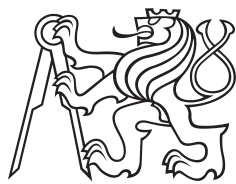


Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra mikroelektroniky

Měnič s hlídáním bodu přenosu maximálního výkonu ze solárního panelu

Adam Krátký

Školitel: Ing. Jan Novák, Ph.D.
Studijní program: Elektronika a komunikace
Leden 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Krátký** Jméno: **Adam** Osobní číslo: **483906**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Měnič s hlídáním bodu přenosu maximálního výkonu ze solárního panelu

Název bakalářské práce anglicky:

Inverter with Maximum Power Point Tracker Solar Charge Controller

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s metodami sledování maximálního výkonového bodu (MPPT) fotovoltaických panelů (FV).
- 2) Prostudujte možnost řízení výkonu FV panelů o nominálním špičkovém výkonu 1 kW pro nabíjení LiFePO akumulátorů.
- 3) Zvolte vhodnou konfiguraci měničů pro napájení výpočetní techniky např. notebook s příslušenstvím.
- 4) Navrhněte zapojení MPPT měniče s funkcí nabíjení akumulátoru a měniče pro napájení výpočetní techniky. Zařízení bude obsahovat displej pro zobrazení provozních dat.
- 5) Zapojení realizujte ve formě funkčního vzorku.
- 6) Proveďte ověřovací měření.
- 7) Zhodnoťte dosažené výsledky a navrhněte případná rozšíření.

Seznam doporučené literatury:

- 1) R. Haselhuhn, Fotovoltaika, Miroslav Hrdina, Ing. - HEL 2011, ISBN 978-80-86167-33-6.
- 2) M. Boxwell, Solar Electricity Handbook - 2021 Edition, Greenstream Publishing 2021, ISBN 1907670742.
- 3) J. Prasad, Maximum Power Point tracker solar charge controller (MPPT), LAP Lambert Academic Publishing 2012, ISBN 3659185086.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jan Novák, Ph.D. katedra mikroelektroniky FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **01.02.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **10.01.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2023**

Ing. Jan Novák, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Pavel Hazdra, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

Poděkování

Děkuji Ing. Janu Novákovi, Ph.D. za cenné rady a doporučení při tvorbě mé bakalářské práce.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl veškerou použitou literaturu.

V Praze, 8. ledna 2023

I declare that this work is all my own work and I have cited all sources I have used in the bibliography.

Prague, January 8, 2023

Abstrakt

Tato práce se věnuje návrhu MPPT měniče určeného k maximalizaci výkonu dodávaného PV panelu do nabíjeného akumulátoru, sestavením jeho prototypu, naprogramováním řídicího firmwaru a následným otestováním funkčnosti. Jedná se o konstrukci synchronního snižujícího měniče řízeného mikrokontrolérem. Pro implementaci MPPT algoritmu byla použita metoda *Perturb and observe*. Dále jsou ve firmwaru implementovány funkce k ochraně nabíjeného akumulátoru a měniče. V práci byl také navrhnut snižující zdroj pro napájení notebooku z připojeného akumulátoru.

Klíčová slova: MPPT, snižující spínaný zdroj, fotovoltaický panel, mikrokontrolér

Školitel: Ing. Jan Novák, Ph.D.
Technická 1902/2 Praha, A3-231

Abstract

This thesis focuses on the design of an MPPT converter intended to maximize the power delivered by PV panels to a charged battery, building its prototype, programming the control firmware and then testing its functionality. It involves the design of a synchronous step-down converter controlled by a microcontroller. The Perturb and observe method was used to implement the MPPT algorithm. Furthermore, the firmware implements functions to protect the charged battery and inverter. Furthermore, a step-down power supply has been proposed in this work to power a laptop from a connected battery.

Keywords: MPPT, step-down converter, photovoltaic panel, microcontroller

Title translation: Inverter with Maximum Power Point Tracker Solar Charge Controller

Obsah

1 Úvod	1	5.2 Testování	30
2 Teoretický úvod	3	5.2.1 Pomocné zdroje	30
2.1 Fotovoltaický panel	3	5.2.2 Hlavní měnič	31
2.1.1 Fotovoltaický jev	3	5.2.3 Hotový měnič s MPPT	
2.1.2 Ekvivalentní obvod	4	algoritmem	31
2.1.3 Zapojení PV panelu	5	6 Firmware	33
2.2 MPPT algoritmus	5	6.1 Použité softwarové vybavení	33
2.2.1 Metoda <i>Hill-climbing</i>	6	6.2 Stavový automat	33
2.3 Akumulátor	7	6.3 Konfigurace periférií	33
2.3.1 Nabíjení LFP	7	6.3.1 Hodiny	33
2.4 Spínané zdroje	7	6.3.2 ADC	34
2.4.1 Snižující měnič	8	6.3.3 Časovač	34
3 Návrh řešení	11	6.3.4 I2C	34
3.1 Blokové schéma	11	6.4 Popis programových funkcí	34
3.2 Mikrokontrolér	12	6.4.1 Získávání měřených hodnot	34
3.2.1 Vývojová deska	12	6.4.2 Kontrola chybových stavů	34
3.2.2 Periferie mikrokontroléru	12	6.4.3 Počáteční hodnota PWM	35
3.2.3 Nahrávání programu	12	6.4.4 MPPT	35
3.3 Měření	13	6.4.5 Displej	35
3.3.1 Měření napětí	13	7 Ověřovací měření	37
3.3.2 Měření proudu	14	7.1 Použité vybavení	37
3.3.3 Rozlišení	15	7.2 Zapojení	37
3.4 Snižující měnič	16	7.2.1 121GW	38
3.4.1 Volba induktoru	16	7.2.2 Zátěž	38
3.4.2 Volba spínacích tranzistorů	17	7.2.3 Laboratorní zdroj	38
3.4.3 Tranzistorový budič	18	7.3 Postup měření	39
3.5 Odpojovač	19	7.4 Naměřené hodnoty	39
3.6 Pomocné napájecí zdroje	20	8 Závěr	41
3.7 Displej	21	Literatura	43
3.8 Měnič napájení výpočetní		A Seznam použitých zkratk	45
techniky	22	B Schémata a DPS	47
3.8.1 Zapojení	23	C Obsah elektronické přílohy	55
4 Tvorba schématu a DPS	25		
4.1 Tvorba schématických značek a			
pouzder	25		
4.1.1 Schématické značky	25		
4.1.2 Pouzdra	25		
4.2 Schéma	26		
4.3 DPS	26		
4.3.1 Prokovy	27		
4.3.2 Návrh	27		
5 Osazení, oživení a testování DPS	29		
5.1 Osazování	29		
5.1.1 Použité vybavení	29		
5.1.2 Postup	29		

Obrázky

2.1	Struktura PV článku (převzato z [7])	3	B.4	MPPT - zadní strana DPS - osazovací schéma	51
2.2	Ekvivalentní obvod fotovoltaického článku	4	B.5	Napájecí zdroj výpočetní techniky - přední strana DPS - vrstva mědi ..	52
2.3	Voltampérové charakteristiky PV článku (převzato z [7])	4	B.6	Napájecí zdroj výpočetní techniky - přední strana DPS - osazovací schéma	52
2.4	Schéma vnitřního zapojení PV panelu	5	B.7	Napájecí zdroj výpočetní techniky - zadní strana DPS - vrstva mědi ..	53
2.5	Ilustrace průběhu výkonu na generátoru se 2 lokálními maximy ..	6	B.8	Napájecí zdroj výpočetní techniky - zadní strana DPS - osazovací schéma	53
2.6	Schéma snižujícího měniče	8			
2.7	Schéma synchronního měniče	9			
3.1	Blokové schéma měniče	11			
3.2	Vývojová deska STM32-Blue Pill	12			
3.3	ST-Link/V2	13			
3.4	Napěťový dělič	13			
3.5	Napěťové děliče pro měření napětí ..	14			
3.6	Obvod měření proudu	15			
3.7	Zapojení hlavního měniče	18			
3.8	Obvod tranzistorového odpojovače ..	19			
3.9	Obvod pomocných napájecích zdrojů	20			
3.10	Obvod voliče napájení pomocných zdrojů	21			
3.11	Konektor displeje	21			
3.12	Modul OLED displeje zobrazujícího provozní data	21			
3.13	Napájecí konektor notebooku Thinkpad	22			
4.1	Tvorba schématické značky pro součástku TLP3905	25			
4.2	Tvorba pouzdra pro toroidní cívku ..	26			
5.1	Osazená DPS - přední strana ...	30			
5.2	Osazená DPS - zadní strana ...	30			
7.1	Schéma měření	37			
7.2	Uspořádání měřicího stanoviště ..	38			
B.1	MPPT - přední strana DPS - vrstva mědi	50			
B.2	MPPT - přední strana DPS - osazovací schéma	50			
B.3	MPPT - zadní strana DPS - vrstva mědi	51			

Tabulky

3.1 Požadavky na návrh	11
3.2 Parametry zvoleného tranzistoru	17
3.3 Volba napájecího výkonu notebooku	22
7.1 Použité vybavení	37
7.2 Naměřené hodnoty	39



Kapitola 1

Úvod

V práci se zabývám návrhem a konstrukcí fotovoltaického MPPT měniče, který ve fotovoltaické instalaci slouží k maximalizaci výkonu dodávaného fotovoltaickými panely. Vzhledem k současné ekonomické situaci na trhu s elektrickou energií se čím dál tím více vyplácí instalace domácí fotovoltaické elektrárny. Tato elektrárna může sloužit ke snížení nákladů na běh domácnosti, případně i ke zvýšení odolnosti proti výpadkům distribuční soustavy.

Cílem práce je navrhnout a zkonstruovat funkční prototyp měniče s funkcí sledování bodu maximálního výkonu (dále jen MPPT). Kromě této funkce musí měnič také poskytovat ochrany, které zamezí poškození nabíjeného akumulátoru a samotného měniče. Dále se práce věnuje možnosti napájení výpočetní techniky z připojeného akumulátoru.

První kapitola práce se věnuje teorii potřebné k realizaci měniče. Zbývající kapitoly se věnují jednotlivým krokům, které vedly k vytvoření prototypu a ověření jeho funkčnosti.

Kapitola 2

Teoretický úvod

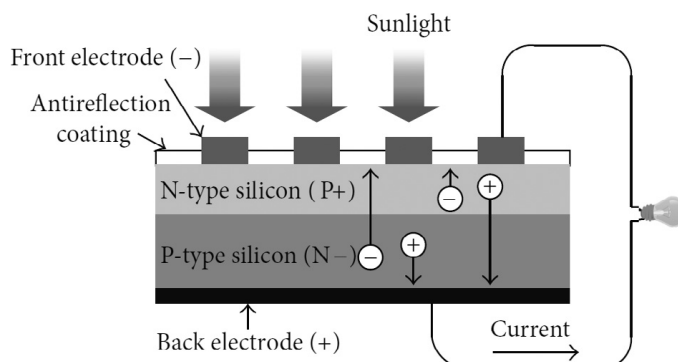
V této kapitole se v práci zabývám teorií potřebnou k vytvoření měniče a naprogramování řídicího firmware.

2.1 Fotovoltaický panel

Fotovoltaické (dále jen PV) články, z jejichž sérioparalelních kombinací se sestavují PV panely, jsou schopny na základě PV jevu přeměňovat dopadající energii v podobě fotonu na energii elektrickou, která poté může být využita vně článku.

2.1.1 Fotovoltaický jev

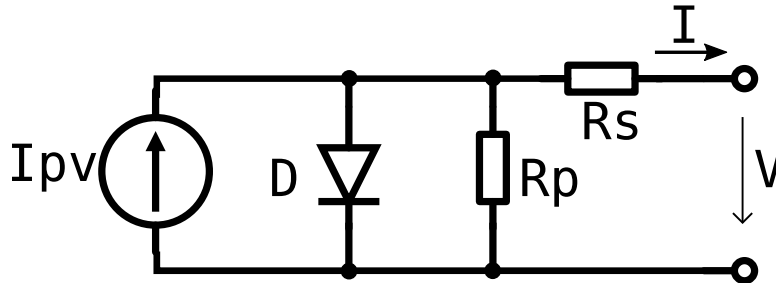
Při dopadu fotonu na PV článek (obr. 2.1) dochází ve vyprázdněné oblasti na rozhraní materiálu P-N k tvorbě párů elektron-díra. Vzniklá díra je poté přesunuta elektrickým polem, které je ve vyprázdněné oblasti, do materiálu typu P. Vzniklý volný elektron je stejným způsobem dopraven do materiálu typu N. Odtud je pak odváděn skrz elektrodu do vnějšího obvodu, kde vykoná práci, a pak zpět na opačnou elektrodu, kde rekombinuje s dírou.



Obrázek 2.1: Struktura PV článku (převzato z [7])

2.1.2 Ekvivalentní obvod

PV článku lze přiřadit ekvivalentní obvod (obr. 2.2), který do určité míry simuluje jeho chování.



Obrázek 2.2: Ekvivalentní obvod fotovoltaického článku

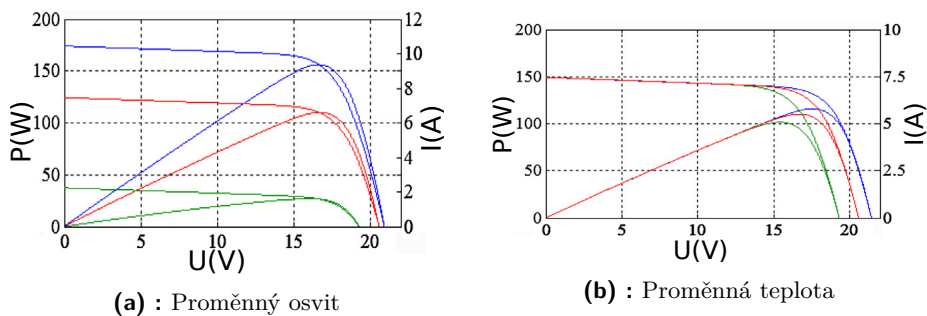
V tomto zapojení reprezentuje proudový zdroj I_{pv} proud generovaný PV jevem, dioda D PN přechod uvnitř článku, R_p svodový odpor, R_s sériový odpor nakontaktování článku. Většina těchto parametrů se mění s teplotou.

K tomuto zapojení můžeme získat následující vyjádření výstupního proudu I (podle [7])

$$I = I_{pv} - I_o \left[\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{akT} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p}, \quad (2.1)$$

kde I_{pv} je proud generovaný PV jevem, I_o saturační proud diody D , q elektrický náboj elektronu, V napětí na výstupu, R_s sériový odpor fotočlánku, a činitel kvality diody D , k Boltzmannova konstanta, T teplota PV článku, R_p svodový odpor PV článku.

Pomocí tohoto předpisu můžeme vykreslit následující voltampérové charakteristiky včetně průběhu výkonu [7].



Obrázek 2.3: Voltampérové charakteristiky PV článku (převzato z [7])

Graf 2.3a ukazuje závislost výkonu a proudu PV článku na jeho napětí pro 3 úrovně osvětlení při konstantní teplotě. Modrá představuje nejvyšší úroveň osvětlení, červená střední úroveň osvětlení a zelená nízkou úroveň osvětlení.

Druhý graf 2.3b zobrazuje závislost výkonu a proudu PV článku na jeho napětí pro 3 různé teploty při konstantním napětí. Modrá představuje nejnižší

teplotu, červená střední teplotu a zelená nejvyšší teplotu. Rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší teplotou je 30 K.

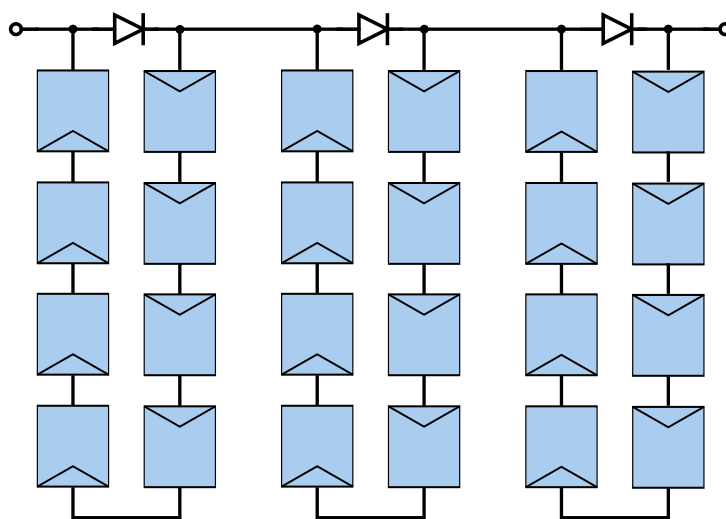
Z grafu 2.3a můžeme vidět, že MPP se s proměňujícím se osvitom po grafu posouvá vertikálně. Tím pádem by se mohlo zdát, že by ke sledování MPP mohlo stačit pouze udržovat konstantní napětí na PV článku. Tato metoda by ale bohužel selhala při změně teploty, jak můžeme vidět v grafu 2.3b.

2.1.3 Zapojení PV panelu

PV panely jsou sestavovány ze sérioparalelních kombinací PV článků. Od množství článků v sériovém zapojení se poté odvíjí nominální napětí panelu.

Jelikož bývají PV články uvnitř panelů rozprostřeny po velké ploše, je velmi pravděpodobné, že nastane situace, kdy některé z těchto článků nebudou dostatečně osvětleny (stín vytvořený kupříkladu drátem hromosvodu). Tyto články poté energii nevyrábí, ale naopak spotřebovávají, což může vést k přehřívání zastíněného článku a jeho následné degradaci.

Aby se tomuto stavu předešlo, tak se do PV panelů instalují diody (obr. 2.4), které nevyrábějící článek (spíše sérii článků) přemostí a tím ochrání článek a zvýší výstupní výkon.



Obrázek 2.4: Schéma vnitřního zapojení PV panelu

2.2 MPPT algoritmus

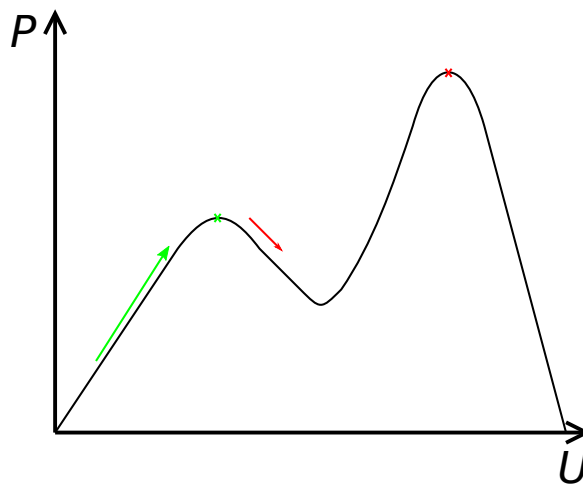
Algoritmus pro sledování bodu maximálního výkonu (dále jen MPPT) slouží k nalezení optimálního zatížení generátoru, v tomto případě PV panelů, a to tak, aby odebíraný výkon byl co možná největší i přes měnící se podmínky na generátoru (např. osvit nebo teplota PV panelu) nebo zátěži (např. změna napětí akumulátoru). Toho může MPPT algoritmus dosáhnout mnoha způsoby, například metodou zvanou *Hill-climbing* [1].

2.2.1 Metoda *Hill-climbing*

Metoda *Hill-climbing* nebo též *Perturb and observe* funguje na principu zvyšování/snižování střídý PWM, kterou je řízen spínaný měnič, o definovaný krok. Následným porovnáním naměřených hodnot výkonu před a po změně střídý můžeme určit, zda se algoritmus posunul na výkonové charakteristice generátoru směrem k a nebo od jeho lokálního maxima. Pokud se výkon zvýšil, tak byl směr změny střídý správný a algoritmus se může opakovat s tím, že upraví střídý do stejného směru. Pokud se však výkon oproti minulému měření snížil, tak je nutno směr posunu střídý otočit. [1]

Takto se algoritmus po dostatečném množství iterací dostane do lokálního maxima výkonu a zde bude oscilovat. Velikost těchto oscilací se odvíjí od velikosti kroku použitým při zvyšování/snižování střídý (velikost oscilací může být také ovlivněna rozlišením měření a strmostí křivky výkonu okolo MPP), což je také jedna z nevýhod tohoto algoritmu. Nastavením nízkého kroku sice lze tyto oscilace omezit, ale tím se zároveň algoritmus zpomalí a je tedy potřeba více iterací, aby opět našel MPP. To může mít za následek neschopnost algoritmu sledovat MPP při jeho rychlých přesunech (např. oblačnost, která občasně zastíňuje PV panely). V práci [2] nastavují velikost kroku dynamicky v závislosti na velikosti předchozího kroku a k němu příslušícímu rozdílu ve výkonu.

Další nevýhodou tohoto algoritmu je situace, kdy generátor má více než jedno lokální maximum (např. použijeme-li parametrově odlišné PV panely). To může vést k tomu, že se algoritmus zastaví na prvním nalezeném maximu a to nemusí být nutně globální, tudíž generátor nebude ideálně zatížen. Tato situace je ilustrována na obr. 2.5, kde je zelenou šipkou naznačen počáteční směr MPPT algoritmu, který se po dosažení lokálního maxima označeného zeleným křížkem zastaví a nepokračuje dále v červeně naznačeném směru, čehož by bylo potřeba pro dosažení maxima (červený křížek).



Obrázek 2.5: Ilustrace průběhu výkonu na generátoru se 2 lokálními maximy

2.3 Akumulátor

Pokud je potřeba uchovávat vyrobenou energii z PV systému lokálně (např. kvůli limitům distribuční soustavy, částečné energetické soběstačnosti nebo v mobilní aplikaci), jsou na výběr 2 nejrozšířenější řešení, a to uložení vyrobené energie do tepelného zásobníku (např. zásobník TUV) nebo do elektrochemického akumulátoru.

Elektrochemické akumulátory mají omezenou životnost a jejich cena je v porovnání s tepelným uložištěm mnohem vyšší, mají však velkou výhodu ve schopnosti vydat uloženou energii opět ve formě energie elektrické. Při nabíjení a následném vybíjení vznikají energetické ztráty, ty mohou být i 40% v případě akumulátorů olověných [3].

Z hlediska ztrát i množství cyklů jsou na tom nejlépe lithiové technologie, bohužel jsou zároveň náročnější na dodržení nabíjecích/vybíjecích parametrů. LiFePO₄ (nebo též LFP) je typ lithiového akumulátoru, který poskytuje dobrou bezpečnost [4] a zároveň dobrý počet cyklů [5].

2.3.1 Nabíjení LFP

Při nabíjení LFP článků je nutné brát ohledy na nabíjecí/vybíjecí proud a také maximální/minimální napětí na článek. Překročení parametrů udávaných výrobcem může vést ke snížení životnosti akumulátoru a nebo k jeho zničení. Životnost článku je také velmi závislá na teplotě, ve které je provozován, jak ukazuje zdroj [5].

V akumulátoru, který je sestavený ze sériové kombinace několika těchto článků, je nutné měřit každý článek zvlášť a v případě nutnosti celý akumulátor odpojit. Zařízení, které se stará o hlídání článků a případné odpojení celého akumulátoru, se nazývá BMS.

Některé BMS také poskytují funkci vyvažování, která spočívá ve vybíjení článku s nejvyšším napětím do odporové zátěže, případně do sousedních článků. To zaručí, že se nabíjení akumulátoru neukončí předčasně kvůli jedinému článku, jehož napětí již překračuje specifikace.

Pro dodržení nabíjecích parametrů musí nabíjecí zařízení (v tomto případě PV měnič) pracovat v režimu CC/CV. To znamená, že nenabitý akumulátor se bude nejdříve nabíjet maximálním nastaveným proudem (nabíjecí zařízení se chová jako proudový zdroj) a při dosažení nastaveného napětí přejde do režimu konstantního napětí (nabíjecí zařízení se chová jako napěťový zdroj). V tu chvíli začne nabíjecí proud klesat.

2.4 Spínané zdroje

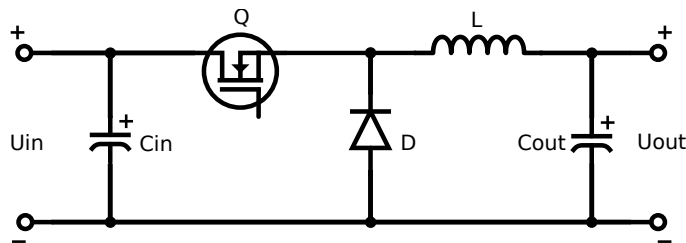
Spínané zdroje jsou skupina napájecích zdrojů, které používají ke své funkci elektronické spínací prvky, nejčastěji MOSFET. Jelikož jsou tranzistory ve spínaných zdrojích používány v ohmické oblasti, mají tyto zdroje podstatně větší účinnost oproti zdrojům lineárním. Jejich další výhodou je možnost

zvyšovat napětí nebo měnit DC na AC, což před jejich příchodem bylo možné pouze pomocí rotačních měničů a nebo jiných mechanických řešení.

Topologií spínaných zdrojů existuje velké množství. V této práci je použita topologie buck (snižující, obr. 2.6).

2.4.1 Snížující měnič

Princip fungování snížujícího měniče spočívá v opakovaném spínání/rozepínání tranzistoru Q. Při každém jeho sepnutí začne téct proud ze vstupního napájení skrz tranzistor Q do induktoru L a výstupní kapacity C_{out} . Tento proud se bude lineárně zvětšovat (akumulace energie do magnetického pole induktoru) do té doby, než se tranzistor Q rozezne. V ten okamžik převezme proud procházející tranzistorem Q dioda D a uložená energie v induktoru se začne přesouvat do zátěže a výstupní kapacity C_{out} . Tento cyklus se neustále opakuje.



Obrázek 2.6: Schéma snížujícího měniče

Změnou střidy signálu, kterým je řízen tranzistor Q, lze měnit výstupní napětí zdroje. To lze vyjádřit následujícím vztahem

$$U_{out} = D \times U_{in}, \quad (2.2)$$

kde U_{out} je výstupní napětí, U_{in} vstupní napětí a D střída, kterou dostaneme jako

$$D = \frac{t_{on}}{T}, \quad (2.3)$$

kde t_{on} je čas, po který je tranzistor během periody sepnutý, a T perioda, se kterou tranzistor spíná.

Synchronní měnič

Pokud je z měniče odebírán vysoký proud, tak začne na diodě D docházet k velké výkonové ztrátě. Tuto výkonovou ztrátu lze spočítat jako

$$P_D = V_f \times I_{out} \times (1 - D), \quad (2.4)$$

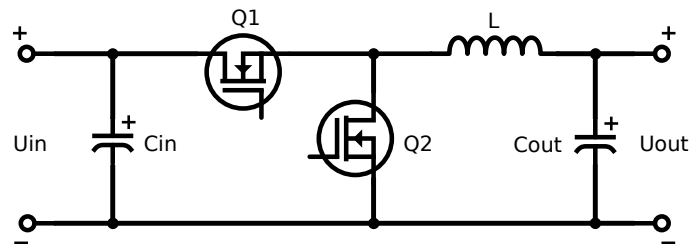
kde P_D je výkonová ztráta diody, V_f prahové napětí diody, I_{out} výstupní proud měniče a D střída vypočtená podle (2.3).

Abyste měnič kvůli této diodě neztrácel na účinnosti, tak lze použít zapojení na obrázku 2.7. V tomto zapojení je dioda nahrazena tranzistorem Q2. Tento

tranzistor v ideálním případě plně přebírá funkci diody s tím, že výkonová ztráta bude

$$P_{Q2} = I_{out}^2 \times R_{DS(on)} \times (1 - D), \quad (2.5)$$

kde P_{Q2} je výkonová ztráta na tranzistoru Q2, I_{out} výstupní proud měniče, $R_{DS(on)}$ odpor tranzistoru v sepnutém stavu a D střída vypočtená podle (2.3). $R_{DS(on)}$ dnešních tranzistorů se pohybuje v řádu jednotek mΩ.



Obrázek 2.7: Schéma synchronního měniče

■ Bootstrap

Pokud ve snižujícím měniči (obr. 2.6) chceme jako tranzistor Q použít N kanálový MOSFET (z důvodu nižšího $R_{DS(on)}$), je nutné vyřešit problém, který vzniká při jeho otevírání. Pro otevření N kanálového MOSFET je totiž nutné přivést napětí mezi kontakty gate a source. Na kontakt source se ale po otevření tranzistoru dostane napájecí napětí. Z toho důvodu je nutné, aby napěťový zdroj otevírající MOSFET byl plovoucí.

V případě bootstrap obvodu je tento plovoucí zdroj tvořen kondenzátorem s dostatečnou kapacitou na to, aby dokázal tranzistor otevřít a udržet otevřený. Tento kondenzátor je nabíjen v okamžik sepnutí tranzistoru Q2 (obr. 2.7) a nebo otevření diody D (obr. 2.6) skrze diodu, která bývá součástí řídicího IC.

Kapitola 3

Návrh řešení

Po prostudování dostupné teorie jsem se rozhodl pro stavbu snižujícího měniče řízeného pomocí mikrokontroléru. Vzhledem k aktuální nedostupnosti některých elektronických součástek, především právě mikrokontrolérů, jsem některé komponenty vybíral na základě dostupnosti a nebo jsem použil domácí zásoby.

Následující tabulka udává požadavky kladené na návrh.

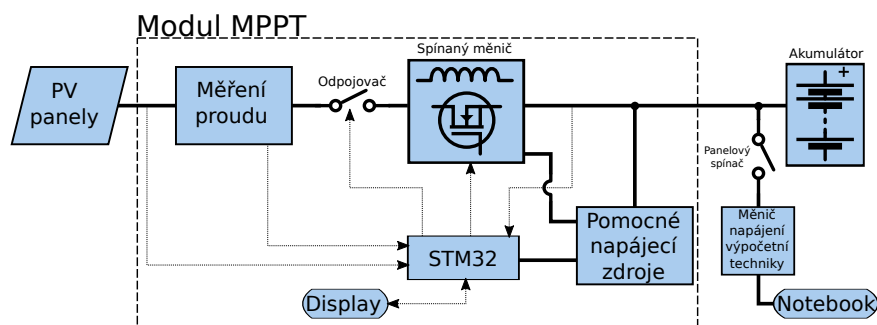
Maximální napětí panelu	110 V
Vstupní výkon	1000 W
Rozsah napětí na akumulátoru	48 V - 55 V
Maximální nabíjecí proud akumulátoru	60 A

Tabulka 3.1: Požadavky na návrh

3.1 Blokové schéma

Na obrázku 3.1 je vidět navržené blokové schéma měniče. Ve schématu jsou výkonové a napájecí cesty značeny silnou plnou čarou, tečkovanou čarou jsou pak naznačeny řídicí signály a také měřená místa.

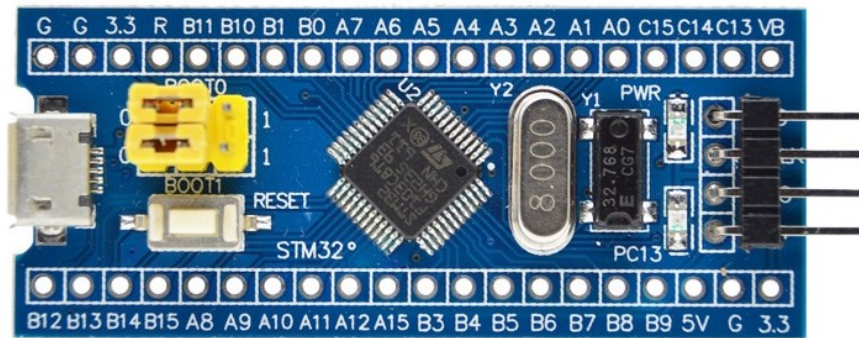
V následujících podkapitolách se bude práce podrobněji věnovat těmto jednotlivým blokům a jejich řešením.



Obrázek 3.1: Blokové schéma měniče

3.2 Mikrokontrolér

Právě kvůli nedostupnosti mikrokontrolérů jsem z domácích zásob zvolil STM32F103C8T6, který je umístěn na vývojové desce s hovorovým názvem *Blue Pill* (obr. 3.2). Od tohoto mikrokontroléru a jeho vlastností se dále odvíjel další postup řešení.



Obrázek 3.2: Vývojová deska STM32-Blue Pill

3.2.1 Vývojová deska

Na této vývojové desce je umístěn kromě mikrokontroléru také lineární regulátor 3,3 V, krystalový rezonátor 8 MHz, 32,768 kHz oscilátor pro přesné měření času, indikační diody, micro-USB port, resetovací tlačítko, 2 přepínače, programovací konektor a další pasivní komponenty.

Napěťový regulátor má vyvedený výstup na kontakty označené 3.3, čehož je využito k napájení displeje.

3.2.2 Periferie mikrokontroléru

Tento mikrokontrolér má zabudováno mnoho periférií a podpůrných obvodů, z nichž pro tuto aplikaci jsou nejdůležitější: 2 x 12bitový ADC s možností sekvenčního měření několika kanálů, 16bitový časovač, I2C a DMA, které může přistupovat k většině periférií. Důležitá je také zabudovaná hardwarová násobička a dělička, ty zdatně zrychlují aritmetické operace procesoru.

3.2.3 Nahrávání programu

Pro nahrání programu a debugování mikrokontroléru byl použit neoficiální klon zařízení ST-Link/V2 (obr. 3.3) v kombinaci s vývojovým prostředím STM32 Cube IDE.



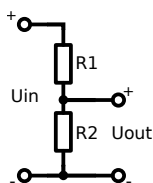
Obrázek 3.3: ST-Link/V2

3.3 Měření

V obvodu je nutné měřit napětí na třech místech: vstupní svorky, výstupní svorky, převodník proud/napětí. K tomuto účelu je mikrokontrolér vybaven 12bitovým ADC převodníkem fungujícím na principu postupné aproximace.

3.3.1 Měření napětí

Aby bylo možné měřit vysoké napětí na panelech a baterii, je toto napětí nejprve nutné zmenšit pomocí napěťového děliče (obr. 3.4). Ten byl spočítán následujícím vzorcem (3.1) pro nezatížený napěťový dělič

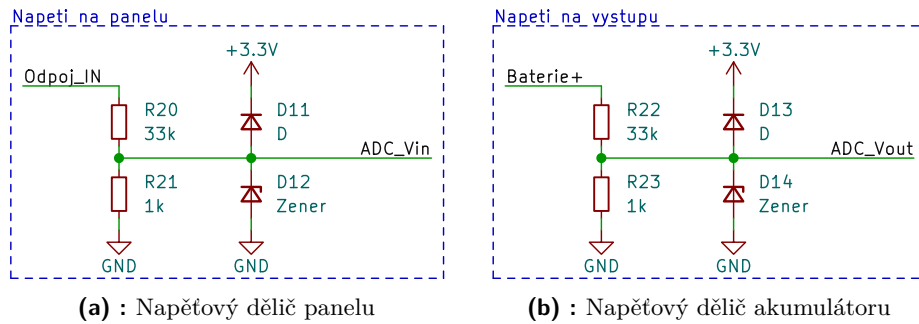


Obrázek 3.4: Napěťový dělič

$$U_{out} = U_{in} \frac{R_2}{R_2 + R_1}, \quad (3.1)$$

kde U_{out} je výstupní napětí děliče, U_{in} napětí vstupní, R_1 a R_2 odpory rezistorů.

Na vývojové desce je napěťová reference ADC připojena na napájecí napětí mikrokontroléru, tudíž na vstup ADC převodníku nesmí přijít vyšší napětí než právě 3,3 V. Nejbližší hodnoty rezistorů z hodnotové řady E24 jsou $R_1 = 33 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$. S těmito rezistory by muselo být na vstupu děliče 112,2 V, aby bylo dosaženo 3,3 V na ADC, což je vzhledem k požadavkům na návrh (tab. 3.1) v pořádku. S těmito hodnotami byl navrhnut i dělič napětí na akumulátoru (obr. 3.5b), přestože napětí akumulátoru těchto hodnot nedosahuje, a to především kvůli usnadnění osazování prototypu.



Obrázek 3.5: Napěťové děliče pro měření napětí

Na schématu (obr. 3.5) jsou vidět i ochranné diody D11 až D14, které mají za úkol v případě přepětí udržet napětí na bezpečné úrovni a předejít tak zničení mikrokontroléru. Tyto diody nejsou ve finálním prototypu osazeny.

3.3.2 Měření proudu

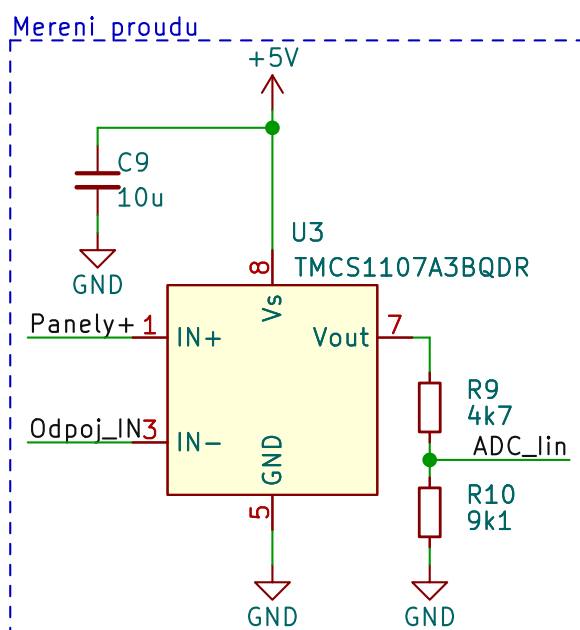
Pro měření proudu jsem zvolil TMCS1107A3U, jelikož tento integrovaný obvod funguje na principu Hallova jevu, čímž poskytuje galvanické oddělení od měřeného místa a je s ním tedy možné měřit kdekoli v obvodu. Tento obvod umí zároveň měřit proud i v opačném směru s tím, že není zapotřebí přivádět symetrické napájení. Měření opačného směru proudu je také důležité pro implementaci ochranných funkcí měniče.

Jako měřené místo jsem zvolil vstup z PV panelů, protože touto částí obvodu bude protékat nižší proud v porovnání s proudem, jenž poteče do akumulátoru (maximálně 10 A při 100 V a 1000 W na PV panelech). Díky tomu bude možné použít IC s větší citlivostí.

Původně jsem zamýšlel použít integrovaný obvod TMCS1107A3U, ale kvůli chybě při vytváření objednávky součástek jsem byl nucen použít obvod TMCS1107A3B. Jedná se o téměř totožnou verzi tohoto obvodu (stejná citlivost), s tím rozdílem, že obvod, jehož označení končí na B, umožňuje měřit v rozsahu $\pm 7,25$ A, a obvod s označením končícím na U má rozsah $-1,4$ A až 13,85 A. Bohužel verze B neobsáhne potřebný měřený rozsah. Naštěstí lze tento rozsah rozšířit tím, že se k IC přivede vyšší napájecí napětí, a to 5 V, pak se totiž měřený rozsah rozšíří na $\pm 11,5$ A.

Aby nebylo nutné stavět další pomocný napájecí obvod, tak bylo využito lineárního regulátoru osazeného na prototypové desce *Blue pill*, který si z 5 V, kterými je napájen TMCS1107A3B, vytvoří potřebné napájecí napětí mikrokontroléru (3,3 V).

Kvůli zvýšenému napájecímu napětí bylo nutné přidat napěťový dělič, aby ADC mikrokontroléru nebylo při vyšších hodnotách proudu poškozeno. Finální zapojení je na následujícím obrázku 3.6.



Obrázek 3.6: Obvod měření proudu

3.3.3 Rozlišení

Mikrokontrolér je osazen 12bitovým analogově digitálním převodníkem a jeho referenční napětí je připojeno k napájecímu napětí 3,3 V. Z těchto údajů lze určit rozlišení převodníku. Následující výpočty jsou vzhledem k nepřesnosti odporů a dalším parazitním vlastnostem obvodu spíše orientační. Jelikož se MPPT algoritmus snaží naleznout maximální hodnotu, tak neklade velké požadavky na rozlišení, ale spíše na linearitu měření.

12bitový převodník rozlišuje $2^{12} = 4096$ různých napěťových hodnot, což při referenčním napětí 3,3 V znamená, že rozlišení převodníku je

$$\frac{3,3 \text{ V}}{2^{12}} \doteq 805,664 \text{ } \mu\text{V}.$$

Napětí na PV panelu

Rozlišení napětí na PV panelu lze určit tak, že rozlišení převodníku dosadíme do vzorce (3.1) na místo U_{out} , poté rovnici vyřešíme pro U_{in} a to bude rovné rozlišení napětí na PV panelu (hodnoty odporů z obr. 3.4)

$$805,664 \text{ } \mu\text{V} \times \frac{1 \text{ k}\Omega + 33 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega} \doteq 27,393 \text{ mV}.$$

Proud

Rozlišení měřeného proudu určíme obdobným způsobem. V prvním kroku vypočteme rozlišení napětí na převodníku proud/napětí (hodnoty odporů

z obr. 3.6, vzorec (3.1))

$$805,664 \mu\text{V} \times \frac{9,1 \text{ k}\Omega + 4,7 \text{ k}\Omega}{9,1 \text{ k}\Omega} \doteq 1,222 \text{ mV}.$$

Tento výsledek poté vydělíme sensitivitou převodníku proud/napětí (pro použitý převodník 200 mV A^{-1})

$$\frac{1,222 \text{ mV}}{200 \text{ mV A}^{-1}} \doteq 6,11 \text{ mA}.$$

3.4 Snižující měnič

Při návrhu hlavního snižujícího měniče jsem postupoval podle [9], tento dokument pojednává o teorii a výpočtech týkajících se synchronních snižujících měničů.

Vzhledem k velkému výstupnímu proudu (zhruba 20 A) byla zvolena topologie synchronního měniče, protože výkonová ztráta v případě diody by mohla při těchto proudech dosahovat desítek W (viz vztah (2.4)).

Frekvence měniče byla nastavena na 50 kHz (viz podkapitola 6.3.3), zbylé parametry návrhu jsou uvedeny v tabulce 3.1.

3.4.1 Volba induktoru

Indukčnost

Hodnota indukčnosti byla spočítána podle následujícího vzorce

$$L = \frac{U_{out} \times (1 - D)}{f \times \Delta I_L}, \quad (3.2)$$

kde L je vypočtená indukčnost, U_{out} výstupní napětí měniče, D střída, f frekvence měniče, ΔI_L rozkmit proudu induktorem.

K výpočtu tohoto vzorce potřebujeme znát střídu a rozkmit proudu induktorem, střídu lze spočítat jako

$$D = \frac{U_{out}}{U_{in}}, \quad (3.3)$$

kde D je zjišťovaná střída, U_{out} výstupní napětí měniče, U_{in} vstupní napětí měniče.

ΔI_L je většinou voleno jako 30 až 40 % výstupního proudu. V mém případě tedy dostanu ΔI_L jako

$$\Delta I_L = \frac{P_{in}}{U_{out}} \times 40\%, \quad (3.4)$$

kde P_{in} je vstupní výkon a U_{out} napětí na výstupu.

Při výpočtech použijeme $U_{in} = 110 \text{ V}$ (napětí na panelu) a $U_{out} = 48 \text{ V}$ (napětí vybitého akumulátoru). Po dosazení do (3.3) dostáváme střídu

$$D = \frac{48}{110} \doteq 0,4364.$$

Dosazením do vzorce (3.4) dostaneme rozkmit

$$\Delta I_L = \frac{1000}{48} \times 0,4 \doteq 8,33 \text{ A.}$$

Vypočtené hodnoty poté dosadíme do vzorce (3.2) a dostaneme indukčnost

$$L = \frac{48 \times (1 - 0,4364)}{50 \times 10^3 \times 8,33} \doteq 64 \text{ }\mu\text{H.}$$

■ Maximální proud

Špičkový proud je nutné spočítat proto, aby nedocházelo při běhu měniče k saturaci induktoru.

Špičkový proud induktorem spočítáme jako

$$I_{pk} = I_{out} + \frac{\Delta I_L}{2}, \quad (3.5)$$

kde I_{out} je výstupní proud měniče a ΔI_L rozkmit proudu induktorem.

ΔI_L je spočten v minulé kapitole (viz (3.4)) a I_{out} spočteme jako

$$I_{out} = \frac{P_{in}}{U_{out}} = \frac{1000}{48} \doteq 20,8 \text{ A.} \quad (3.6)$$

Dosazením do (3.5) poté získáme špičkový proud

$$I_{pk} = 20,8 + \frac{8,33}{2} \doteq 25 \text{ A.}$$

■ Zvolený induktor

Na základě výpočtů byl zvolen toroidní induktor s indukčností 65 μH a maximálním proudem 30 A. Tento induktor je navinutý na prachovém jádře z Fe-Ni slitiny, díky čemuž má podle katalogového listu velice pozvolnou saturaci.

■ 3.4.2 Volba spínacích tranzistorů

Při vybírání MOSFET jsem se zaměřil na 2 důležité parametry, a to maximální napětí mezi kontakty *Drain* a *Source* U_{DSmax} a hodnotu odporu v sepnutém stavu $R_{DS(on)}$. Napětí U_{DSmax} jsem zvolil v rozmezí 150 V a vyšší a $R_{DS(on)}$ jsem se snažil najít co nejmenší.

■ Zvolený tranzistor

Zvolený tranzistor je NTP5D0N15MC, který má následující parametry:

U_{DSmax}	150 V
$R_{DS(on)}$	5 m Ω

Tabulka 3.2: Parametry zvoleného tranzistoru

sériovou kombinací rezistorů. Při vypínání je rezistor R14 (R15) přemostěn diodou a proud tedy omezuje pouze rezistor R16 (R17).

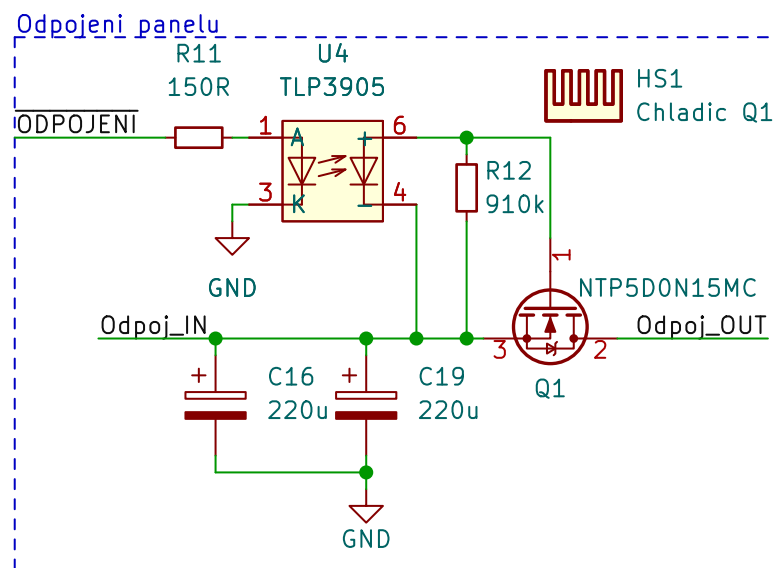
Obvod je také opatřen vybíjecími rezistory R18 a R19, které odvádějí náboj z tranzistorů pokud je IC U5 bez napájení, a ochrannými Zenerovými diodami D9 a D10, které ochrání tranzistory Q2 a Q3 v případě příliš vysokého napětí mezi jejich gate a source.

3.5 Odpojovač

Odpojovač slouží k odpojení PV panelů od zbytků měniče. To je nutné kvůli možnému toku proudu z baterie zpět do PV panelu. Při nedostatečném osvětlení PV panelu dojde k tomu, že napětí, které je na něm generované, bude menší, než napětí akumulátoru. V ten okamžik začne protékat proud z akumulátoru skrz intrinzičnou diodu MOSFET Q2 zpět do PV panelu viz schéma v příloze B.

K zamezení tohoto proudu by stačila dioda, na té by ale i v případě Schottkyho diody docházelo k výkonové ztrátě v řádu jednotek W. Proto jsem použil N kanálový MOSFET NTP5D0N15MC, ten se svým odporem 5 mΩ v sepnutém stavu představuje ztrátu 0,5 W při protékajícím proudu 10 A.

Ke spínání tohoto tranzistoru jsem použil integrovaný obvod TLP3905 (obr. 3.8).



Obrázek 3.8: Obvod tranzistorového odpojovače

Rezistor R11 nastavuje proud do infračervené diody uvnitř TLP3905 na přibližně 10 mA. S pomocí tabulky v katalogovém listu TLP3905 jsem zvolil vybíjecí rezistor R12. Ten nesmí mít moc nízkou hodnotu, jinak by mohl příliš zatížit fotodiody uvnitř TLP3905. Tím by se snížilo napětí přivedené na gate MOSFET a ten by se pak nemusel plně otevřít. S rezistorem 910 kΩ

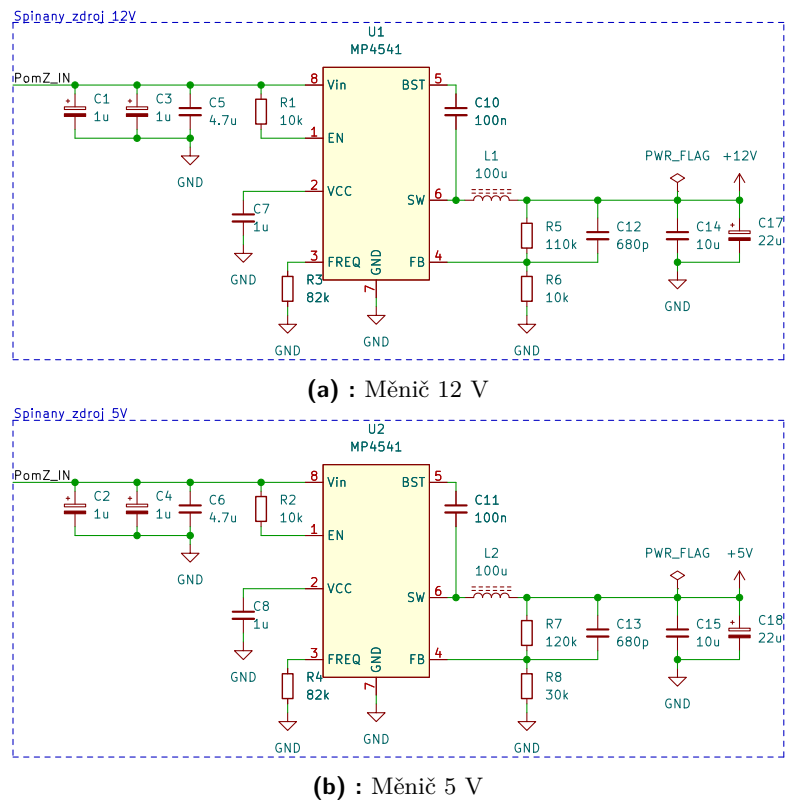
je napětí mezi gate a source přibližně 7.5 V a to je podle katalogového listu dostatečné napětí na úplné otevření tranzistoru.

Tento způsob řízení tranzistoru je sice pomalý, ale nevyžaduje konstrukci dalšího napájecího zdroje.

3.6 Pomocné napájecí zdroje

Pomocné napájecí zdroje slouží k napájení mikrokontroléru, převodníku proud/napětí, modulu displeje a obvodu buzení tranzistorů. K tomuto účelu jsem použil integrovaný obvod MP4541. Jedná se o synchronní snižující měnič s integrovanými tranzistory.

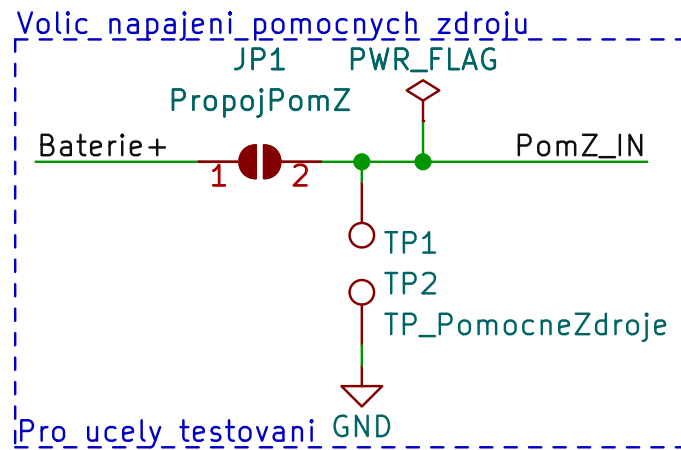
Tento integrovaný obvod jsem zvolil, protože má nastavitelné výstupní napětí, nepotřebuje mnoho externích součástek a má velký rozsah vstupního napětí (až 85 V). Velký napájecí rozsah je důležitý, protože obvod bude napájen napětím akumulátoru.



Obrázek 3.9: Obvod pomocných napájecích zdrojů

Ostatní součástky měniče jsem volil pomocí výpočtů a doporučení uvedených v katalogovém listu.

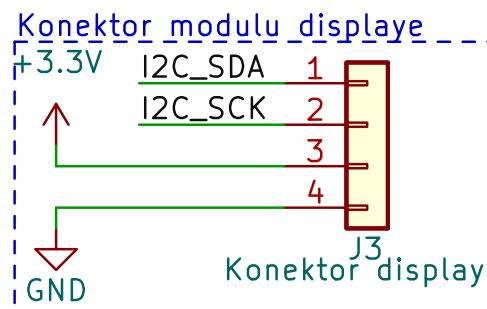
Pro potřeby testování jsem do schématu přidal testovací kontakty (TP1, TP2) a spájitelný propoj (JP1), pomocí kterého lze volit, zda budou měniče (U1, U2) napájeny z akumulátoru nebo testovacích kontaktů viz obr. 3.10.



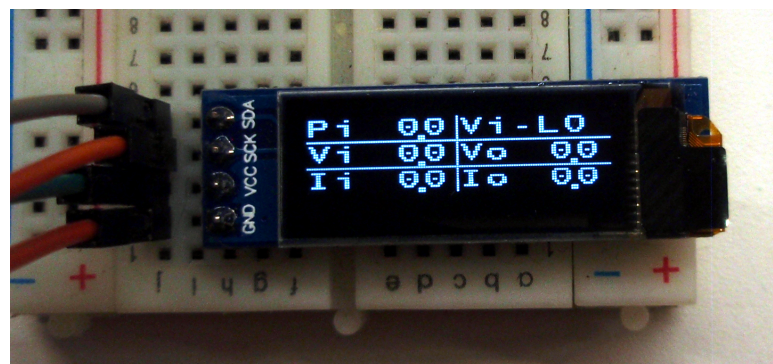
Obrázek 3.10: Obvod voliče napájení pomocných zdrojů

3.7 Displej

Pro zobrazování stavu měniče jsem zvolil modul OLED displeje s řadičem SSD1306. Modul displeje (obr. 3.12) je připojen přes konektor (obr. 3.11) k mikrokontroléru pomocí I2C sběrnice.



Obrázek 3.11: Konektor displeje



Obrázek 3.12: Modul OLED displeje zobrazujícího provozní data

3.8 Měnič napájení výpočetní techniky

Tento měnič slouží k napájení notebooků Thinkpad používajících kulatý tříkontaktní konektor (obr. 3.13). Výhoda tohoto konektoru spočívá v jeho prostředním kontaktu, který slouží notebooku nebo dokovací stanici k identifikaci připojeného adaptéru. Notebook poté z adaptéru neodebírá více výkonu, než je daný adaptér schopný poskytnout. Toho notebook docílí tak, že zpomalí nabíjení svého akumulátoru, nebo v případě výkonnějších modelů nedovolí procesoru odebrat příliš velký výkon.



Obrázek 3.13: Napájecí konektor notebooku Thinkpad

Odebíraný výkon lze nastavit vložením odporu mezi prostřední kontakt konektoru a GND. Výkony jdou takto nastavit v rozmezí od 65 W do 170 W podle následující tabulky (tabulka 3.3).

Výkon	Odpor
65 W	10 k Ω
90 W	nepřipojeno
135 W	0 Ω
170 W	1,5 k Ω

Tabulka 3.3: Volba napájecího výkonu notebooku

Pro moji aplikaci jsem zvolil nejmenší možný výkon (65 W). Na tento výkon bylo tedy nutné navrhnout spínaný snižující měnič, který sníží napětí akumulátoru na 20 V a bude schopný dodávat proud alespoň 3,25 A.

Pro tento účel jsem zvolil integrovaný obvod LM5013, což je snižující měnič s integrovaným tranzistorem a funkcí UVLO, která vypne měnič, pokud jeho napájecí napětí klesne pod nastavenou úroveň. Tato funkce je použita jako ochrana před podvybitím akumulátoru.

■ 3.8.1 Zapojení

Při výběru součástek jsem používal výpočty, které jsou uvedené v katalogovém listu součástky.

Frekvenci měniče jsem pomocí rezistoru R3 nastavil na 200 kHz a k této frekvenci zvolil příslušnou cívku a také vstupní/výstupní kondenzátory. Vstup desky měniče jsem také opatřil tavnou pojistkou 1,6 A pro ochranu před případným zkratem a chybám měniče.

■ UVLO

Funkci UVLO jsem nastavil pomocí rezistorů R1 a R2 tak, aby měnič odpojila při snížení napájecího napětí pod 49 V, což odpovídá napětí 3,06 V na jeden článek zamýšleného akumulátoru.

Kapitola 4

Tvorba schématu a DPS

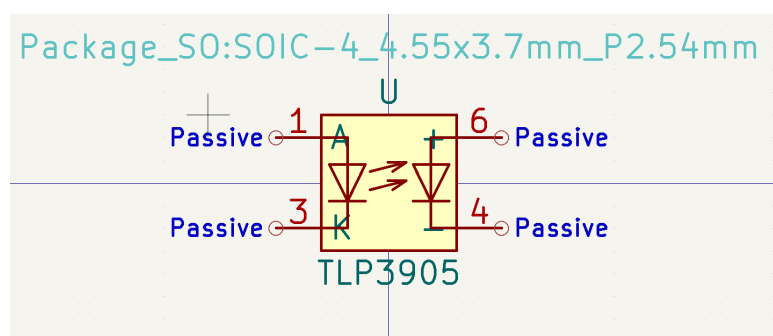
Pro návrh schématu a následně DPS jsem použil program KiCad verze 6.0.9. Jedná se o aktivně vyvíjený opensource projekt, díky čemuž ho lze zkompileovat a spustit na různých platformách a operačních systémech včetně mnou používaného Debian GNU/Linux.

4.1 Tvorba schématických značek a pouzder

Při návrhu jsem narazil na několik součástek, které jsem chtěl v zapojení použít, ale v KiCad pro ně nebyly dostupné jejich schématické značky nebo pouzdra (footprint).

4.1.1 Schématické značky

K tvorbě schématických značek v KiCad slouží nástroj nazývaný *Symbol Editor*. V tom jsem vytvořil novou knihovnu a v ní pak nový prázdný symbol. Do toho jsem poté přidal odpovídající množství vývodů, které kreslená součástka má, a dokreslil její vizuální reprezentaci (viz obr. 4.1).

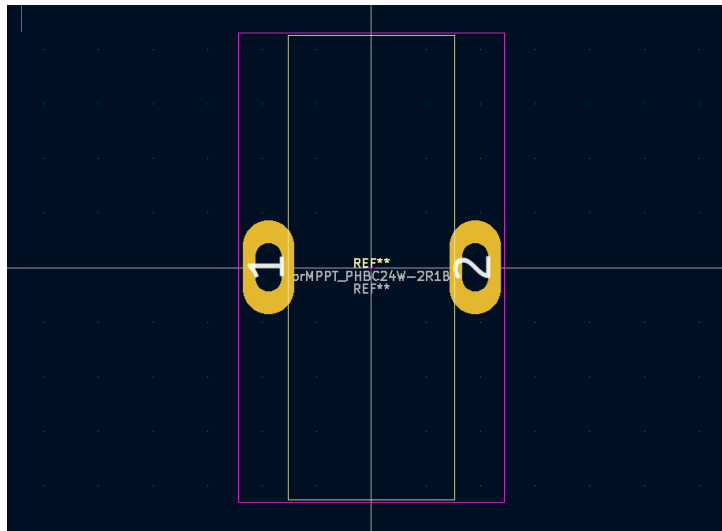


Obrázek 4.1: Tvorba schématické značky pro součástku TLP3905

4.1.2 Pouzdra

Pro tvorbu pouzder je k dispozici obdobný nástroj nazývaný *Footprint Editor*. S jeho pomocí jsem opět vytvořil novou knihovnu a v ní nový *footprint*. Do toho

jsem vložil odpovídající množství vývodů, nastavil jejich rozměry a rozestupy, a následně nakreslil ohraničení součástky a její fyzickou reprezentaci do patřičných vrstev (viz obr. 4.2).



Obrázek 4.2: Tvorba pouzdra pro toroidní cívku

Některá pouzdra byla nakreslena podle dat v katalogovém listu, ale v případě toroidní cívky rozměry neodpovídaly a tak byla cívka odměřena pomocí posuvného měřítka.

4.2 Schéma

Ve schématickém editoru jsem postupoval tak, že jsem postupně vkládal požadované symboly součástek a ty jsem poté pospojoval. Související obvodové části jsem ohraničil pro větší přehlednost a propoje mezi nimi vytvořil pomocí pojmenování větví.

Jednotlivým součástkám jsem přiřadil jejich hodnoty a pouzdra. Pokud to bylo možné, tak jsem volil *footprint* s většími ploškami pro usnadnění osazování. Následně jsem přistoupil k návrhu DPS.

4.3 DPS

Před započítáním návrhu DPS jsem prostudoval dostupnost výrobců plošných spojů a po zvážení cen a hlavně dodacích lhůt jsem zvolil lokálního výrobce.¹ Tento výrobce bohužel neumožňuje výrobu prokovů. Na toto omezení je nutné při návrhu dbát.

¹<https://www.plosnaky.cz>

■ 4.3.1 Prokovy

Oproti standardnímu návrhu je nezbytné nastavit větší velikost prokovů, aby bylo možné do vytvořených otvorů prostrčit měděný drát, který je poté zapájen z obou stran desky. Také je nutné nedávat prokovy pod součástky, protože by potom mohly vkládaným drátům překážet. Dále je důležité myslet na to, že THT součástky sice prokov v podstatě vytvářejí díky své nožičce, ale ne vždy je možné součástku z obou stran připájet (například v případě elektrolytického kondenzátoru).

■ 4.3.2 Návrh

■ MPPT

Po prostudování technologických limitů výrobce jsem zjištěné limity nastavil v programu. Poté jsem rozmístil součástky do jednotlivých bloků, obdobně jako ve schématu. SMD součástky jsem přednostně umisťoval na zadní stranu desky a THT součástky na stranu přední.

Následně jsem součástky v jednotlivých blocích otočil a posunul tak, aby vývody, které mají být spojené, byly pokud možno co nejbíže u sebe. Poté jsem jednotlivé součástky v blocích pospojoval.

Silové vodiče byly vytvořeny pomocí funkce rozlité mědi (*Add filled zone*) a v místech, která to umožňovala, byly vodiče posíleny z druhé strany desky. Zbylé místo na obou stranách desky bylo vyplněno rozlitou mědí připojenou na GND.

Tranzistory Q1, Q2 a Q3 byly umístěny na okraj desky s dostatečnou mezerou od ostatních komponent tak, aby na tranzistory bylo možné přimontovat chladiče.

V místech, kde protéká touto rozlitou mědí velký proud, především kolem vývodů kondenzátorů C16, C19, C24, C25 a konektorů J1, J2, byly umístěny prokovy. To je nutné také z toho důvodu, že zmíněné součástky jsou nakontaktované jenom z jedné strany desky.

Výsledný návrh DPS MPPT modulu není ideální a po nabytých zkušenostech bych jej upravil. Jako jeden z nedostatků vidím velkou smyčku, kterou se skrz GND vrací proud od kondenzátorů C24 a C25 zpět do kondenzátorů C16 a C19. Tuto smyčku by bylo možné zmenšit přesunem induktoru a výstupních kondenzátorů C24 a C25.

■ Pomocné napájecí zdroje

Pomocné napájecí zdroje byly zapojeny podle doporučení v katalogovém listu MP4541. Dbáno bylo především na minimalizaci vzdáleností mezi kondenzátory, spínacím IC a induktorem.

■ Měnič k napájení výpočetní techniky

Tento měnič byl opět zapojen podle jeho předlohy v katalogovém listu. Výkonové trasy byly posíleny a na některých místech byly přepnuty přípoje

Kapitola 5

Osazení, oživení a testování DPS

Tato kapitola se věnuje postupům a nástrojům použitých při osazení a oživení DPS. Dále jsou zde zmíněné postupy, které byly použity k ověření funkčnosti prototypu.

5.1 Osazování

Při výběru součástek jsem se snažil preferovat jejich SMD verze, a to především kvůli pohodlnosti osazování. Při pájení SMD komponent totiž deska leží vodorovně na pracovní podložce a není nutné ji pro nasazení dalších součástek otáčet, jako je tomu při práci s THT komponenty. Odpadá také odstříhávání přebytečné délky nožiček. Bohužel vzhledem k současné situaci na trhu s elektronickými součástkami není možné některé komponenty v jistých pouzdrech koupit.

5.1.1 Použité vybavení

K osazení byla použita mikropáječka s výměnnými hroty, horkovzdušná stanice, pinzety a cín.

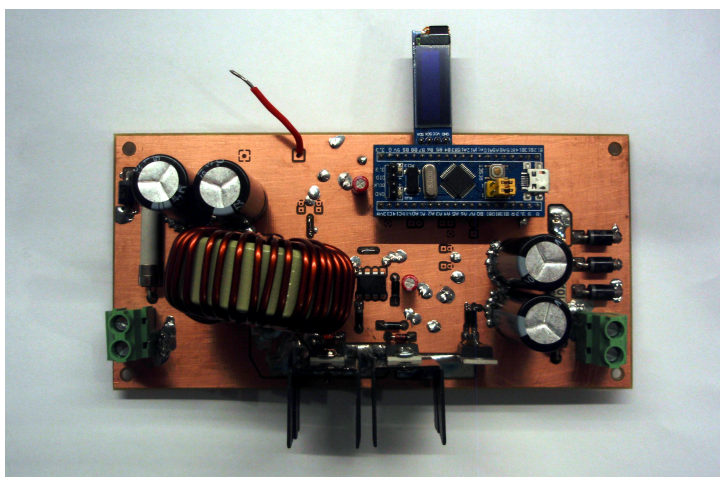
5.1.2 Postup

Při osazování jsem postupoval od SMD součástek s nejmenším profilem postupně k těm větším. To především z toho důvodu, aby již osazené součástky nepřekážely.

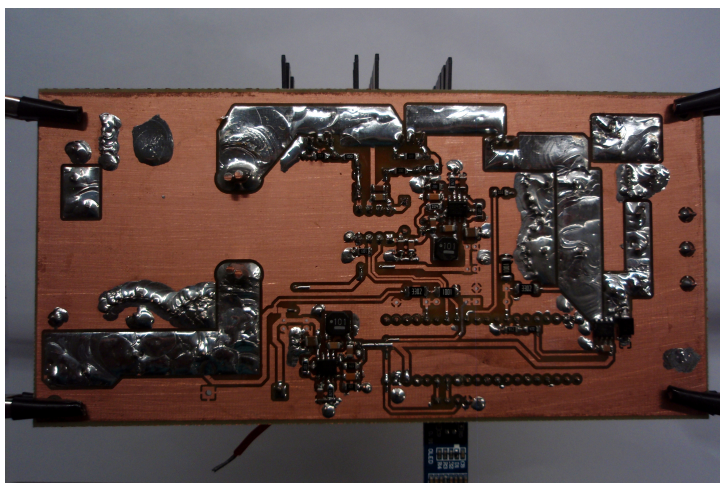
Při osazování induktorů L1 a L2 bylo nutné použít horkovzdušnou stanici, protože kontaktní plošky induktorů jsou rozsáhlé a zasahují přímo pod součástku. Z toho důvodu není možné tyto kontakty zahřát pomocí hrotu mikropáječky.

Poté, co jsem osadil veškeré SMD součástky, jsem přistoupil k osazování THT komponent. Po dokončení a otestování funkčnosti jednotlivých bloků jsem výkonové trasy posílil vrstvou cínu pro zlepšení jejich vodivosti.

Poté jsem osazenou desku umyl pomocí ultrazvukové čističky a opatřil ochranným lakem. Na následujících obrázcích je vidět již hotová deska (obr. 5.1 a 5.2).



Obrázek 5.1: Osazená DPS - přední strana



Obrázek 5.2: Osazená DPS - zadní strana

■ 5.2 Testování

■ 5.2.1 Pomocné zdroje

Při osazování jsem přednostně osadil tyto zdroje, a to z toho důvodu, abych mohl otestovat jejich funkčnost ještě před vložením komponent, které jsou z těchto zdrojů napájeny. Jejich špatnou funkcí by totiž mohlo dojít k trvalému poškození některých součástí.

Pomocné zdroje byly při zkoušce napájeny z laboratorního zdroje, na kterém bylo měněno napětí. Jejich výstupní napětí při tom bylo kontrolováno multimetrem.

■ 5.2.2 Hlavní měnič

Tento měnič jsem otestoval přivedením 50 kHz PWM signálu ze signálového generátoru na kontakt IN součástky U5 a přivedením vysoké logické úrovně na kontakt \overline{SD} téže součástky. Při takto přivedených signálech začne IR2104 řídit tranzistory. To jsem ověřil prozkoumáním kontaktů gate tranzistorů Q2 a Q3 pomocí osciloskopu.

Poté jsem přistoupil k přivedení napájení z laboratorního zdroje na vstupní kontakty měniče (kontakty PV panelu) a poté i k postupnému zatěžování umělou zátěží posílenou automobilovými žárovkami.

■ 5.2.3 Hotový měnič s MPPT algoritmem

Hotový měnič s nahraným firmware byl otestován obdobným způsobem. Místo PV panelů byl při testování použit laboratorní zdroj nastavený v režimu CC/CV. Jeho voltampérová charakteristika je sice mírně odlišná od PV panelu, ale pro zkontrolování funkčnosti algoritmu postačuje. Jako zátěž jsem použil sériovou kombinaci automobilových žárovek.

Dále jsem ověřil funkčnost ochranných prvků programu nastavením nízkých limitů ochrany a jejich následným překročením při testu měniče.

Kapitola 6

Firmware

Pro zvolený mikrokontrolér lze vytvářet kód mnoha způsoby. Pro mne, vzhledem k mým předchozím zkušenostem s programováním, byl nejvhodnější jazyk C s použitím knihovny HAL. Tato knihovna umožňuje používat periferie a ostatní funkce mikrokontroléru pohodlně bez nutnosti detailních znalostí jeho vnitřního fungování.

6.1 Použité softwarové vybavení

K napsání programu bylo použito vývojového prostředí STM32CubeIDE, které umožňuje editaci, kompilaci a debugování vytvořeného kódu. K dalším jeho významným funkcím patří automatické generování inicializačního kódu pro periferie.

6.2 Stavový automat

Z důvodu přehlednosti a udržitelnosti kódu jsem implementoval kód v podobě stavového automatu. A to tak, že aktuální stav automatu je uložen v proměnné `MPPT_state`, která je výčtového typu a její identifikátory představují jednotlivé stavy. V hlavní smyčce programu se poté spustí ta část, která odpovídá aktuálnímu stavu.

6.3 Konfigurace periférií

Tato část se věnuje konfiguraci použitých periférií mikrokontroléru. K realizování této konfigurace byl použit konfigurační nástroj, který je součástí STM32CubeIDE.

6.3.1 Hodiny

Hodiny byly nakonfigurovány tak, aby MCU používalo externí 8 MHz křystalový rezonátor. Tento kmitočet je poté upraven vnitřní elektronikou na 72 MHz, což je frekvence, která je poté používána jako takt procesoru. Na

stejný kmitočet je též nakonfigurován čítač APB2, ten je používán pro generování PWM. Periferie ADC je nastavena na maximální možnou frekvenci 12 MHz.

■ 6.3.2 ADC

Mikrokontrolér obsahuje 2 ADC, které lze dle dokumentace nastavit tak, aby pracovaly simultánně. Tuto funkci se mi bohužel nikdy nepovedlo zprovoznit tak, aby fungovala spolehlivě a nerušila kalibraci ADC. Následující nastavení proto nevyužívá plného potenciálu ADC periferie.

Právě z těchto důvodů jsem použil pouze jedno ADC v režimu skenování. Tento režim funguje tak, že postupně proměřuje všechny označené vstupy a naměřené hodnoty pak s pomocí DMA ukládá do paměti. Díky DMA je tento proces plně automatizovaný.

■ 6.3.3 Časovač

Časovač TIM2 je nakonfigurován na generování 50 kHz PWM, kterým se ovládají tranzistory měniče. Tato frekvence byla zvolena, protože je dostatečná pro měnič a zároveň umožňuje 1439 různých hodnot střídý.

■ 6.3.4 I2C

I2C periferie je pouze spuštěna v základním nastavení, podrobnější konfiguraci provádí knihovna displeje.

■ 6.4 Popis programových funkcí

V této části se budu věnovat popisu důležitých funkcí, které jsou v programu implementovány.

■ 6.4.1 Získávání měřených hodnot

K získávání měřených hodnot slouží funkce `meas_get`, která spustí ADC převod, počká na naměřené hodnoty, spočte jejich aritmetický průměr a určí dodávaný výkon.

■ 6.4.2 Kontrola chybových stavů

Kontrolu chybových stavů provádí funkce `error_check`. Ta při zavolání zkontroluje, jestli naměřené hodnoty nepřekročily nastavené meze a pokud ano, tak změní stav měniče na stav chybový a vypne tranzistorový budič (IC U5), případně odpojí tranzistorem Q1 měnič od PV panelů.

■ 6.4.3 Počáteční hodnota PWM

Počáteční hodnotu střídý PWM vrací funkce `D_startup_get`. Hodnota střídý je vypočítána tak, aby při prvním běhu nedošlo v měničích k obrácenému toku proudu z akumulátoru do PV panelu.

■ 6.4.4 MPPT

Pro mé řešení jsem vybral metodu *Hill-climbing* popisovanou v 2.2.1, a to především z důvodu její snadné implementace.

O vyhodnocování MPPT algoritmu se stará funkce `MPPT_get`. Ta z hlavní programové smyčky převezme aktuální a minulé naměřené hodnoty a v případě poklesu výkonu otočí směr posunu střídý.

Tato funkce také ovlivňuje střídý, pokud se měnič blíží nastaveným limitům (např. vysoké napětí akumulátoru).

Funkce MPPT se spouští pouze jednou za tři měření, a to z toho důvodu, aby se měnič a měřené hodnoty měly možnost ustálit.

■ 6.4.5 Displej

Pro komunikaci s displejem byla použita knihovna [10].

Zobrazování provozních dat na displeji obstarává funkce `display_refresh`. Ta musí nejdříve přepočítat hodnoty získané pomocí ADC na hodnoty proudu, napětí a výkonu (funkce `display_I_to_disp`, `display_V_to_disp` a `display_P_to_disp`), těmi poté vyplní displej. V případě, že jsou tyto hodnoty příliš dlouhé na to, aby šly v omezeném místě na displeji zobrazit, je zobrazena pouze jejich část před desetinnou čárkou.

V pravém horním rohu displeje se také zobrazuje aktuální stav měniče, viz obr. 3.12.

Kapitola 7

Ověřovací měření

Následujícím měřením byla ověřena funkčnost měniče a MPPT algoritmu.

7.1 Použité vybavení

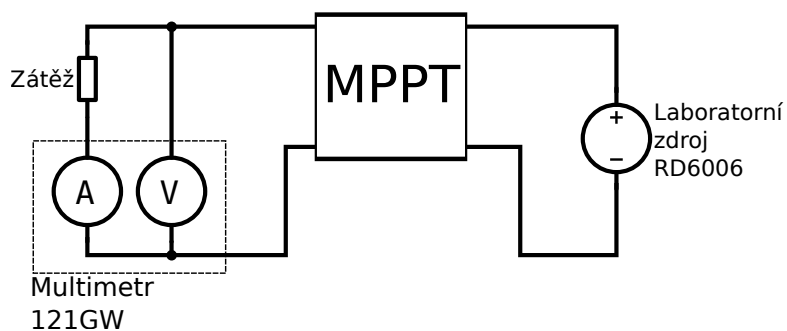
Při měření bylo použito následující vybavení.

Laboratorní zdroj	Riden RD6006
Pomocný napájecí zdroj	MEAN WELL RS-75-24
Multimetr	121GW
Zátěž	2× Automobilová žárovka 12 V, 60 W

Tabulka 7.1: Použité vybavení

7.2 Zapojení

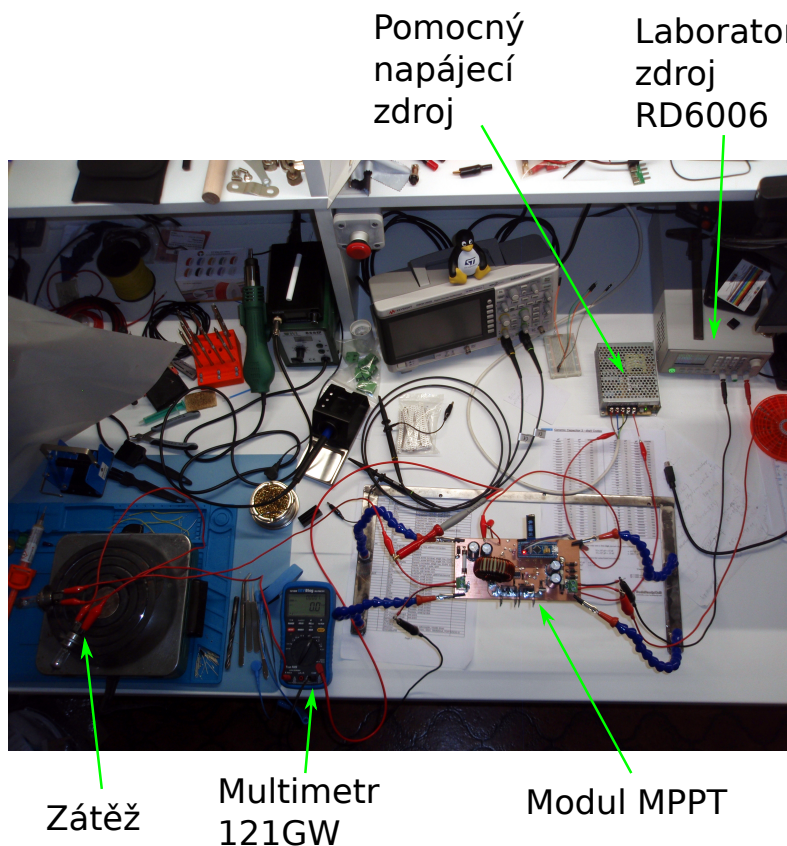
Použité přístroje a modul měniče jsem zapojil podle následujícího schématu (obr. 7.1).



Obrázek 7.1: Schéma měření

V tomto schématu (obr. 7.1) je laboratorní zdroj připojen na vstupní svorky MPPT (svorky PV panelu). Zátěž je poté skrze multimetr připojena na výstupní svorky (svorky akumulátoru). V schématu není vyobrazen pomocný zdroj, který napájí MPPT modul. Tento zdroj je nutný z toho důvodu, že na

výstupu MPPT není připojen akumulátor, tudíž by se pomocné zdroje na desce MPPT neměly jak napájet.



Obrázek 7.2: Uspořádání měřícího stanoviště

7.2.1 121GW

Na schématu je multimetr 121GW reprezentován jako kombinace voltmetru a ampérmetru. To je z toho důvodu, že multimetr má zabudovanou funkci měření voltampér, ve stejnosměrném obvodu lze tedy multimetr použít jako wattmetr. V tomto režimu kromě výkonu zobrazuje multimetr na displeji střídavě také naměřený proud a napětí.

7.2.2 Zátěž

Jako zátěž byly použity 2 sériově zapojené automobilové žárovky, každá o nominálním výkonu 60 W.

7.2.3 Laboratorní zdroj

Tento laboratorní zdroj zobrazuje kromě nastavených hodnot také hodnoty naměřené, tyto hodnoty byly použity pro změření vstupního proudu (I_{in}) a napětí (U_{in}).

7.3 Postup měření

V jednotlivých měřeních byla na zdroji RD6006 nastavena různá hodnota proudu (I_{set}) a napětí (U_{set}). Po ustálení MPPT algoritmu byla zaznamenána hodnota vstupního napětí (U_{in}) a proudu (I_{in}) MPPT modulu a hodnota výstupního výkonu (P_{out}) a napětí (U_{out}).

7.4 Naměřené hodnoty

č. m.	I_{set} (A)	U_{set} (V)	I_{in} (A)	U_{in} (V)	P_{out} (W)	U_{out} (V)
1	1	30	1,00	29,83	28,66	9,18
2	1	40	1,00	39,78	38,09	11,05
3	1	50	0,99	49,54	47,61	12,83
4	1	58	0,98	57,87	55,43	14,11
5	2	30	2,00	29,91	58,05	14,55
6	2	40	1,99	39,90	77,40	17,57
7	2	50	1,99	49,86	96,58	20,30
8	2	58	1,99	57,88	112,04	22,36
9	3	30	2,99	29,95	87,51	19,06
10	3	40	3,00	39,83	116,53	22,95
11	3	50	2,46	50,00	120,01	23,30
12	3	58	2,13	57,93	119,84	23,34
13	4	30	3,99	30,00	116,94	22,99
14	4	40	3,08	40,00	119,61	23,31

Tabulka 7.2: Naměřené hodnoty

Z naměřených hodnot lze usoudit, že MPPT algoritmus nachází maximální výkon, na který je laboratorní zdroj nastaven.

Výjimku tvoří měření číslo 11, 12 a 14, kde došlo k omezení výstupního napětí měničem na nastavených 24 V, a tím i k omezení odebíraného výkonu. Naměřená hodnota se od nastavené liší o 0,7 V kvůli nastavené hysterezi. Tato funkce je popisována v podkapitole 6.4.4.

Průměrná účinnost měniče v průběhu měření byla zhruba 97 %.



Kapitola 8

Závěr

V práci jsem shrnul teorii potřebnou pro návrh MPPT měniče a měniče pro napájení notebooku. Dále jsem vyhotovil prototyp MPPT měniče, naprogramoval potřebný firmware a celek otestoval.

Testováním a měřením měniče se ukázalo, že měnič funguje, a to s účinností 97 %. Zvolený MPPT algoritmus se také osvědčil a dle měření je schopný nalézt maximum výkonu.

Jako náhrada za PV panel a akumulátor byly při testování použity laboratorní zdroj a odporová zátěž. Veškeré funkce potřebné k provozu MPPT měniče s PV panely a akumulátorem jsou implementované a v rámci možností otestované. Nicméně k tomu, aby zařízení bylo schopné spolehlivého provozu v instalaci s akumulátorem a PV panely, by bylo nutné provést další testy, které by odhalily skryté chyby.

Po důkladnějším ověření funkčnosti by mohl být měnič rozšířen o funkci čítání vyrobených kWh, galvanicky izolovanou datovou sběrnicí pro vyčítání dat a MPPT algoritmus vylepšen na verzi popisovanou ve zdroji [2].



Literatura

- [1] ESRAM, Trishan a Patrick L. CHAPMAN. Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques. *IEEE Transactions on Energy Conversion* [online]. 2007, **22**(2), 439-449 [cit. 2022-12-17]. ISSN 0885-8969. Dostupné z: doi:10.1109/TEC.2006.874230
- [2] WEIDONG XIAO a W.G. DUNFORD. A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems. *2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551)* [online]. IEEE, 2004, 1957-1963 [cit. 2022-12-19]. ISBN 0-7803-8399-0. Dostupné z: doi:10.1109/PESC.2004.1355417
- [3] HUA, A. Chih-Chiang a B. Zong-Wei SYUE. Charge and discharge characteristics of lead-acid battery and LiFePO₄ battery. In: *The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA* - [online]. IEEE, 2010, 2010, s. 1478-1483 [cit. 2022-12-19]. ISBN 978-1-4244-5394-8. Dostupné z: doi:10.1109/IPEC.2010.5544506
- [4] SCROSATI, Bruno a Jürgen GARCHE. Lithium batteries: Status, prospects and future. *Journal of Power Sources* [online]. 2010, **195**(9), 2419-2430 [cit. 2022-12-19]. ISSN 03787753. Dostupné z: doi:10.1016/j.jpowsour.2009.11.048
- [5] WANG, John, Ping LIU, Jocelyn HICKS-GARNER, et al. Cycle-life model for graphite-LiFePO₄ cells. *Journal of Power Sources* [online]. 2011, **196**(8), 3942-3948 [cit. 2022-12-19]. ISSN 03787753. Dostupné z: doi:10.1016/j.jpowsour.2010.11.134
- [6] RAPPAPORT, Paul. The photovoltaic effect and its utilization. *Solar Energy* [online]. 1959, **3**(4), 8-18 [cit. 2022-12-21]. ISSN 0038092X. Dostupné z: doi:10.1016/0038-092X(59)90002-7
- [7] CHIN, Vun Jack, Zainal SALAM a Kashif ISHAQUE. Cell modelling and model parameters estimation techniques for photovoltaic simulator application: A review. *Applied Energy* [online]. 2015, **154**, 500-519 [cit. 2022-12-21]. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2015.05.035

- [8] TAYLOR, Robert a Ryan MANACK. Controlling switch-node ringing in synchronous buck converters. In: *Analog Applications* [online]. Texas Instruments Incorporated, 2012 [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: <https://www.ti.com/technical-documents/literature?baseLitId=slyt464#page=5>
- [9] EJURY, Jens. Buck converter design. In: *Com Desion Note* [online]. Infineon Technologies North America (TFNA), 2013 [cit. 2023-01-02]. Dostupné z: <http://www4.hcmut.edu.vn/~ndtuyen/Download/BuckConverterDesignNote.pdf>
- [10] LUTSAI, Alexander. Knihovna displeje SSD1306. In: *Github.com* [online]. 2017 [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: <https://github.com/SL-RU/stm32libs/tree/master/HAL/ssd1306>



Příloha A

Seznam použitých zkratk

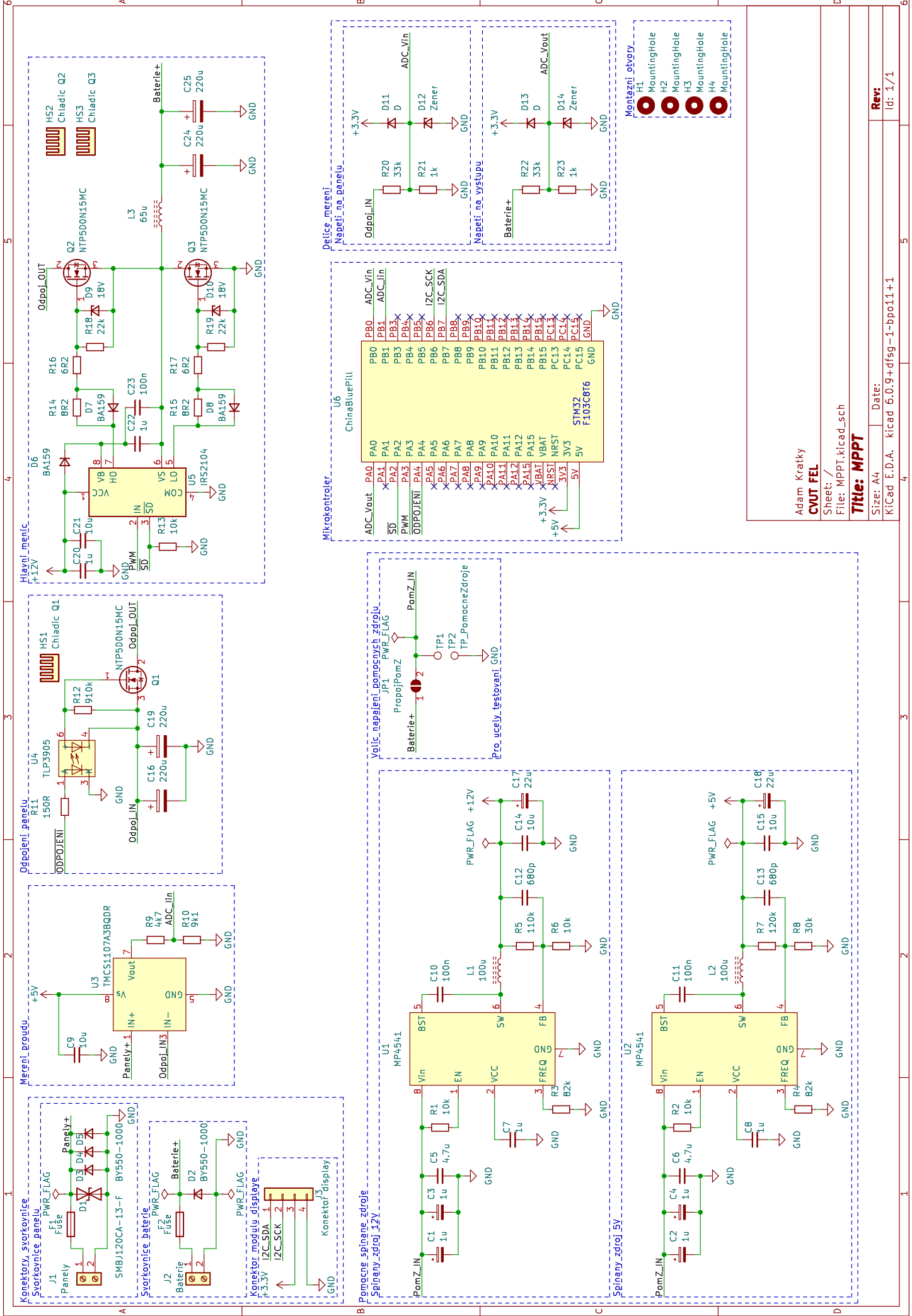
AC	Alternating Current
ADC	Analog to Digital Converter
BMS	Battery Management System
CC	Constant Current
CV	Constant Voltage
DC	Direct Current
DMA	Direct Memory Access
DPS	Deska Plošného Spoje
GND	Ground
HAL	Hardware Abstraction Library
I2C	I2C sběrnice
IC	Integrated Circuit
LFP	Lithium Ferro-Phosphate
MCU	MicroController Unit
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
MPP	Maximum Power Point
MPPT	Maximum Power Point Tracking
OLED	Organic Light Emitting Diode
PV	PhotoVoltaic
PWM	Pulse Width Modulation
SMD	Surface Mount Device
THT	Through Hole Technology
TUV	Teplá Užitková Voda
UVLO	Under Voltage Lock Out



Příloha B

Schémata a DPS

DPS, které jsou v této příloze, nejsou zobrazené ve správné velikosti pro výrobu.



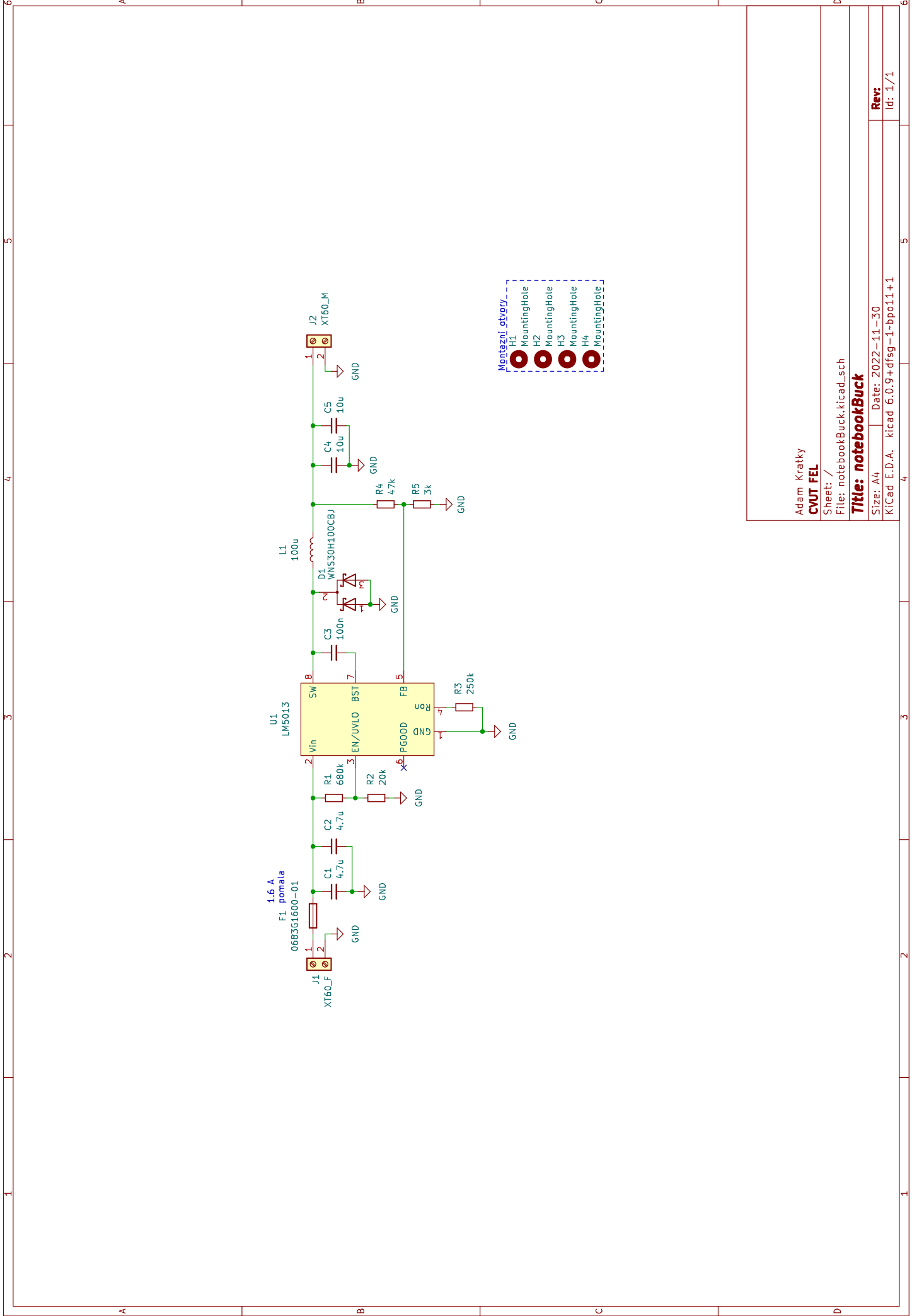
Adam Krátky
CVUT FEL

Sheet: /
 File: MPPT.kicad_sch

Title: MPPT

Size: A4 Date:
 KiCad E.D.A. kicad 6.0.9+dfsg-1-bpo11+1

Rev:
 Id: 1/1



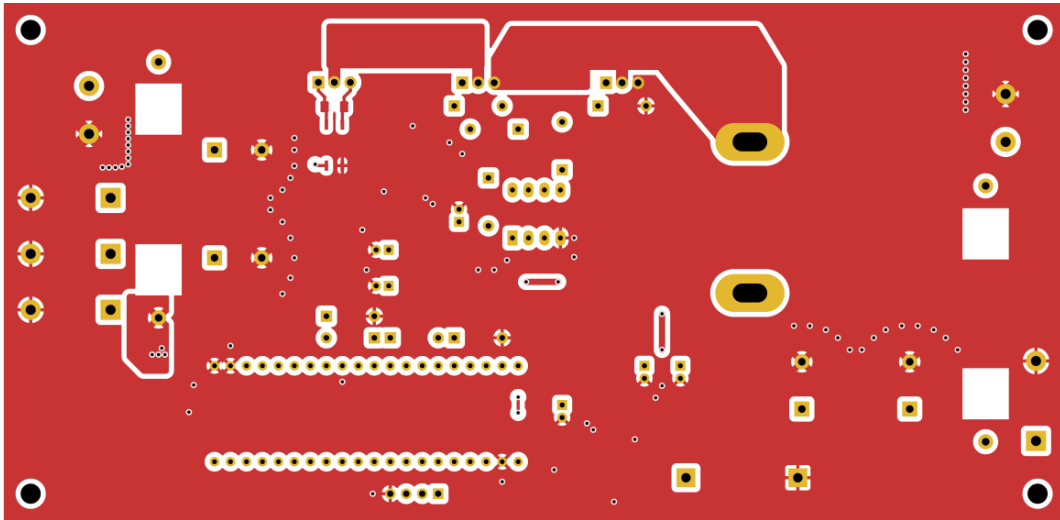
Adam Kratky
CVUT FEL

Sheet: /
 File: notebookBuck.kicad_sch

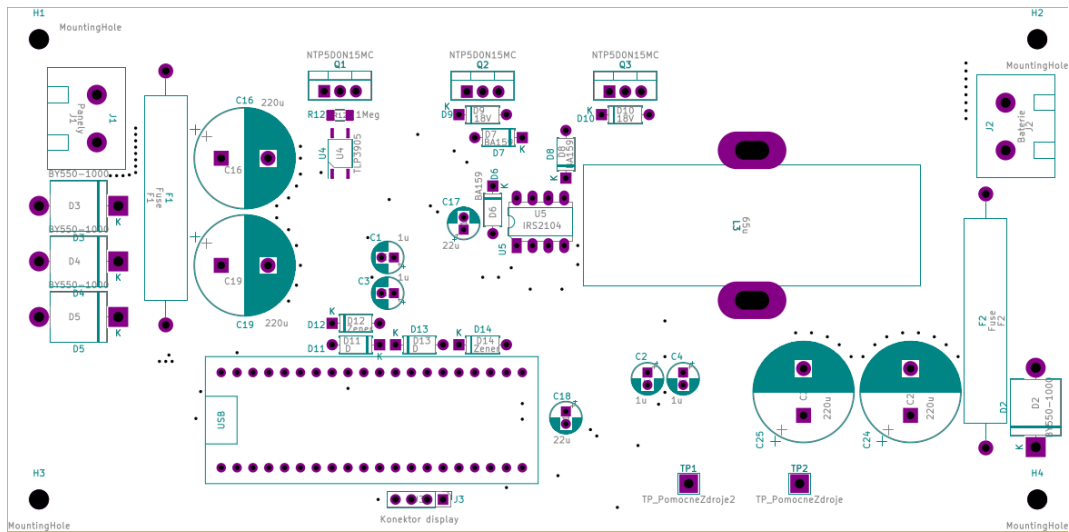
Title: notebookBuck

Size: A4 Date: 2022-11-30
 KiCad E.D.A. kicad 6.0.9+dfsg-1-bpo11+1

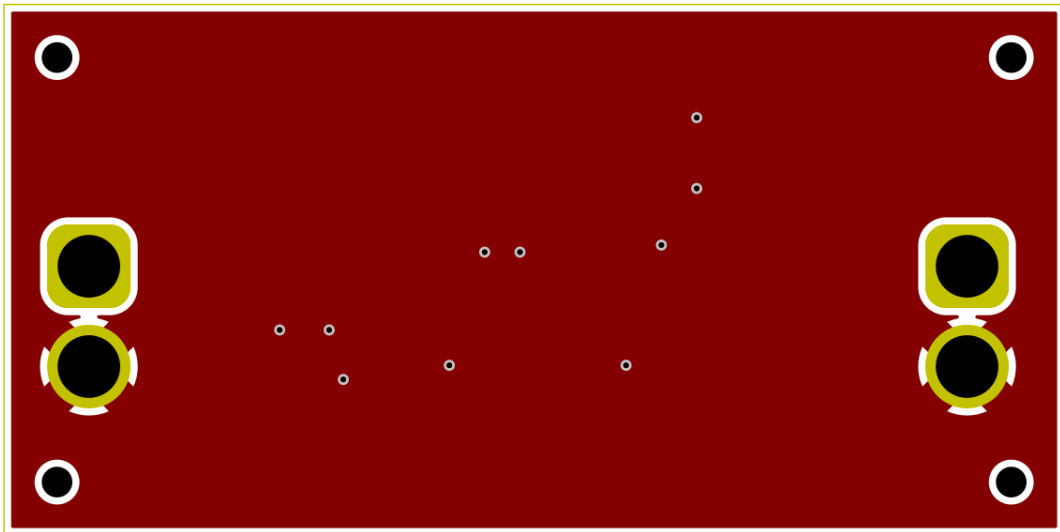
Rev:
 Id: 1/1



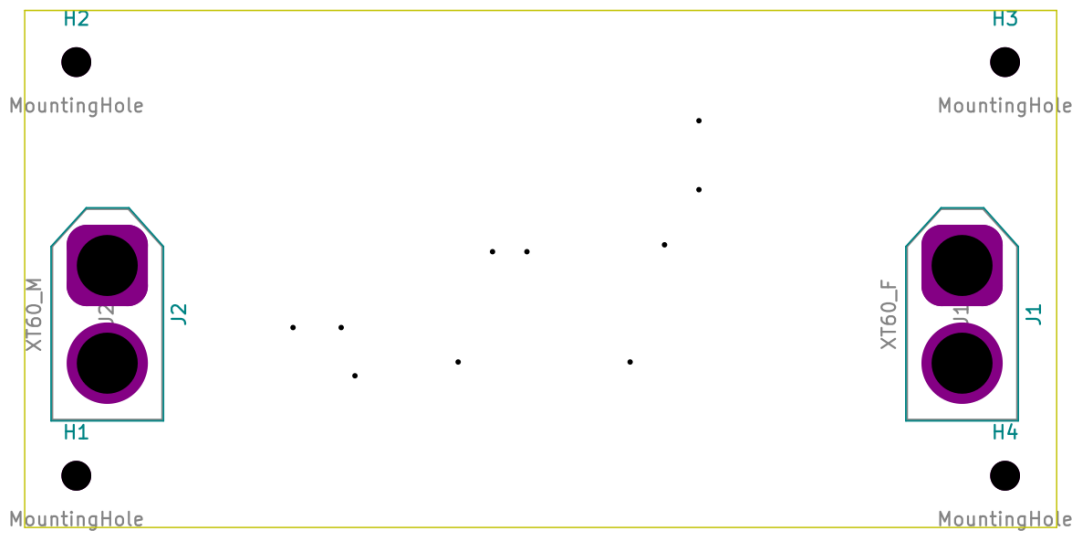
Obrázek B.1: MPPT - přední strana DPS - vrstva mědi



Obrázek B.2: MPPT - přední strana DPS - osazovací schéma



Obrázek B.5: Napájecí zdroj výpočetní techniky - přední strana DPS - vrstva mědi



Obrázek B.6: Napájecí zdroj výpočetní techniky - přední strana DPS - osazovací schéma

Příloha C

Obsah elektronické přílohy

kiCad.....	Adresář KiCad projektů
├── MPPT	Adresář MPPT modulu
│ ├── libs	
│ │ ├── chinabluepill.pretty	
│ │ │ └── ChinaBluePill.kicad_mod	
│ │ ├── china_bluepill.dcm	
│ │ ├── china_bluepill.kicad_sym	
│ │ └── china_bluepill.lib	
│ ├── MPPT.kicad_pcb	
│ ├── MPPT.kicad_prl	
│ ├── MPPT.kicad_pro	
│ ├── MPPT.kicad_sch	
│ ├── schema.pdf	
│ └── sym-lib-table	
├── notebookBuck	Adresář zdroje pro napájení notebooku
│ ├── notebookBuck.kicad_pcb	
│ ├── notebookBuck.kicad_prl	
│ ├── notebookBuck.kicad_pro	
│ └── notebookBuck.kicad_sch	
├── stm32CubeIDE	Adresář STM32CubeIDE projektů
│ └── MPPT	Adresář MPPT modulu
│ ├── Core	
│ │ ├── Inc	
│ │ │ ├── fonts.h	
│ │ │ ├── main.h	
│ │ │ ├── ssd1306.h	
│ │ │ ├── stm32f1xx_hal_conf.h	
│ │ │ └── stm32f1xx_it.h	
│ │ └── Src	Adresář se zdrojovým kódem
│ │ ├── fonts.c	
│ │ ├── main.c	
│ │ ├── ssd1306.c	
│ │ └── stm32f1xx_hal_msp.c	

