32 a funkce budiče hradel tranzistorů IRS2104. Při bližším zkoumání byla k jednomu z tranzistorů přidána 18 V Zenerova dioda omezující napětí na gate-source, protože při plném návrhovém vstupním napětí 25 V se na hradle může objevit až plné napájecí napětí, zatím co maximální hodnota napětí na hradle tranzistoru je $U_{gs} = \pm 20$ V.

Ověření funkce bylo provedeno připojením solárního FV panelu značky Einnova Solarline ESP-20. Jedná se solární FV panel s polykrystalickými solárními články. Parametry jsou patrné z obrázku 4-3 níže. Konfigurace solárních článků je 36S bez překlenovacích diod, proto se tento panel nedá použít ve spojení s dalšími panely. Účinnost tohoto konkrétního solárního panelu je 12 % [24], což je v dnešní době spíše

podprůměrná hodnota, alespoň v porovnání s běžnými komerčními FV panely, které mají účinnost v rozmezí 17-18 % [25].

Ěinnova Solarline <i>invented for solar</i>	
Module Type	ESP-20
Rated Maximum Power(Pmax)	20W
Power Tolerance	0-+5W
Current at Pmax(Imp)	1.09A
Voltage at Pmax(Vmp)	18.43V
Short-Circuit Current(Isc)	1.16A
Open-Circuit Voltage(Voc)	22.20V
Nominal Operating Cell Temp. (NOCT)	45°C
Weight	2.3KG
Dimension	350*472*18mm
Maximum Series Fuse Rating	10A
Maximum System Voltage	1000V
Cell Technology	poly-si
All technical data are measured at STC 1000W/m ² , 25°C Am1.5	
    	
Module Application Class A	

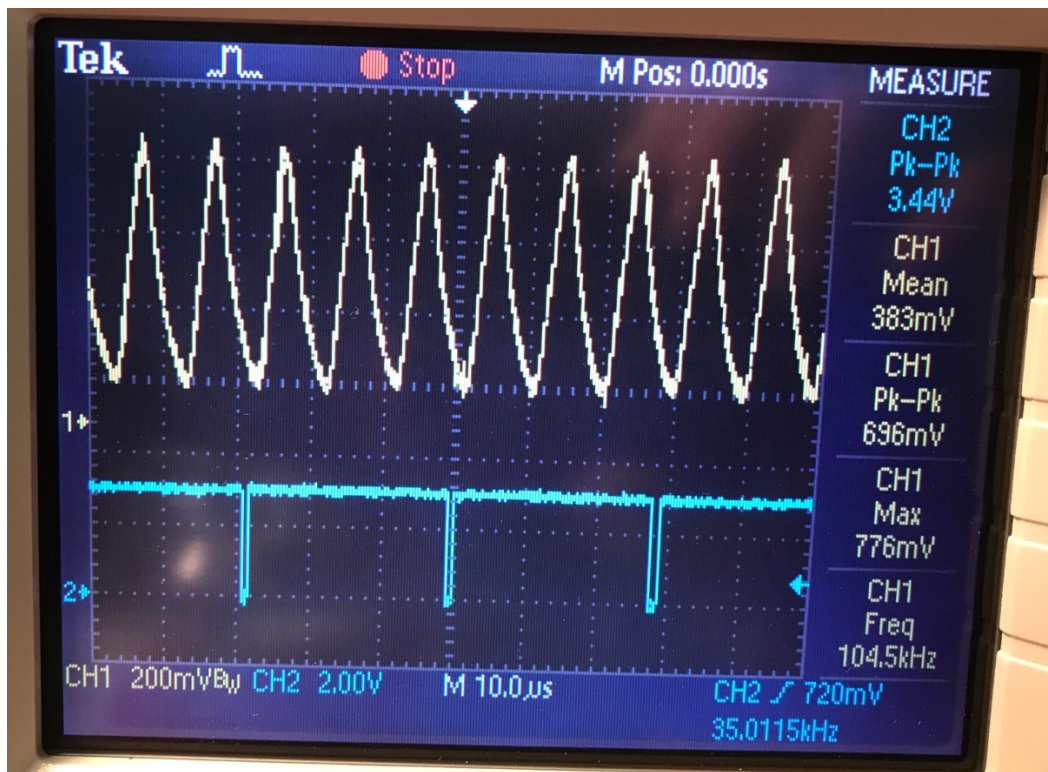
Obrázek 4-3 Parametry testovacího solárního FV panelu

4.5.2 Měření měniče v laboratorních podmínkách

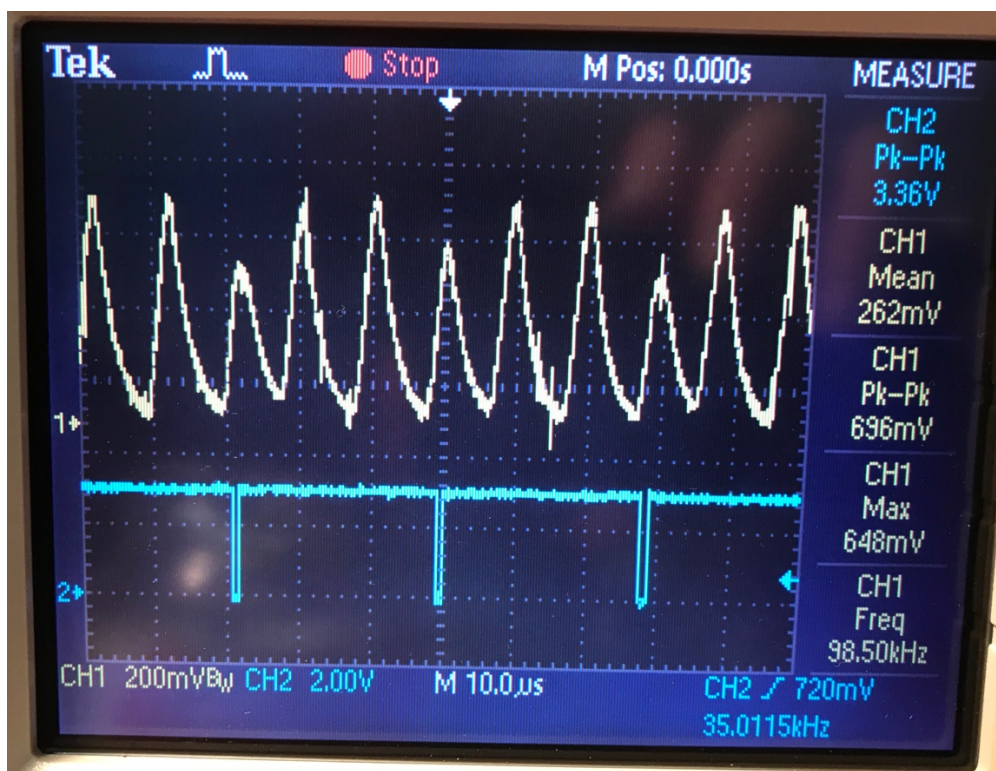
Měření vlastností elektrického zapojení probíhalo v laboratorních podmínkách a zároveň poskytlo prostor pro kalibraci měření napětí a proudů. Kalibrace byla provedena skrz korekční činitele v algoritmu mikrokontroléru. Pracoviště je vidět na obrázku 4-4. Naměřená data jsou přiložena v přílohách jako soubor datalog.txt. Vzhledem k tomu, že snímání výstupního proudu nebylo správně kalibrováno, tak výstupní výkon neodpovídá realitě. Při zatížení výstupu umělou zátěží se podařilo dosáhnout návrhového maximálního výkonu měniče. Při výstupním proudu nad 1 A již bylo znát, že se induktor procházejícím proudem zahřívá, rozdíl teplot však nepřekročil 25 stupňů Celsia, zbytek měniče se nezahřívá.



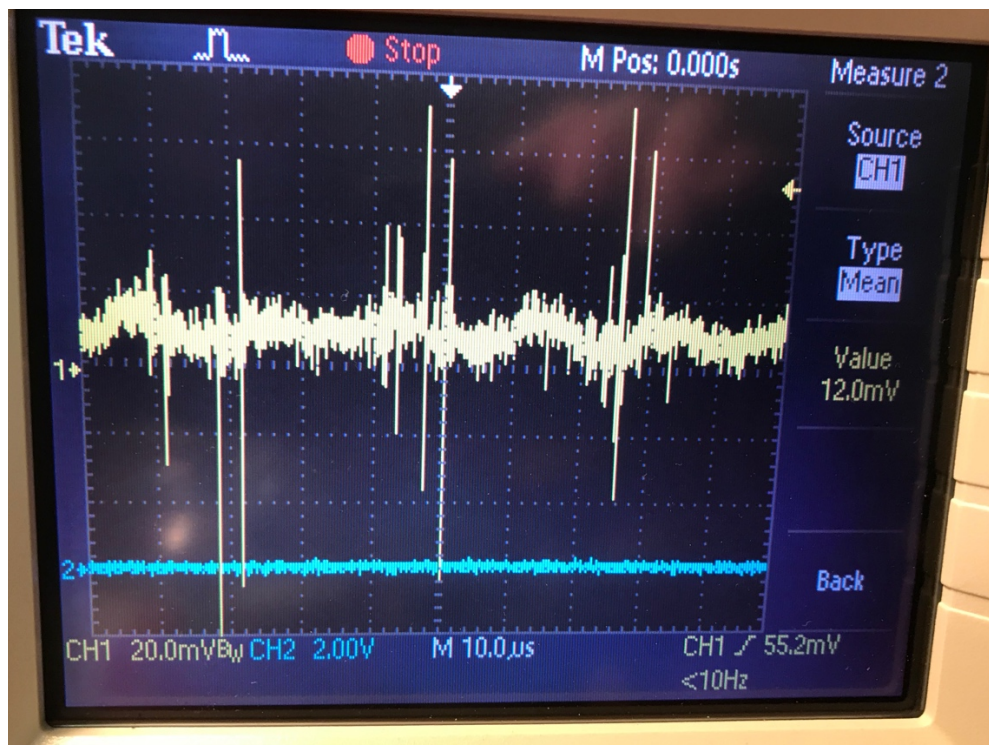
Obrázek 4-4 Laboratorní měření



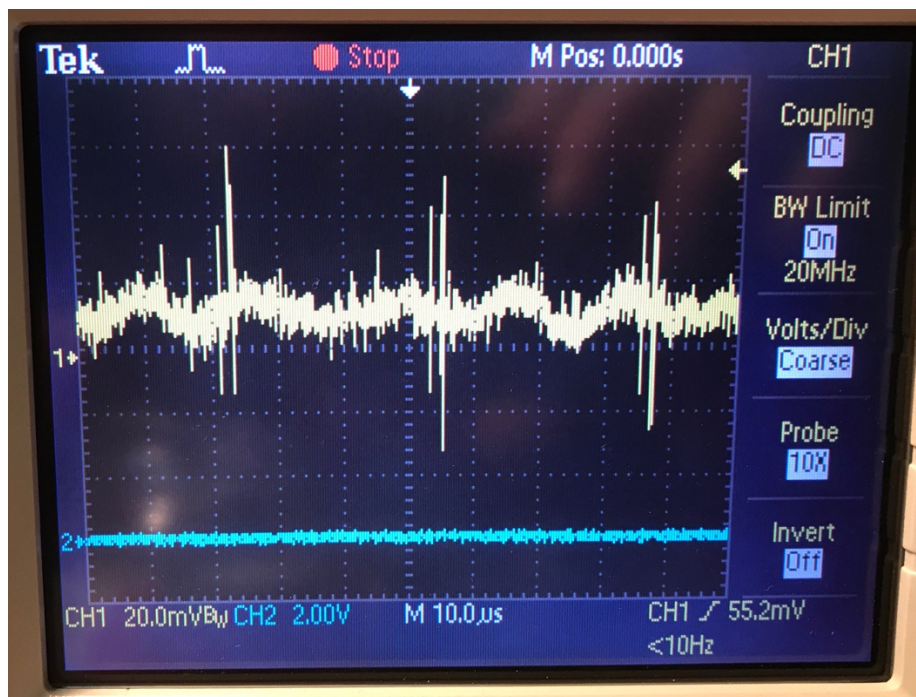
Obrázek 4-5 Průběh proudu Out (žlutá) a PWM (modrá)



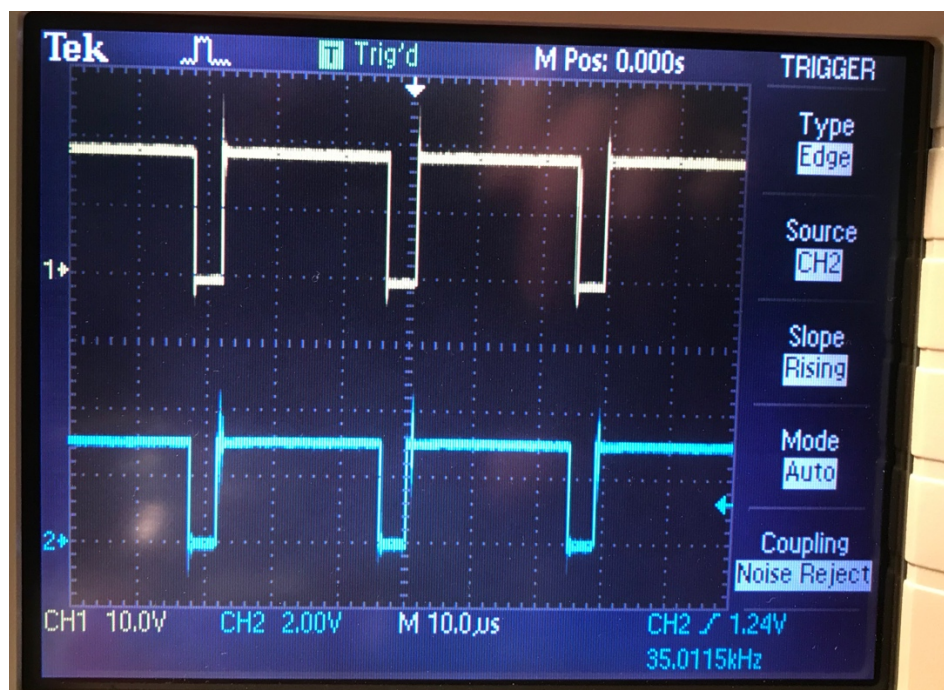
Obrázek 4-6 Průběh proudu I_n (žlutá) a PWM (modrá)



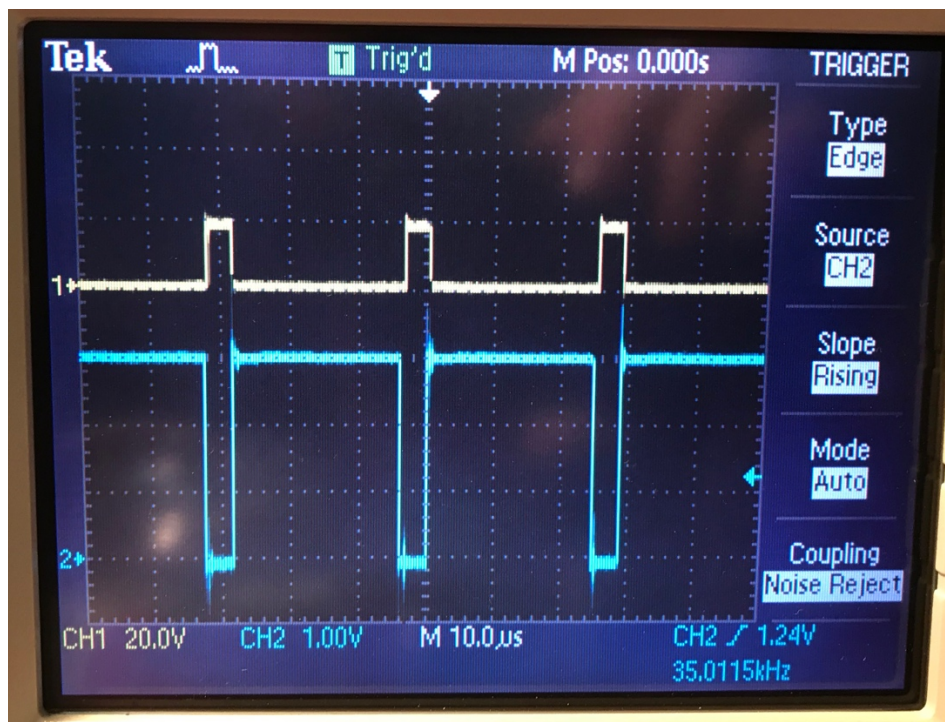
Obrázek 4-7 Průběh úbytku na bočníku Out (žlutá) a PWM (modrá)



Obrázek 4-8 Průběh úbytku napětí In (žlutá) a PWM (modrá)



Obrázek 4-9 Průběh napětí na gate horního tranzistoru (žlutá) a PWM (modrá)

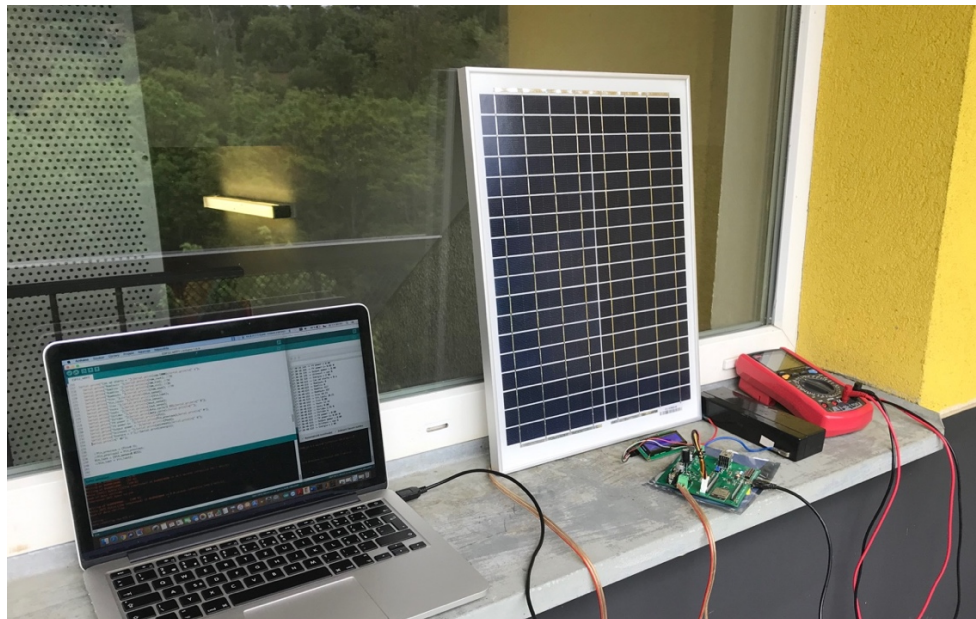


Obrázek 4-10 Průběh napětí gate spodního tranzistoru (žlutá) a PWM (modrá)

Na obrázku 4-5 je vidět průběh napětí z obvodu INA2181A1, trojnásobná frekvence pulzů je pravděpodobně způsobena rušením z budiče hradel tranzistorů IRS2104. Toto rušení souvisí s návrhem desky plošných spojů. Žlutý průběh je úbytek napětí na bočníku měření proudu zesílený o zisk INA2181A1, který je 20. Toto se týká i obrázku 4-6. Obrázek 4-7 zobrazuje průběh úbytku napětí na bočníku měření proudu před obvodem INA2181A1, totéž platí i pro obrázek 4-8. Obrázek 4-9 zobrazuje průběh napětí na hradle horního tranzistoru. Obrázek 4-10 zobrazuje průběh napětí na hradle spodního tranzistoru, oproti obrázku 4-9 je vidět, že je signál invertovaný. Nastavení ochranného času mezi sepnutím prvního tranzistoru a hradla druhého tranzistoru se děje automaticky v budiči IRS2104. Změřené průběhy jsou záměrně pro velkou velikost střídavy, tudíž značné zatížení měniče.

4.5.3 Praktický test

Praktická zkouška probíhala v době, kdy intenzita osvětlení byla velmi omezená, a tudíž naměřené výsledky jsou pro velmi malý výkon. Měření probíhalo s FV panelem naměřeným na oblohu, díky nízké intenzitě bylo k dispozici jen rozptylové sluneční záření a úhel natočení tak neměl zásadní vliv na výstupní výkon. Nástroje použité při praktickém test jsou vidět na obrázku 4-11.



Obrázek 4-11 Praktické měření

Dosažený výkon se pohyboval v rozmezí 0,6 – 1,5 W. Napětí při maximálním výkonu bylo naměřeno 15,4 V, napětí naprázdno bylo 18,3 V, Proud při maximálním výkonu byl 0,09 A. Většinu času během měření byla obloha pokryta tak tlustými mraky, že výkon dosahoval v průměru pouze 0,58 W při 14,5 V a 0,04 A. Pokud by se test uskutečnil za vyšší intenzity osvětlení, tak by bylo možné využít měnič v kombinaci s testovacím solárním FV panelem až na limit návrhového výkonu.

5 ZÁVĚR

Na začátku této práce byly rozebrány podíly obnovitelných zdrojů elektrické energie na energetickém mixu České republiky a jejich vlastnosti. Z objemů vyrobeného množství elektrické energie z obnovitelných zdrojů je vidět, že fotovoltaické solární zdroje mají do budoucna největší potenciál v nahrazování klasických tepelných zdrojů elektrické energie.

Následně byly probrány základní principy funkce fotovoltaických článků, vlastnosti vybraných druhů fotovoltaických článků a následně vlastnosti monokrystalických, polykrystalických a amorfních křemíkových fotovoltaických článků. Podrobněji byla mimo jiné popsána typická konstrukce komerčně dostupných fotovoltaických křemíkových panelů.

Dále byl rozebrán princip funkce sekundárních elektrochemických zdrojů, pro jednotlivé hlavní druhy byly popsány hlavní okruhy použití, jejich přednosti a nevýhody. Zde si lze všimnout, že akumulátory li-ion jsou dnes nejpoužívanějším a nejrychleji se vyvíjejícím typem akumulátoru. V poslední části teorie byly probrány jednotlivé řídicí algoritmy MPPT.

V praktické části této práce se podařilo navrhnout vhodný řídicí MPPT algoritmus implementovaný v mikrokontroléru měniče pro solární fotovoltaický panel, podařilo se navrhnout schéma měniče v softwaru pro navrhování elektrických schémat a desek plošných spojů EAGLE. Navržený motiv PCB byl vyroben ve firmě JLCPCB. Proběhlo vlastnoruční osazení součástkami nezbytnými pro správnou funkci měniče a v poslední části se povedlo demonstrovat správnou a bezpečnou funkci měniče.

Přednosti tohoto zařízení jsou v použití MPPT řídicího algoritmu umožňujícího získat až o desítky procent více energie v porovnání s technologií PWM. Další výhodou je v použití synchronního propustného měniče pro zajištění maximální účinnosti při provozu. Předností je také použití inovativní platformy mikrokontroléru ESP32-WROOM-32D. Měnič využívá rozhraní I2C pro komunikaci s LCD zobrazovačem, SPI je vyvedeno pro možnost logování dat na mikro SD kartu, BLE je připraveno pro komunikaci s chytrým telefonem a Wi-Fi pro propojení s internetem věcí.

Nutno také zmínit několik nevýhod. Hlavní nevýhoda spočívá v nutnosti použití solárního panelu s vyšším napětím v bodě maximálního výkonu, než je maximální napětí baterie v nabitém stavu pro optimální funkci měniče kvůli použití propustného měniče. Další omezení souvisí s použitým MPPT algoritmem, při částečném zastínění může vzniknout více výkonových maxim, tím že algoritmus vyhodnocuje pouze přírůstek výkonu, tak se může stát, že nalezené maximum je pouze lokální a nižší než globální výkonové maximum, fixní krok střídání také prodlužuje nezbytně nutnou dobu k nalezení bodu maximálního výkonu solárního fotovoltaického panelu.

Další vývoj by se mohl zaměřit na vnější zapouzdření celé konstrukce a tím umožnit nasazení v prostředí s vnějšími povětrnostními vlivy. Zajímavý potenciál je také v adaptaci konstrukce měniče na vyšší výkon. V poslední době totiž výrazně klesá cena za měrný výkon solárních fotovoltaických panelů a to zejména ve výkonové třídě 200 až 300 Wp.

Literatura

- [1] ZIVAR, Jiří. Obnovitelné zdroje v ČR v roce 2016. Tzb-info.cz [online]. 29.11.2017 [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/16618-obnovitelne-zdroje-v-cr-v-roce-2016>
- [2] ZIVAR, Mgr. Jiří. Výroba a spotřeba elektřiny v ČR v roce 2017. Tzb-info [online]. 24.6.2018 [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/17553-vyroba-a-spotreba-elekriny-v-cr-v-roce-2017>
- [3] BOER, Karl W. Solar Cells [online]. [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <http://www.chemistryexplained.com/Ru-Sp/Solar-Cells.html>
- [4] Cadmium Telluride. Energy.gov [online]. [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/solar/cadmium-telluride>
- [5] Why Use Gallium Arsenide Solar Cells?. *Altadevices* [online]. 31.11.2017 [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <https://www.altadevices.com/use-gallium-arsenide-solar-cells/>
- [6] PHILIIPPS, Simon. PHOTOVOLTAICS REPORT. *Fraunhofer.de* [online]. 27.10.2018 [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>
- [7] What Is Amorphous Silicon? Why is it so Interesting Now?. *Solar facts and advice* [online]. [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <http://www.solar-facts-and-advice.com/amorphous-silicon.html>
- [8] GWLSunny300m_datasheet. *Ev-power.eu* [online]. [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: https://files.i4wifi.cz/inc/_doc/attach/StoItem/6465/GWL_sunny-300M_datasheet_.pdf
- [9] ABELLA, Miguel Alonso. *Delamination in specific PV modules of NK subfield* [online]. leden 2014 [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Delamination-in-specific-PV-modules-of-NK-subfield_fig3_276253019
- [10] *LGNeonR_ddatasheet* [online]. may.2018 [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: https://files.i4wifi.cz/inc/_doc/attach/StoItem/7021/EN_NeON%20R%2060cells.pdf
- [11] BUCHMANN., Isidor. *Batteries in a portable world: a handbook on rechargeable batteries for non-engineers*. Third ed. Vancouver: Cadex Electronics, 2011. ISBN 978-096-8211-830.
- [12] BUCHMANN, Isidor. BU-204: How do Lithium Batteries Work?. *Battery University* [online]. 1.6.2018 [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/lithium_based_batteries

- [13] BUCHMANN, Isidor. BU-808b: What Causes Li-ion to Die?. *Battery University* [online]. 31.8.2017 [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/bu_808b_what_causes_li_ion_to_die
- [14] *All About Maximum Power Point Tracking (MPPT) Solar Charge Controllers* [online]. [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <https://www.solar-electric.com/mppt-solar-charge-controllers.html>
- [15] FARANDA, Roberto a Sonia LEVA. *Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems* [online]. Piazza Leonardo da Vinci, 32 – 20133 Milano ITALY: Department of Energy Politecnico di Milano, 2018 [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <http://www.wseas.us/e-library/transactions/power/2008/27-545.pdf>
- [16] *Operation of conventional Perturb and Observe (P&O) Algorithm under normal P-V curve with Standard Test Condition* [online]. In: . 2017 [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X17302360>
- [17] ESP32-WROOM-32D & ESP32-WROOM-32U Datasheet. In: *Espressif.com* [online]. Espressif, 2019, 2019 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32d_esp32-wroom-32u_datasheet_en.pdf
- [18] Lohoris. ESP32 maximum PWM frequency. In: *Www.forum.micropython.org/* [online]. 2017 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://forum.micropython.org/viewtopic.php?f=18&t=3717&sid=9d61331c9fa18d3f6309fc3f8aaa90cf>
- [19] *Implement maximum power point tracking algorithms for photovoltaic systems using MATLAB and Simulink* [online]. [cit. 2019-01-07]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/discovery/mppt-algorithm.html>
- [20] PATOČKA, Miroslav. Vybrané statě z výkonové elektroniky. Vyd. 3. Brno: Zdeněk Novotný, 2004. ISBN 80-214-2743-4.
- [21] Switching Converter Power Supplies. Daycounter Inc, [online]. [cit. 2019-01-07]. Dostupné z: <https://daycounter.com/Calculators/Switching-Converter-Calculator2.phtml>
- [22] Průměrné měsíční doby slunečního svitu ve vybraných lokalitách ČR. *Tzb-info* [online]. [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/99-prumerne-mesicni-doby-slunecniho-svitu-ve-vybranych-lokalitach-cr>
- [23] LG_MH1. *Ev-power* [online]. [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <https://www.ev-power.eu/Li-Ion-Technology/Pack-of-100pcs-GB18650-Rechargeable-Battery-3-7V-3200-mAh-Li-ion-LG-MH1.html?cur=2>
- [24] Solar panel GWL/Sunny Poly 20 Wp 36 cells (MPPT 18V). In: EV-Power.eu [online]. Průmyslová, Praha [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: https://files.evpower.eu/inc/_doc/attach/StoItem/4349/190131_panel_Sunny_Poly_20Wp_A4.pdf
- [25] Solar panel GWL/Sunny Poly 280Wp 60 cells In: EV-Power.eu [online]. Průmyslová, Praha [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: https://files.evpower.eu/inc/_doc/attach/StoItem/6465/GWL_sunny-280P_datasheet_.pdf

- [26] INA2181A1 Datasheet. In: *Texas Instrumens* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina2181.pdf?HQS=TI-null-null-mousermode-df-pf-null-wwe&DCM=yes>
- [27] *LT8650 Dual Channel 4A, 42V, Synchronous Step-Down Silent Switcher 2 with 6.2 μ A Quiescent Current* [online]. In: . [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/lt8650s.pdf>
- [28] SATTEL, Sam. *Autodesk acquires EAGLE: Q&A and a look into future!* [online]. In: . 1.7.2016 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/products/eagle/blog/autodesk-acquires-eagle-qa-look-future/>
- [29] CHOI, Yejee, Monineath KHUN a Giselle VERBERA. *Maximum Power Point Tracking* [online]. In: . 100 Institute Rd, Worcester, MA 01609, Spojené státy americké: WORCESTER POLYTECHNIC INSTITUTE, 23.3.2017 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: https://web.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-032317-080235/unrestricted/Maximum_Power_Point_Tracking.pdf
- [30] Analog to Digital Converter. In: *Espressif* [online]. [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/api-reference/peripherals/adc.html>
- [31] MALLA, Siva. MPPT based Photovoltaic (PV) system: PV system is operated with MPPT algorithm and converter. In: *Math Works* [online]. Natick, Massachusetts, USA: The MathWorks, unknown, 10.12.2012 [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/39406-mppt-based-photovoltaic-pv-system>

Seznam symbolů a zkratek

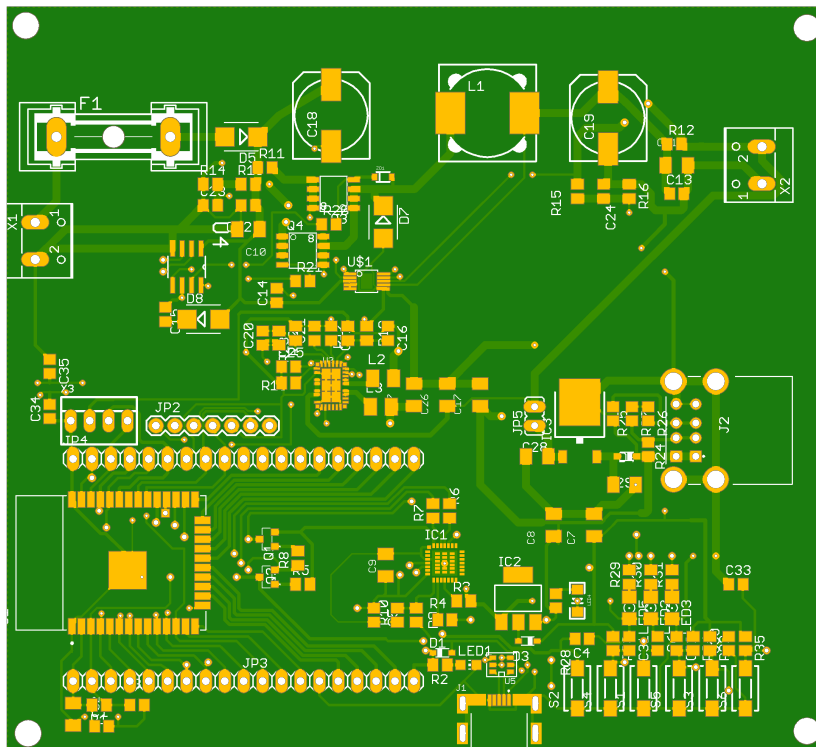
Zkratky:

MPPT	...	Maximum Power Point Tracking
MPP	...	Maximum Power Point
BLE	...	Bluetooth low energy
PV	...	Photovoltaic
FV	...	Fotovoltaický
Si	...	Křemík
Li-ion	...	Lithium iont
UPS	...	Uninterruptible Power Supply
Pa0	...	Perturb and Observe
A/D	...	Analogově/číslicový
MOS-FET	...	Metal Oxyde Semiconductor-Field Efect Transistor
PWM	...	Pulzně šířková modulace
SOC	...	State Of Charge – stav nabití akumulátoru
V_{nom}	...	Nominální napětí plně nabitého akumulátoru
W_p	...	Maximální výkon FV panelu
Kč	...	Koruna česká
PCB	...	Printed Circuit Board, deska plošných spojů
TVS	...	Transient Voltage Suppresion
ECAD	...	Electrical Comuputer Aided Design
THT	...	Through Hole Technology
SMT	...	Surface Mount Technology
LCD	...	Liquid Crystal Display
ADC	...	Analog to Digital Converter
USB	...	Universal Seriál Bus
UART	...	Universal Asynchronout Receiver and Transmitter
ATT	...	Attenuation
SD	...	Secure Digital
GPIO	...	General Purpose Input Output
SPI	...	Serial Peripheral Interface

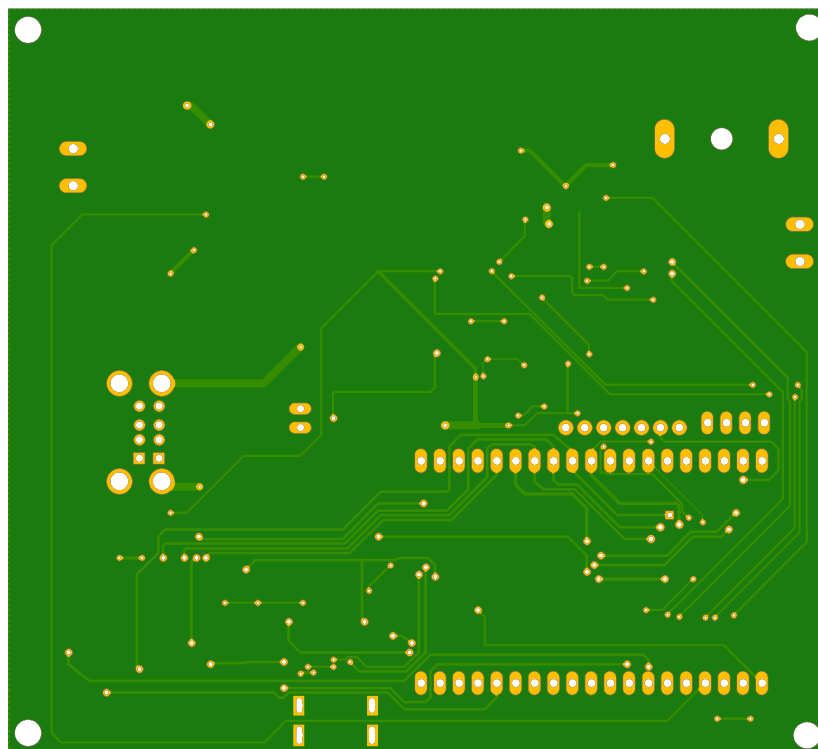
Symbols:

U	...	napětí	[V]
I	...	proud	[A]
I_{mpp}		proud v bodě maximálního výkonu	[A]
U_{mpp}		napětí v bodě maximálního výkonu	[V]
P		elektrický výkon	[W]
V_{nom}		nominální napětí akumulátoru	[V]
I_{SC}		zkratový proud solárního panelu	[A]
V_{OC}		napětí naprázdno solárního panelu	[V]
V_1		napětí akumulátoru při kapacitě AH_1	[V]
AH_1		kapacita akumulátoru při napětí V_1	[Ah]
f_{pwm}		frekvence PWM signálu	[kHz]
L		Indukčnost	[uH]
U_{GS}		Napětí mezi Gate a Source	[V]

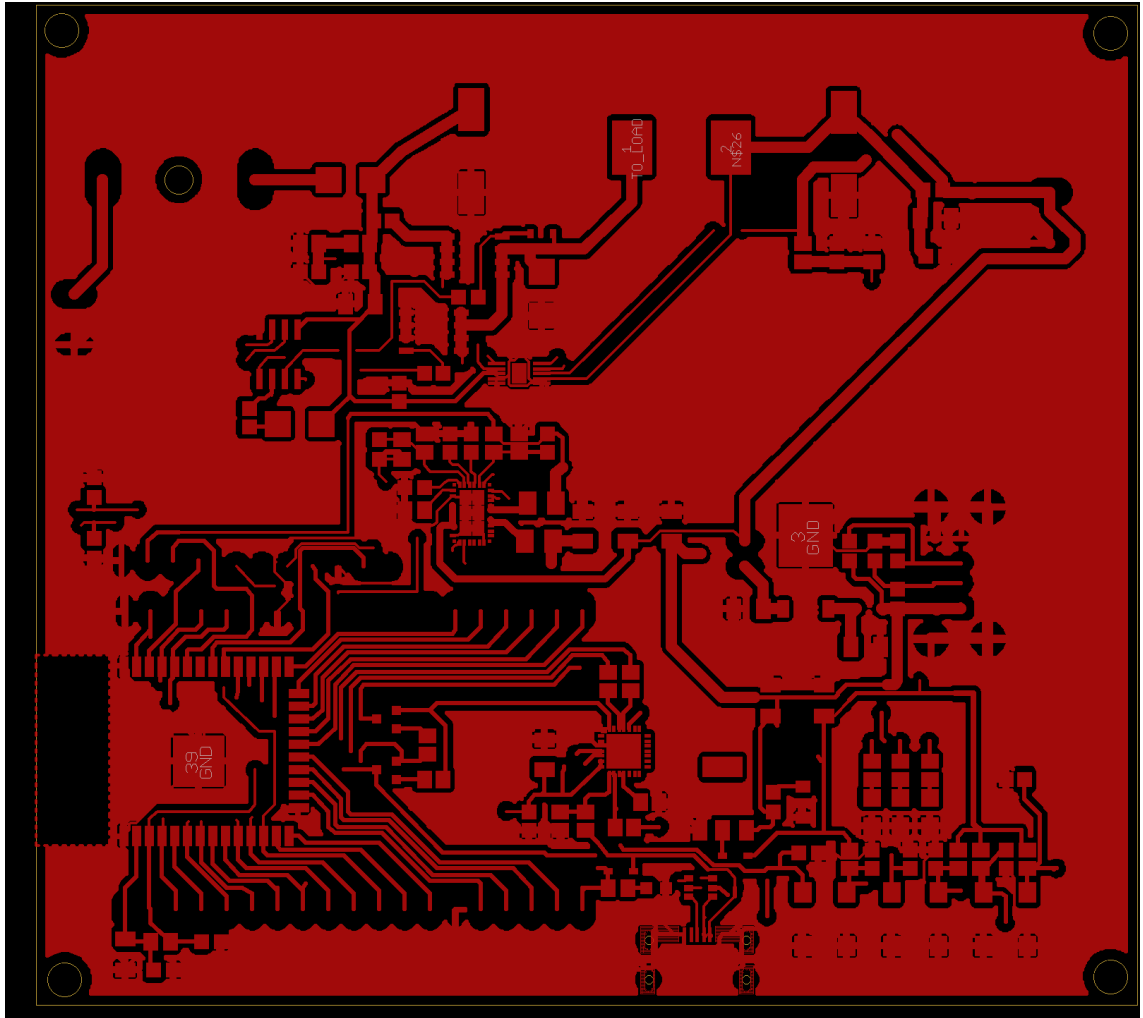
Přílohy



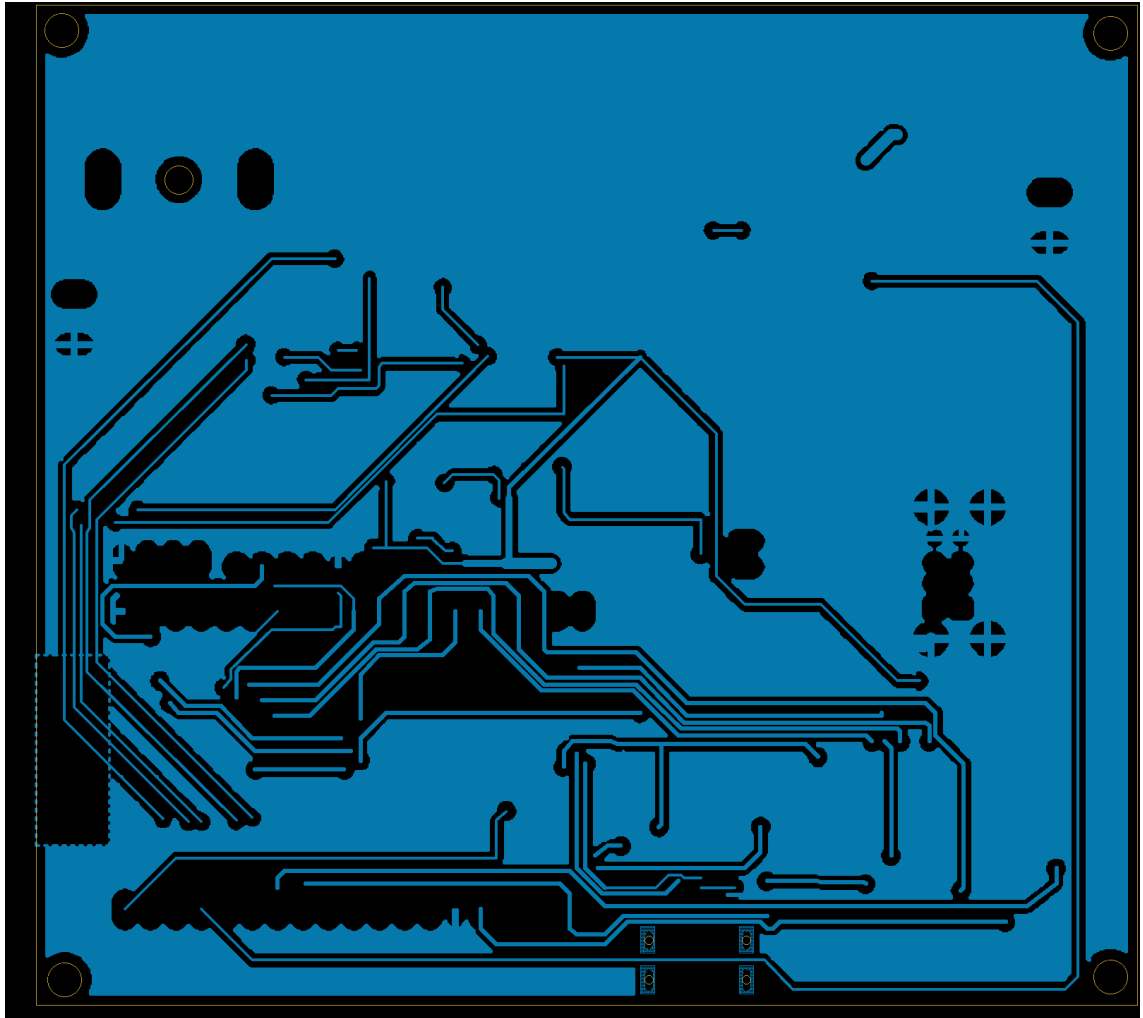
Obrázek 5-1 Pohled na PCB top



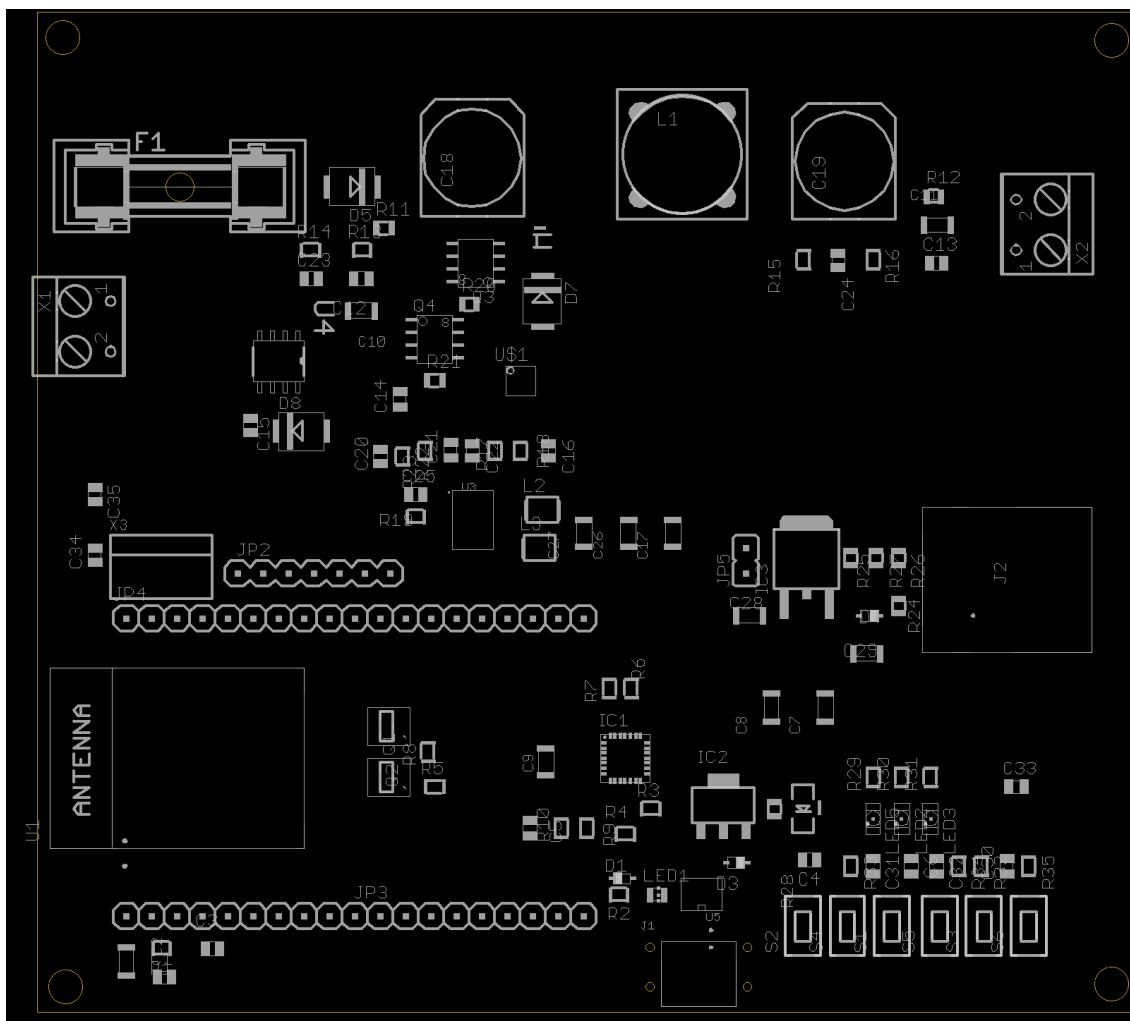
Obrázek 5-2 Pohled na PCB bottom



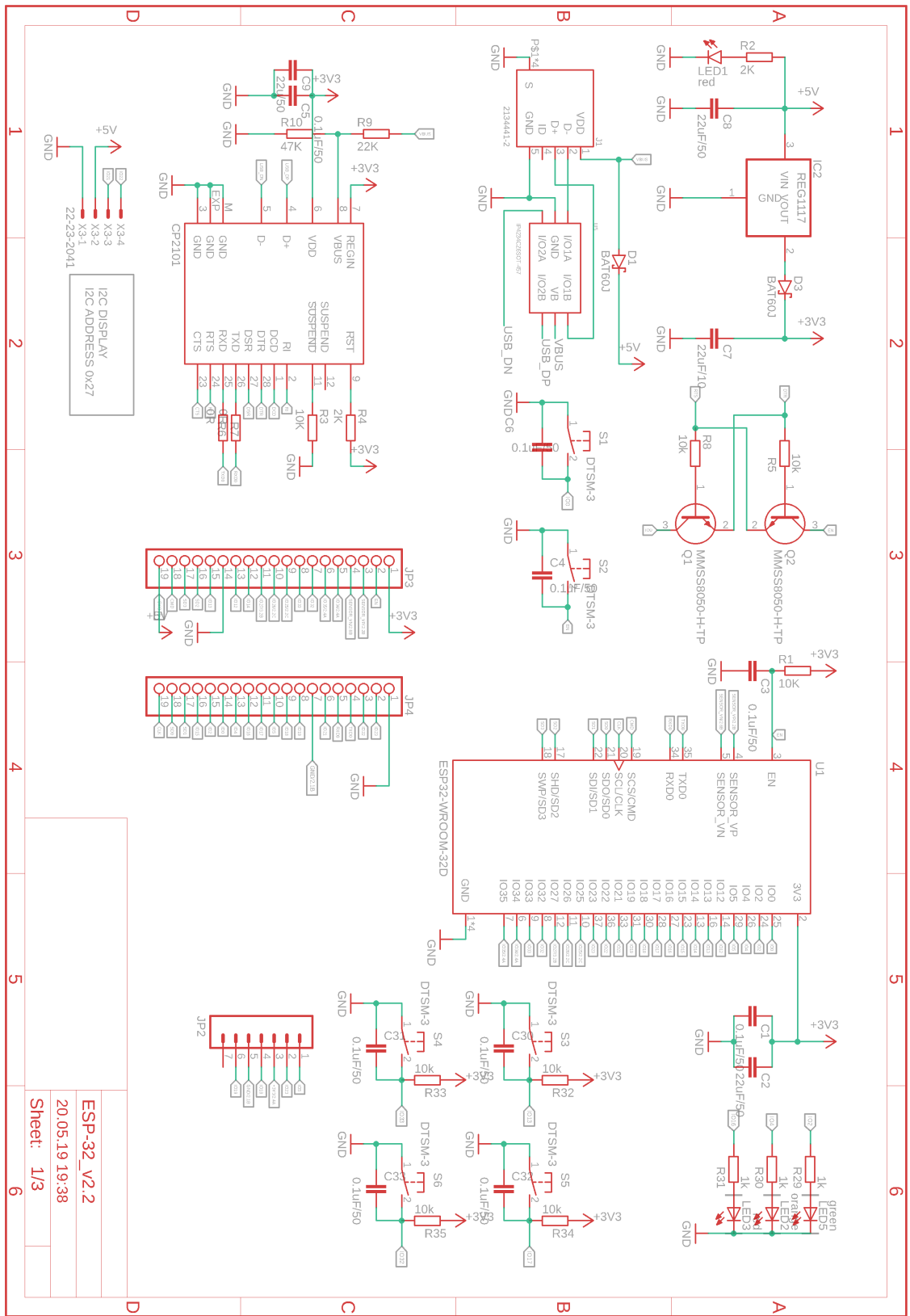
Obrázek 5-3 PCB – top (měď)



Obrázek 5-4 PCB – bottom (měď)

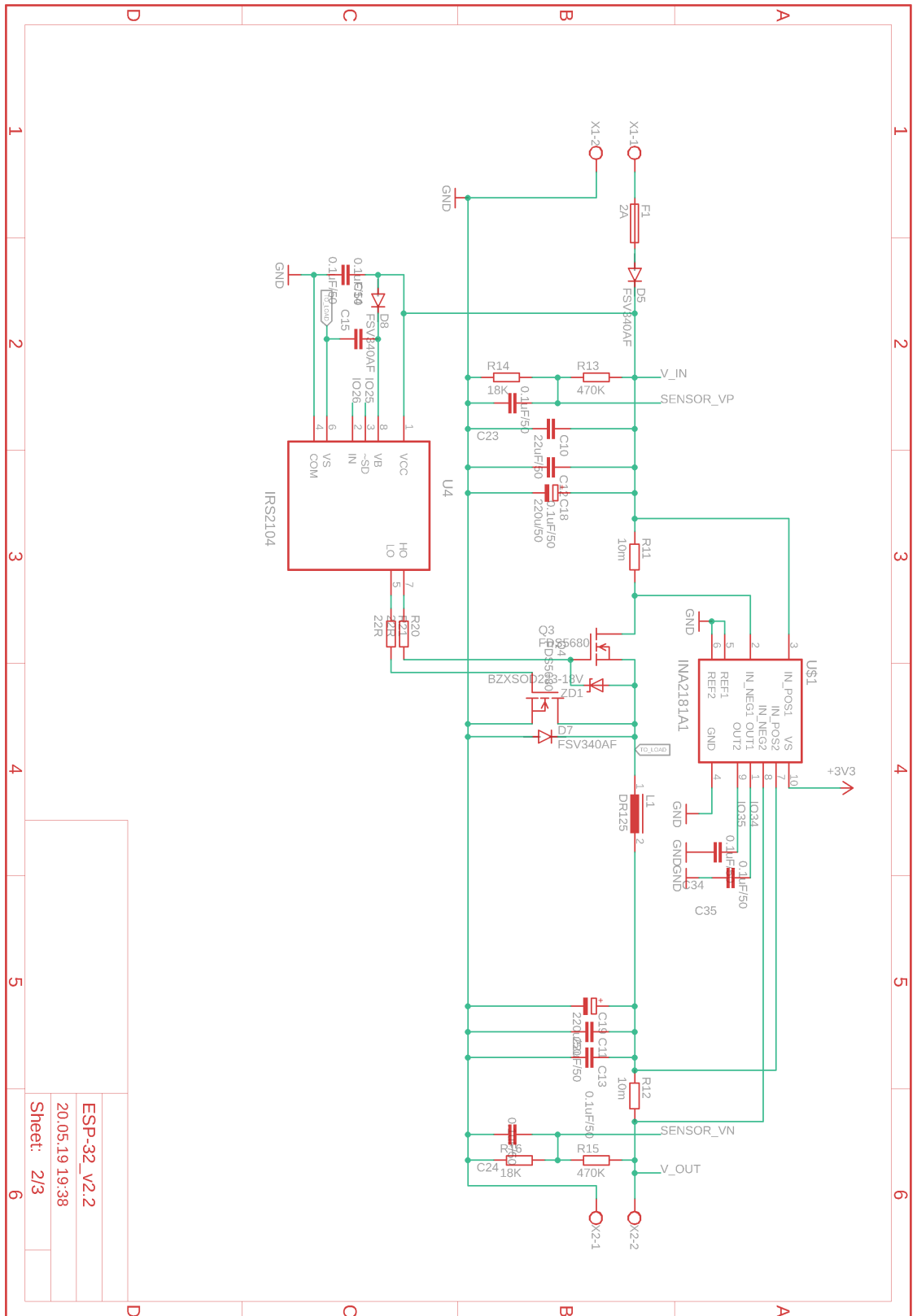


Obrázek 5-5 PCB – rozmístění součástek

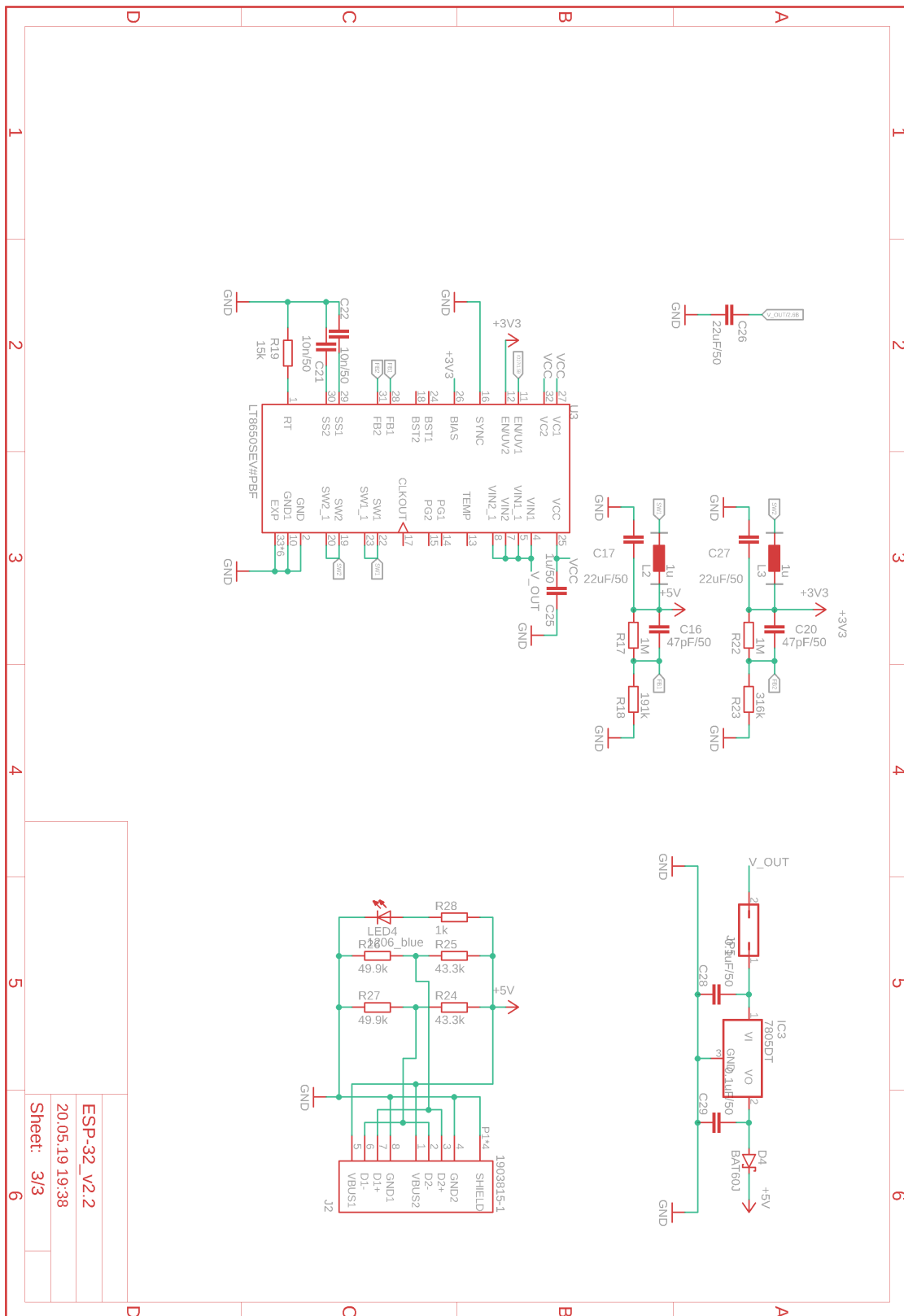


Obrázek 5-6 Schéma strana 1

ESP-32_V2.2
20.05.19 19:38
Sheet: 1/3



Obrázek 5-7 Schéma strana 2



ESP-32_V2.2
 20.05.19 19:38
 Sheet: 3/3

Obrázek 5-8 Schéma strana 3

▼	CD	Dnes 6:51	--	Složka
▼	Arduino	Dnes 6:54	--	Složka
	ESP32_MPPT.ino	Dnes 6:12	8 kB	Arduin...rce File
▶	DataLog	Dnes 7:00	--	Složka
▼	EAGLE	Dnes 6:53	--	Složka
	ESP-32_v2.2.brd	Včera 3:51	398 kB	EAGLE Board
	ESP-32_v2.2.sch	Předevčirem 19:38	1,5 MB	EAGLE...hematic
	Rozpiska součástek.txt	Dnes 6:09	11 kB	Prostý text
▼	Gerber	Dnes 6:53	--	Složka
	Gerber.zip	Dnes 1:33	295 kB	Archiv ZIP
▼	Matlab_Simulink	Dnes 6:53	--	Složka
	MPPT.slx	Dnes 6:58	41 kB	Simulink Model
▼	PDF	Dnes 6:53	--	Složka
	Špina-M-BP.pdf	17. 5. 2019 23:43	609 kB	Adobe...cument

Obrázek 5-9 Obsah přiloženého CD