

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra mikroelektroniky

Měnič pro dobíjení akumulátorů ručního nářadí ze solárního panelu

Jiří Friš

Školitel: Ing. Jan Novák, Ph.D.
Obor: Elektronika a komunikace
Květen 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Friš** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **507330**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Měnič pro dobíjení akumulátorů ručního nářadí ze solárního panelu

Název bakalářské práce anglicky:

Solar Based Hand Tools Battery Charger

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 500 W pro nabíjení akumulátoru.
- 3) Zvolte vhodnou konfiguraci měničů pro napájení originálních nabíječek ručního akumulátorového nářadí.
- 4) Navrhněte zapojení MPPT měniče s funkcí nabíjení akumulátoru a měniče pro napájení nabíječek nářadí. 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: **01.02.2024** Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **21.09.2025**

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

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Janu Novákovi Ph.D., za poskytnutí potřebných konzultací a za umožnění přístupu do školní laboratoře. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Jaroslavu Vítкови za poskytnuté technické zázemí a předání cenných zkušeností ohledně návrhu a testování elektrických zařízení.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Praha 19.5.2024

Jiří Friš

Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem solárního systému pro dobíjení akumulátorů ručního nářadí pomocí originálních 12 V nabíječek. V práci je popsáno několik metod používaných k dohledání maximálního výkonového bodu MPP fotovoltaického panelu a výsledná realizace MPPT snižujícího měniče. Výstupem práce je realizovaný funkční vzorek, který ke své činnosti využívá hybridní algoritmus MPPT společně s algoritmem dobíjení akumulátorů ve třech fázích dobíjení.

Klíčová slova: PN přechod, fotovoltaický jev, fotovoltaický panel, fotovoltaický systém, MPPT, algoritmus hledání nejvyššího výkonu, globální výkonové maximum, lokální výkonové maximum, online metoda MPPT, offline metoda MPPT, metoda posuvu a pozorování, hybridní metoda MPPT, snižující měnič, highside uspořádání, akumulátor, nabíjecí cyklus, mikrokontrolér, PWM, pulzně šířková modulace, PWM řídicí signál

Školitel: Ing. Jan Novák, Ph.D.

Abstract

This thesis focuses on the design of a solar system for charging handheld tool batteries using original 12 V chargers. It describes several methods used to track the Maximum Power Point (MPP) and the resulting implementation of a MPPT (Maximum Power Point Tracking) buck converter. The outcome of the thesis was a functional prototype that utilized a hybrid MPPT algorithm along with an three state battery charging algorithm.

Keywords: PN junction, photovoltaic effect, photovoltaic panel, photovoltaic system, Maximum Power Point Tracking, maximum power point tracking algorithm, global maximum power point, local maximum power point, online MPPT method, offline MPPT method, perturb and observe method, hybrid MPPT method, buck converter, high-side arrangement, battery, charging cycle, microcontroller, PWM, pulse-width modulation, PWM control signal

Title translation: Solar Based Hand Tools Battery Charger

Obsah

1 Fotovoltaické systémy	1	7 Závěr	51
1.1 Obecný popis	1	Literatura	53
1.2 Popis fotovoltaického článku	2	Přílohy	55
1.3 Využití solárních panelů	4	A Seznam zkratk	57
1.3.1 PWM měniče	4	B Symboly	59
1.3.2 MPPT měniče	4	C Blokové schéma	61
1.3.3 PWM vs MPPT	5	D Schéma zapojení snižujícího měniče	63
1.4 Metody MPPT	5	E Seznam použitých součástek	65
1.4.1 Online metody	6	F Deska plošných spojů	67
1.4.2 Offline metody	10	G Použitý kód	71
1.4.3 Hybridní metody	11	H Osazená deska plošných spojů	81
2 Spínané zdroje	13	I Použité měřicí přístroje	83
2.1 DC/DC měniče	13	J Výkres krabičky pro MPPT měnič	85
2.1.1 Nábojová pumpa	13		
2.1.2 Snižující měnič	14		
2.1.3 Zvyšující měnič	15		
2.1.4 SEPIC	17		
3 Akumulátory	19		
3.0.1 Nabíjecí cykly akumulátorů	20		
4 Praktická část	21		
4.1 Počáteční rozvaha	21		
4.2 Solární panel	22		
4.3 Výběr akumulátorů	22		
4.4 Návrh snižujícího měniče	23		
4.4.1 Výběr akumulačního induktoru	24		
4.4.2 Výběr spínacího tranzistoru	26		
4.4.3 Výběr Shottkyho diody	26		
4.4.4 Výběr budiče spínacího tranzistoru	27		
4.5 Návrh vstupního filtru	31		
4.6 Návrh výstupního filtru	32		
4.7 Měření obvodových veličin	33		
4.8 Návrh desky plošných spojů	35		
4.9 Návrh krabičky pro snižující měnič	36		
5 Programová část	37		
5.1 Požadavky na software	37		
5.2 Návrh algoritmu MPPT	38		
5.2.1 Analýza solárního systému	38		
5.3 Algoritmus konstantního napětí	40		
5.4 Uživatelské rozhraní	41		
6 Měření	43		
6.1 Měření charakteristik snižujícího měniče	44		
6.2 Měření algoritmu MPPT	48		

Obrázky

1.1 Princip fotovoltaického jevu. Převzato z[2]	1	2.9 Schéma SEPIC měniče v rozepnutém stavu	18
1.2 Fotovoltaický článek náhradní schéma. Převzato z[4]	2	3.1 Popis nabíjecích cyklů baterie. Převzato z [14]	20
1.3 Výstupní charakteristika fotovoltaického článku I(U) pro různé intenzity osvětlení	2	4.1 Blokový návrh solárního systému	21
1.4 Výkonová charakteristika fotovoltaického panelu se znázorněným bodem maximálního výkonu MPP.	3	4.2 Charakteristiky solárního panelu JAM66S30-500/MR	22
1.5 Výkonová charakteristika fotovoltaického článku se znázorněnými body MPP.	4	4.3 Vnitřní struktura LTC7003, výstřižek z katalogu [15]	28
1.6 Globální a lokální maxima solárního systému. Převzato z [5] ..	5	4.4 LTC7003 kompletní zapojení ...	29
1.7 Znázornění principu metody přírůstkové vodivosti. Převzato z [8]	6	4.5 LTC7003 napěťové ochrany, výstřižek z katalogu [15]	30
1.8 Ukázková tabulka s hodnotami β . Převzato z [10]	7	4.6 Schematická značka akumulární cívky, z prostředí OrCAD Capture	35
1.9 Znázornění metody korelace zvlnění. Převzato z [7]	8	4.7 Symbol akumulární cívky popisující reálné rozměry, z prostředí OrCAD PCB Editor	35
1.10 Blokové schéma realizace výpočtu metody korelovaného zvlnění. [7] ...	8	4.8 Výsledná deska plošných spojů s vyznačenou proudovou smyčkou ..	36
1.11 Znázornění metody lineárního rozmitání proudu. Převzato z [10] ..	9	4.9 Krabice pro snižující měnič ...	36
1.12 Princip porovnání metody TWC. Převzato z [9]	9	5.1 Blokový diagram pro návrh softwaru pro arduino	38
2.1 Principiální schéma snižujícího měniče. Převzato z [11]	14	5.2 Blokový diagram algoritmu MPPT	39
2.2 Časový průběh napětí $u_L(t)$ a proudu $i_L(t)$ snižujícího měniče. Převzato z [11]	15	5.3 Průběh napětí na Shottky diodě	40
2.3 Zvlnění napětí na kapacitoru snižujícího měniče. Převzato z [11]	16	5.4 Vstupní a výstupní napětí snižujícího měniče	41
2.4 Principiální schéma zvyšujícího měniče. Převzato z [11]	16	6.1 Průběh napětí na nábojové pumpě. Střída řídicího signálu 0,5. a) použití Shottky diody b) použití síťové diody	43
2.5 Časový průběh napětí $u_L(t)$ a proudu $i_L(t)$ zvyšujícího měniče. Převzato z [11]	16	6.2 Graf V_{CCUV} uváděný výrobcem se zeleně vyznačeným rozsahem hodnot odporů pro nastavení UVLO [15] .	44
2.6 Zvlnění napětí na kapacitoru zvyšujícího měniče. Převzato z [11]	17	6.3 Měření snižujícího měniče, střída 50%. a) odporová zátěž 2 Ω a b) odporová zátěž 50 Ω	47
2.7 Principiální schéma zapojení SEPIC měniče	17	6.4 Měření snižujícího měniče, střída 30%. a) odporová zátěž 2 Ω a b) odporová zátěž 50 Ω	47
2.8 Schéma SEPIC měniče v sepnutém stavu	18	6.5 Princip vylepšeného MPPT algoritmu	48
		6.6 Fotodokumentace měření 1	49

6.7 Fotodokumentace měření 2	50
--	----

Tabulky

2.1 Typy DC/DC měničů a jejich využití	13
3.1 Porovnání různých typů baterií. Převzato z [13] a upraveno	19
4.1 Parametry solárního panelu JAM66S30-500/MR	22
4.2 Parametry baterie VRLA AGM MB 100-12	23
4.3 Požadavky na induktor	24
4.4 Vybraný induktor	25
4.5 Požadované vlastnosti tranzistoru	26
4.6 Vlastnosti LTC7003	27
4.7 vlastnosti ACS724LMATR-20AB-T	34
4.8 Vlastnosti ACS37010LLZATR-050B5	34
6.1 Měření při odporové zátěži 2Ω	45
6.2 Měření při odporové zátěži 50Ω	45
E.1 Seznam součástek	65
E.2 Seznam součástek	66
I.1 Použité měřicí přístroje	83

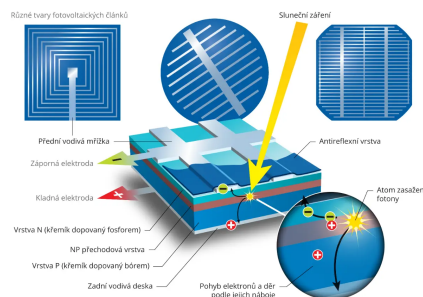
Kapitola 1

Fotovoltaické systémy

1.1 Obecný popis

Fotovoltaické systémy jsou používány k přeměně sluneční energie na energii elektrickou. To je možné díky fotovoltaickému jevu, který poprvé popisují William Grylls Adams a Richard Evan Day ve své publikaci zabývající se účinky světla na selen. Vysvětlení jevu pak dodal o padesát let později Albert Einstein v roce 1905.[1]

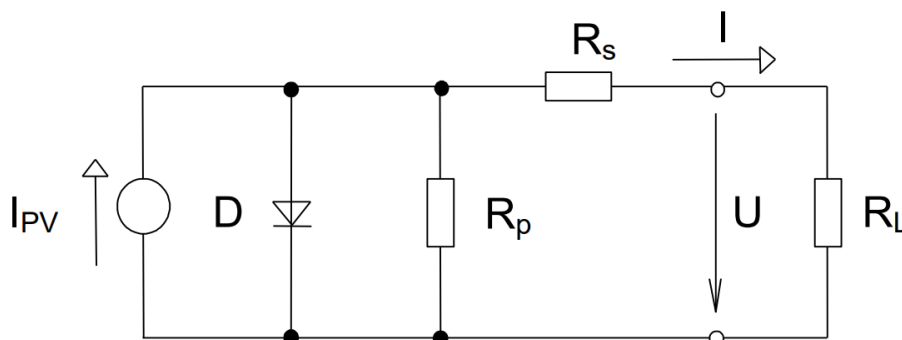
Princip fotovoltaických panelů obr. 1.1 je založen na PN přechodu, který je vytvořen na rozhraní dvou polovodičových vrstev s různou dotací. Polovodičová vrstva typu N je dotovaná prvky, které mají ve valenční vrstvě o elektron více. Takovým prvkem je například fosfor. Dotace polovodiče fosforem má za následek vytvoření polovodiče typu N. V polovodiči typu P, který je dotovaný například borem je to naopak a v takovémto polovodiči elektron schází. Na rozhraní těchto dvou vrstev se vytvoří vyprázdňená oblast, ve které jsou přebytečné díry zaplněné přebytečnými elektrony. Tato oblast, je za normálních podmínek pro další elektrony neprostupná. Při dopadu fotonu na polovodičovou vrstvu předá foton svou kinetickou energii elektronu, díky které je elektron schopen vyprázdňenou oblast překonat. Přeskokem mezi vrstvami vznikne v polovodičích nerovnováha, kdy v polovodiči typu N elektron schází a v polovodiči typu P naopak přebývá. Tento rozdíl je následně vyrovnán proudem, který prochází přes vodivé elektrody, které jsou k polovodičové struktuře připojeny.



Obrázek 1.1: Princip fotovoltaického jevu. Převzato z[2]

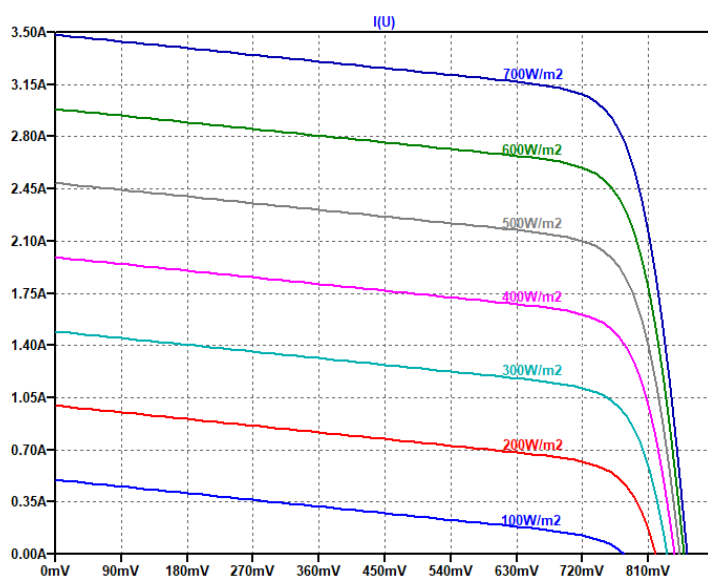
1.2 Popis fotovoltaického článku

Fotovoltaický článek, dále jen FV, si můžeme představit jako zdroj elektrického proudu, který je závislý na intenzitě dopadajícího záření a na vlastní teplotě. Náhradní schéma FV článku je uvedeno na obrázku 1.2,



Obrázek 1.2: Fotovoltaický článek náhradní schéma. Převzato z[4]

kde I_{PV} znázorňuje zdroj generovaného proudu v závislosti na intenzitě osvětlení. R_p je paralelní odpor, který udává směrnici sklonu výstupní charakteristiky, nežli začne propouštět dioda D. Ta se otevírá, přesáhne-li napětí na FV článku hodnotu, při které PN přechod začíná propouštět proud. Pak je výstupní proud zkratován a proud zátěži je nulový. R_s je zde sériový odpor, který znázorňuje odpor připojených elektrod a R_L vyjadřuje připojenou zátěž. Výstupní charakteristika FV článku je znázorněna na obrázku 1.3.



Obrázek 1.3: Výstupní charakteristika fotovoltaického článku $I(U)$ pro různé intenzity osvětlení

Na vodorovné ose je výstupní napětí článku U a na svislé výstupní proud I .

Schéma lze popsat Kirchhoffovými zákony (vztah 1.1).

$$I = I_{PV} - I_D - I_{RP} \quad (1.1)$$

$$I_{PV} = ((T_{vs} - T_{ref}) \cdot K_I + I_{SC}) \cdot \frac{G}{G_{Ref}} \quad (1.2)$$

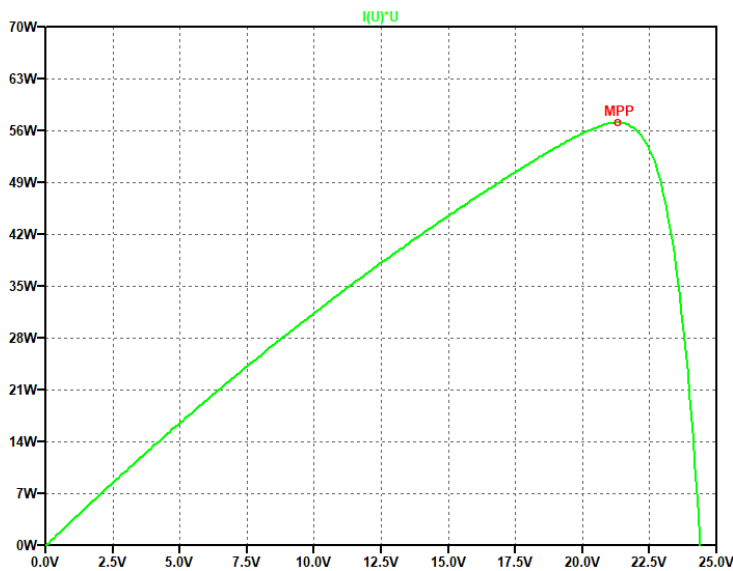
kde $T_{VS} - T_{ref}$ je rozdíl teplot vnitřní struktury od teploty, která je považována za základní. K_I je koeficient změny proudu na teplotě. I_{SC} je zkratový proud při referenční intenzitě osvětlení G_{Ref} a G je aktuální hodnota intenzity slunečního záření.[3]

$$I_D = I_S \cdot \left(e^{\frac{U + I \cdot R_S}{m \cdot U_t}} - 1 \right) \quad (1.3)$$

kde I_S je proud diodou v závěrném směru, U_t je teplotní napětí, m je faktor ideálnosti diody, který se pohybuje v rozmezí od 1 do 2, kde 1 je faktor dobré diody a R_S je sériový odpor FV článku.

$$I_{RP} = \frac{I \cdot R_S + U}{R_P} \quad (1.4)$$

Celý solární panel je následně sestaven z jednotlivých FV článků. Jednotlivé články jsou řazeny sérioparalelně tak, aby dosáhly požadovaného napětí a proudu. Na obrázku 1.4 je znázorněna výkonová charakteristika ideálně osvětleného panelu.



Obrázek 1.4: Výkonová charakteristika fotovoltaického panelu se znázorněným bodem maximálního výkonu MPP.

Na vodorovné ose je výstupní napětí panelu, na svislé ose výkon panelu dodaný do zátěže. MPP je bodem maximálního výkonu.

1.3 Využití solárních panelů

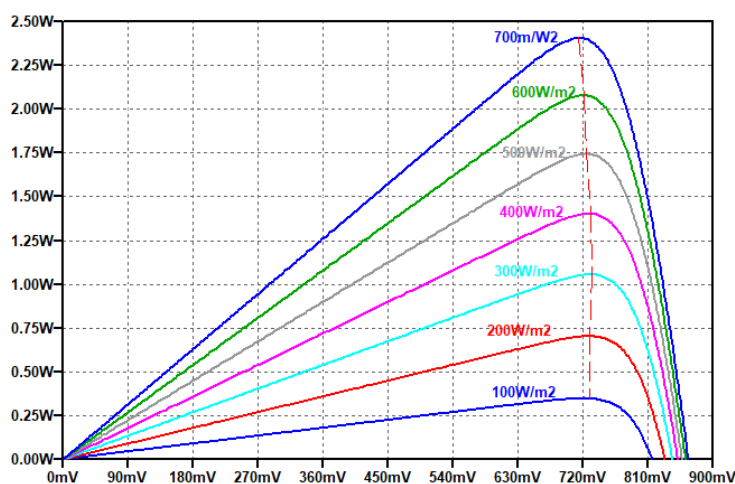
Solární panely nám dávají možnost vytvářet elektřinu tam, kam bychom za normálních okolností nebyli schopni elektřinu dovést. Příkladem mohou být mobilní aplikace nebo elektrifikace odlehlých míst jako jsou horské chaty apod.. Umožňují nezávislost na energetických sítích a ekologický provoz. V poslední době hraje významnou roli ekonomický pohled a zrychlení návratnosti investice do solární energie díky rostoucím cenám klasicky vyráběné elektrické energie, na aplikaci je kladen důraz na to, aby panel generoval co nejvyšší množství elektrické energie a tedy i výkonu. Klíčovým prvkem aplikací s fotovoltaickými panely jsou měniče.

1.3.1 PWM měniče

PWM měniče jsou měniče, pomocí kterých je možné regulovat energii přijímanou ze solárního panelu. Jedná se o základní regulaci, při které se pomocí PWM (Pulse Width Modulation, Pulzně šířková modulace) obdélkovým řídicím signálem spíná vnitřní rychlý spínač, který slouží k propojení cesty mezi solárním panelem a zátěží. Tím je možné řídit množství energie, které je dodáváno do zátěže.

1.3.2 MPPT měniče

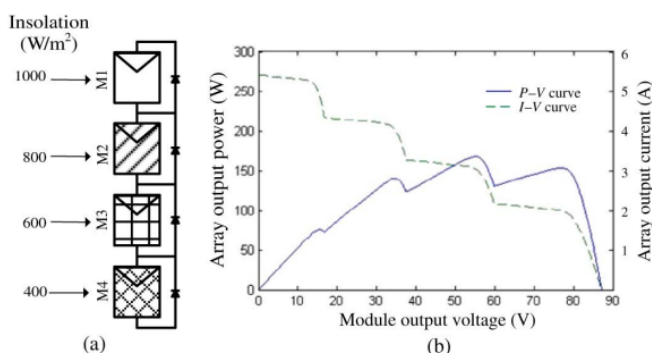
MPPT (Maximum Power Point Tracking) je měnič, který hledá bod s nejvyšší hodnotou generovaného výkonu, a v tomto bodě se snaží pracovat tak, aby bylo získáno co největší množství energie. Body MPPT se mohou dle intenzity osvětlení lišit, viz obr. 1.5.



Obrázek 1.5: Výkonová charakteristika fotovoltaického článku se znázorněnými body MPP.

Na vodorovné ose je výstupní napětí, na svislé ose výkon fotovoltaického panelu dodaný do zátěže. MPP jsou znázorněny červenou čarou.

Solární systémy bývají složeny z více panelů, které mají společný výstup. Při ideálním osvětlení bude na výkonové křivce pouze jeden vrchol. Ale v reálných podmínkách může být část panelů zastíněná, pak mluvíme o nerovnoměrném osvětlení. Na výkonové křivce sestavy tak vznikne více vrcholů, kde jen jeden je maximální viz obr.1.6. Tomuto vrcholu říkáme globální maximum. Vzniklým menším vrcholům říkáme lokální maxima. Algoritmus MPPT by měl být navržen tak, aby byl schopný rozeznat, zda se nachází v lokálním nebo globálním maximu a globální maximum najít. Na obrázku 1.6 a) konfigurace solárních panelů, b) I-V a P-V křivky v závislosti na ozáření panelů.



Obrázek 1.6: Globální a lokální maxima solárního systému. Převzato z [5]

1.3.3 PWM vs MPPT

PWM měniče jsou velmi efektivní řešení pro základní regulaci energie získávané ze solárního panelu, jejich nevýhodou ale je, že nijak neregulují výkonový bod, ve kterém daný panel právě pracuje. MPPT měnič má na rozdíl od PWM měniče zabudovanou logiku, díky které dokáže vyhledat a držet se v bodě nejvyššího výkonu solárního panelu. Oproti PWM měniči je tedy vhodný pro maximalizaci výstupní energie ze solárního panelu.

1.4 Metody MPPT

Metody hledání MPP (Bodu maximálního výkonu) se dělí na dva druhy.

- Prvním druhem je hledání MPP v reálném čase podle určitých výpočetních algoritmů. Tyto metody nazýváme online metody, protože probíhají v reálném čase v závislosti na tom, co se v daném okamžiku v solárním panelu děje.
- Druhý druh je určování MPP na základě předpokladů a předešlých pozorování. Tyto metody nazýváme offline, protože pro své fungování nepotřebují znát stav, ve kterém se solární panel právě nachází. Výhodou offline metod je, že zpravidla nebývají tak výpočetně náročné, ale zároveň bod MPP není určený s vysokou přesností.

1.4.1 Online metody

Perturb and Observe(P&Q)

Jedná se o metodu posuvu a pozorování, která je jedním z nejpoužívanějších algoritmů pro hledání MPP. V tomto algoritmu je pomocí malé změny střídý posunut aktuální výkonový bod o nějakou hodnotu, a je sledováno, zda se výstupní výkon zvýšil a pokud ano, algoritmus bude pokračovat změnou střídý v tomto směru. Pokud se výstupní výkon snížil, bude algoritmus pokračovat změnou střídý v opačném směru. Nevýhodou tohoto algoritmu je, že kolem nejvyššího bodu výkonu má tendenci kmitat. To bývá řešeno určitým počtem překmitů, po kterých je algoritmus vypnut, a zapnut až po určité době.

Incremental conductance (INC)

Metoda přírůstkové vodivosti je algoritmus, který vychází z nulové derivace výkonu podle napětí v bodu maxima:

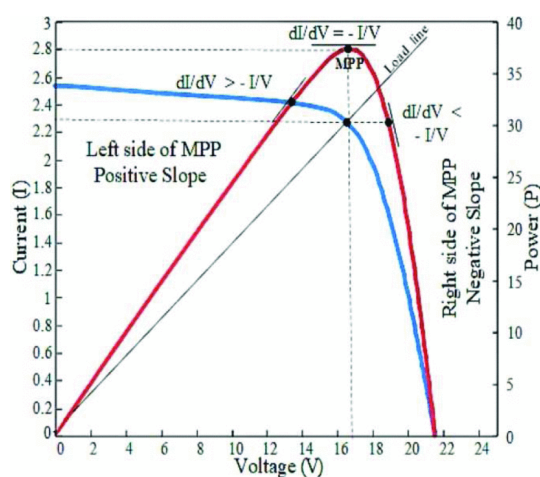
$$\frac{dP}{dV} = \frac{d}{dV}(I \cdot V) = I + V \frac{dI}{dV} = 0 \quad (1.5)$$

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \text{ bod maximálního výkonu} \quad (1.6)$$

$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \text{ střídý je třeba zmenšit} \quad (1.7)$$

$$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \text{ střídý je třeba zvětšit} \quad (1.8)$$

kde I a V jsou předchozí hodnoty proudu a napětí solárního panelu a jejich poměr značí jeho vodivost. dI/dV je diferenční vodivost nebo také přírůstková vodivost panelu. Rovnice 1.6 znázorňuje, že se pohybujeme na levé straně od bodu nejvyššího výkonu MPP a rovnice 1.7 znázorňuje, že se pohybujeme na pravé straně od bodu nejvyššího výkonu MPP, viz obr. 1.7.



Obrázek 1.7: Znázornění principu metody přírůstkové vodivosti. Převzato z [8]

■ Beta (β)

Beta metoda nekonverguje k bodu maximálního výkonu, pouze vymezuje rozmezí, ve kterém se MPP musí nacházet. Parametr β je vypočten z rovnice 1.9 a podle známé teploty a známé intenzity osvětlení je nastaveno rozmezí $\langle \beta_{min}, \beta_{max} \rangle$, ve kterém se β musí nacházet.

$$\beta = \ln\left(\frac{I}{U}\right) - C \cdot U \quad (1.9)$$

kde U je výstupní napětí solárního panelu, I je výstupní proud solárního panelu a C je konstanta, která je popsána rovnicí 1.10.

$$C = \frac{q}{\eta \cdot k \cdot T} \quad (1.10)$$

kde q je elektrický náboj elektronu o velikosti $1,602176634 \times 10^{-19}C$, k je Boltzmanova konstanta, která je rovna $8,617333262 \times 10^{-5}eV/K$, η je faktor kvality diody, a T je teplota dosazená v Kelvinech.

No.	Irradiation	temperature	β
1	$1000W/m^2$	$45^\circ C$	-15.4505
2	$1000W/m^2$	$5^\circ C$	-18.3431
3	$300W/m^2$	$45^\circ C$	-15.9587
4	$300W/m^2$	$5^\circ C$	-19.0214

Obrázek 1.8: Ukázková tabulka s hodnotami β . Převzato z [10]

Pro tuto tabulku platí, že 1. hodnota je β_{max} a 4. hodnota je β_{min} .

Jestliže je vypočtená β v tomto rozsahu, je algoritmus nahrazen algoritmem, který konverguje k maximálnímu bodu výkonu, např. algoritmem P&Q. Není-li parametr β v patřičném rozmezí, jsou nastaveny jiné hodnoty napětí a proudu a výpočet se opakuje.

■ Current sweep (CS)

Metoda rozmítání proudu využívá známé výstupní charakteristiky naměřené při teplotě $25^\circ C$. Řídící jednotka mění výstupní proud pomocí předem definovaného vztahu, kde proud je úměrný frekvenci spínání měniče. [6]

$$i(t) = f(t) \quad (1.11)$$

Tuto metodu lze implementovat pomocí napětím řízeného oscilátoru. Jedná se o metodu konvergující k bodu maximálního výkonu, ale rychlost konvergence je pomalá.

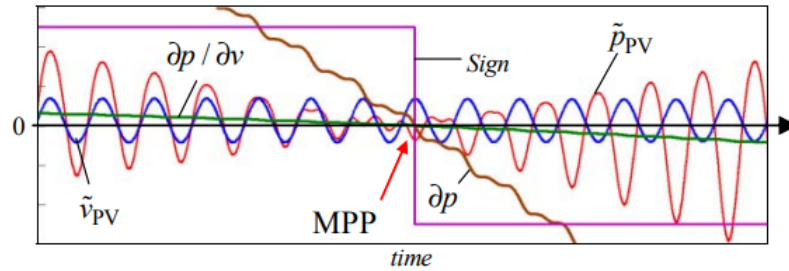
Ripple correlation (RC)

Metoda korelovaného zvlnění vychází z měření zvlnění výstupního napětí a výkonu, kde hodnota zvlnění je určena následujícím vztahem.

$$v = v - \bar{v} \quad (1.12)$$

$$p = p - \bar{p} \quad (1.13)$$

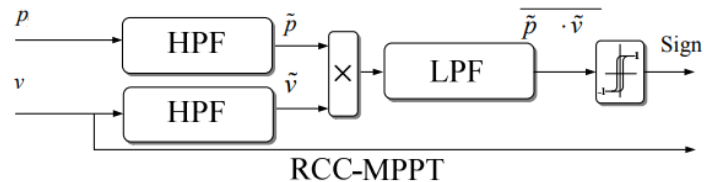
kde \bar{v} a \bar{p} jsou stejnosměrnou složkou veličin v a p . Pak je možné určit znaménko korelace, které popisuje, zda má zvlnění napětí solárního panelu stejné znaménko jako zvlnění výkonu solárního panelu. Pokud je znaménko kladné pak se MPPT algoritmus pohybuje na levé straně výkonové křivky od bodu maximálního výkonu. Pokud je znaménko korelace záporné algoritmus MPPT se nachází na pravé straně výkonové křivky od bodu MPP. V bodě změny znaménka je pak výsledný maximální výkonový bod.[7] Kde



Obrázek 1.9: Znázornění metody korelace zvlnění. Převzato z [7]

$$\frac{\partial p}{\partial v} \cong \frac{\tilde{p} \cdot \tilde{v}}{\tilde{v} \cdot \tilde{v}} \quad (1.14)$$

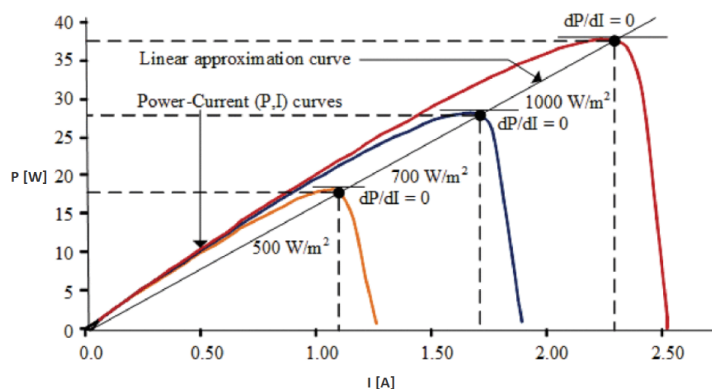
Následná realizace takového výpočtu je sestavena ze dvou horních propustí pro získání hodnot zvlnění a jedné dolní propusti. Blokové schéma znázorňující realizaci je na obr. 1.10.



Obrázek 1.10: Blokové schéma realizace výpočtu metody korelovaného zvlnění. [7]

■ Current linear sweep (CLS)

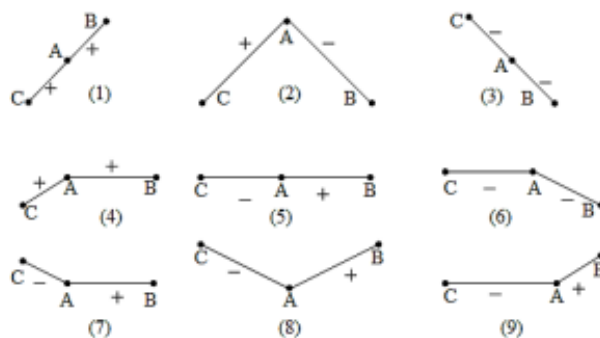
Tato metoda je postavena na předpokladu, že nelinearity způsobené teplotou zanedbáváme, pak MPP lineárně narůstá společně s proudem, viz obrázek 1.11. Pak tedy se změnou intenzity slunečního záření můžeme měnit výstupní proud solárního panelu a dohledat MPP.



Obrázek 1.11: Znázornění metody lineárního rozmítání proudu. Převzato z [10]

■ Three-point weight comparison (TWC)

Metoda porovnání hodnot tří bodů spočívá v tom, že na začátku vybereme tři body A, B, C na výstupní charakteristice. Z těchto bodů vypočteme výkon $I \cdot U$ solárního panelu a tyto tři hodnoty mezi sebou porovnáme. Z porovnání výsledků zjistíme, kam jsme se na výstupní charakteristice trefili, a dále tyto tři body posuneme tak, aby se blížily MPP. [9]



Obrázek 1.12: Princip porovnání metody TWC. Převzato z [9]

Jestliže jsme se tedy trefili do příkladu (1) z obrázku 1.12, tak následující volba bodů bude taková, že nové C se posune na stávající B. Nové A bude mít napětí vyšší než původní B a nové B bude mít hodnotu napětí vyšší než nové A. Tyto hodnoty znovu porovnáme a vyhodnotíme.

■ 1.4.2 Offline metody

■ Constant voltage (CV)

Metoda konstantního napětí vychází z toho, že bod MPP se ve většině případů, kdy je panel aktivní, nachází blízko jedné napěťové hodnoty, která je dána hodnotou napětí panelu naprázdno, násobeného konstantním koeficientem dle vztahu 1.15. MPPT měničem je tedy nastaveno napětí, které odpovídá této hodnotě. Tím je zaručeno, že ve většině případů bude pracovní bod FV panelu v blízkosti bodu MPP.

$$U_{MPP} \approx k \cdot U_O \quad (1.15)$$

kde k je konstantní koeficient, U_O je napětí naprázdno a U_{MPP} je napěťová úroveň v bodu maximálního výkonu.

Tato metoda není přesná, jelikož nepočítá se změnou MPP v důsledku změny teploty panelu ani s částečným zastíněním systému.

■ Pilot cell (PC)

V češtině se tato metoda nazývá metodou základního článku. Vychází z toho, že sérioparalelní kombinací jednotlivých článků lineárně měníme celkové výstupní parametry. Když tedy zapojíme dva články paralelně vedle sebe, zvýšíme výstupní proud na dvojnásobek a při zapojení článků do série zvýšíme výstupní napětí na dvojnásobek. Z toho lze odvodit, jaký bude mít celý panel MPP a jak se bude MPP měnit v závislosti na osvětlení. K této metodě je potřeba senzor intenzity slunečního záření, které dopadá na FV panel, aby řídicí systém mohl následně v tabulce dohledat, kde se MPP nachází. [9]

■ Look up table (LT)

Tato metoda je podobná metodě PC, kdy řídicí jednotka má k dispozici paměť, ve které má uložená data solárního panelu - tabulky MPP: pro různé intenzity osvětlení, při různých teplotách a nerovnoměrném osvětlení naměřená výrobcem. Nevýhodou této metody je velikost potřebné paměti a nepřenositelnost tabulky na jiný panel. [9]

■ 1.4.3 Hybridní metody

Každá metoda se vyznačuje svými určitými výhodami a naopak nedostatky. Některé z vyjmenovaných metod jsou přímo navrženy tak, že musí být kombinovány s jinými, aby dospěly k opravdovému MPP. Kombinací algoritmů můžeme docílit vylepšení parametrů použitých metod, jako například rychlost konvergence, omezení oscilací kolem maxima, přesnost určení MPP a rychlost odezvy. Vzniklým kombinovaným metodám pak říkáme hybridní metody. Často jsou také klasické metody kombinované s neuronovými sítěmi, nebo takzvanou fuzzy logikou, která je založená na předešlém učení a má velmi rychlou rozhodovací schopnost. Nevýhodou těchto metod je, že učící proces může být velmi dlouhý.

Mezi základní hybridní metody můžeme zařadit Beta+P&O , Beta+TWC, CV+P&O a další, kde metodu Perturb and Observe (P&O), můžeme například nahradit komplexnějším algoritmem metody Incremental Conductance nebo Ripple correlation.

Kapitola 2

Spínané zdroje

Spínané zdroje jsou zařízení, která využívají spínacích součástí, zejména tranzistorů k přeměně vstupního napětí na napětí výstupní s co nejmenšími ztrátami. Výhodou oproti lineárním zdrojům jsou jejich malé rozměry a vyšší účinnost.

2.1 DC/DC měniče

DC/DC měniče jsou zařízení, která mají za úkol měnit vstupní stejnosměrný signál na výstupní, taktéž stejnosměrný signál. Jejich úkolem je zvyšovat, případně snižovat či obracet vstupní napětí s co nejmenšími ztrátami.

Tabulka 2.1: Typy DC/DC měničů a jejich využití

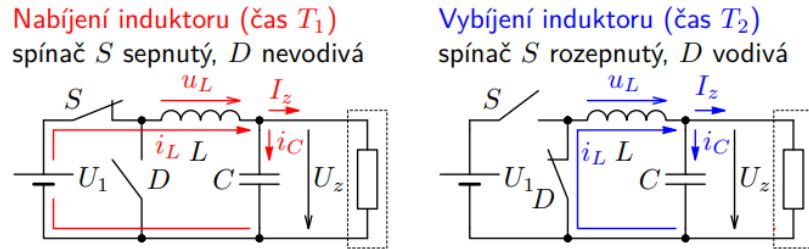
Typ měniče	Využití
Nábojová pumpa	Nízký výstupní proud (jednotky mA)
Snižující měnič (Buck converter)	Snížení velikosti vstupního napětí
Zvyšující měnič (Boost converter)	Zvýšení velikosti vstupního napětí
Invertor (Buck-Boost converter)	Snížuje i zvyšuje velikost vstupního napětí
SEPIC	Snížuje i zvyšuje velikost vstupního napětí

2.1.1 Nábojová pumpa

Nábojová pumpa je struktura tvořená kondenzátory, kde v principu jsou tyto kondenzátory nabity a následně řazeny za sebe pomocí spínačů. Výsledná velikost napětí je rovna součtu napětí na všech použitých kondenzátorech. Tato struktura může být použita jen do vysokých impedancí. Nábojové pumpy jsou často využívány pro spínání unipolárních tranzistorů při highside uspořádání. Tedy tam, kde řídicí signál není dostatečně velký pro otevření MOSFET tranzistorů a je potřeba zvednout napětí na gate, ale není odebírán téměř žádný proud (proud teče pouze při otevírání tranzistoru).

2.1.2 Snížující měnič

Snížující měnič je struktura tvořená spínačem S, induktorem L, kapacitorem C a diodou D a jeho činnost se skládá ze dvou stavů viz obr. 2.1.



Obrázek 2.1: Principiální schéma snížujícího měniče. Převzato z [11]

Pokud budeme uvažovat ideální součástky a bude-li platit, že napětí na zátěži je konstantní a zvlnění napětí na kondenzátoru bude zanedbatelné vůči napětí na zátěži $\Delta u_C \ll U_Z$, bude při sepnutém stavu spínače S a rozpojené diodě D v čase T_1 napětí na cívce u_L konstantní a bude mít velikost $u_{L_{\text{sepnuté}}} = U_1 - U_Z$. Je-li na cívku připojeno konstantní napětí, pak proud cívku lineárně roste.

V čase T_2 je spínač S v rozepnutém stavu a dioda D je sepnutá. V této fázi je na cívku připojeno napětí $u_{L_{\text{rozepnuté}}} = -U_Z$ a proud cívku klesá. Pokud platí, že proud cívku neklesne během celé své periody na nulu, měnič pracuje ve spojitým režimu. Průběhy jsou znázorněny na obrázku 2.2.

Pro ustálený stav snížujícího měniče pak platí následující vztah.

$$\Delta i_L \cdot L = u_{L_{\text{sepnuté}}} \cdot T_1 = -u_{L_{\text{rozepnuté}}} \cdot T_2 \quad (2.1)$$

$$\Delta i_L \cdot L = (U_1 - U_Z) \cdot T_1 = U_Z \cdot T_2$$

Pokud z tohoto vztahu vyjádříme napětí U_Z , získáme vztah pro výstupní napětí viz vztah 2.3

$$U_Z = U_1 \cdot \frac{T_1}{T_1 + T_2} = U_1 \cdot D \quad (2.2)$$

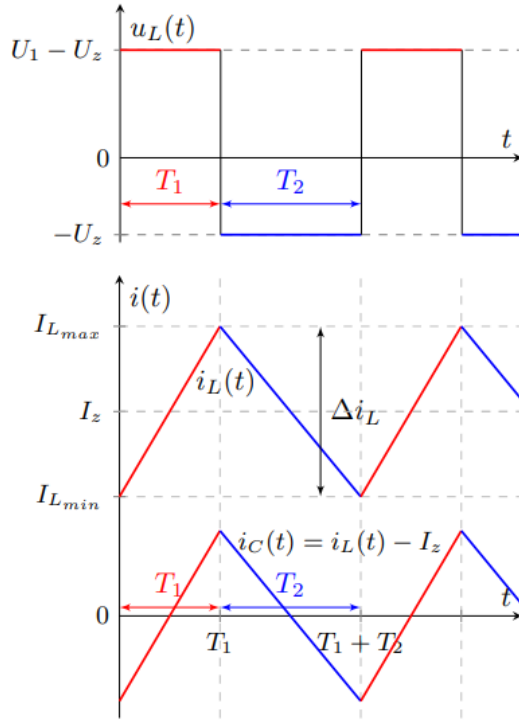
kde D je střída obdélníkového průběhu. Následně můžeme dopočítat nároky na indukčnost použité cívky, kde za U_Z do vztahu dosadíme vypočtenou hodnotu U_Z ze vztahu 2.3.

$$L = \frac{(U_1 - U_Z) \cdot T_1}{\Delta i_L} = \frac{(U_1 - U_1 \cdot D) \cdot T_1}{\Delta i_L} = \frac{U_1 \cdot (1 - D) \cdot T_1}{\Delta i_L} \quad (2.3)$$

Pro zvlnění napětí na kapacitoru platí následující vztah.[11]

$$\Delta u_c = \bar{u}_c + u_c = \frac{\Delta i_L \cdot T_1}{8C} + \frac{\Delta i_L \cdot T_2}{8C} = \frac{\Delta i_L \cdot T}{8C} = \frac{\Delta i_L}{8C \cdot f} \quad (2.4)$$

Znázornění průběhů zvlnění viz obrázek 2.3



Obrázek 2.2: Časový průběh napětí $u_L(t)$ a proudu $i_L(t)$ snižujícího měniče. Převzato z [11]

2.1.3 Zvyšující měnič

Zvyšující měnič má obdobnou strukturu jako snižující měnič, je tvořen spínačem S, induktorem L, kapacitorem C a diodou D, liší se ale uspořádáním jednotlivých komponent, viz obr. 2.4.

Obdobně jako snižující měnič pracuje ve dvou stavech: při sepnutém spínači S v čase T_1 a rozepnutém spínači s v čase T_2 . Pokud budeme uvažovat ideální součástky a napětí na zátěži U_Z jako konstantní a zvlnění napětí na kapacitoru bude zanedbatelné vůči napětí na zátěži $\Delta u_C \ll U_Z$, pak platí následující popis:

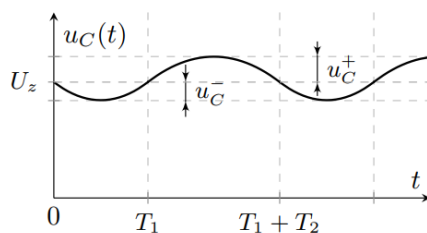
V sepnutém stavu spínače S a rozepnuté diodě D je na cívce připojené konstantní napětí zdroje $u_{L_{sepnuté}} = U_1$ a proud cívkou roste lineárně. Zátěž je napájena pouze z náboje kapacitoru C.

V rozepnutém stavu spínače S je sepnuta dioda D a na cívce je napětí $u_{L_{rozepnuté}} = U_1 - U_Z < 0$ a proud cívkou klesá.

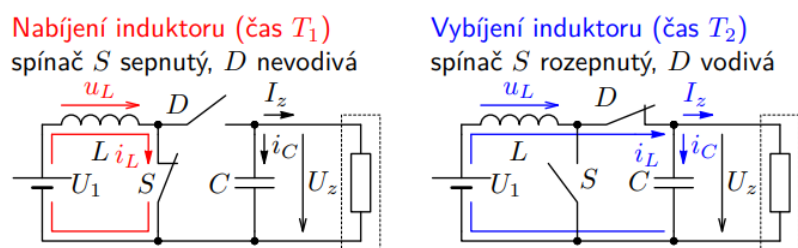
Pro ustálený stav zvyšujícího měniče pak platí následující vztah.

$$\Delta i_L \cdot L = u_{L_{sepnuté}} \cdot T_1 = -u_{L_{rozepnuté}} \cdot T_2 \quad (2.5)$$

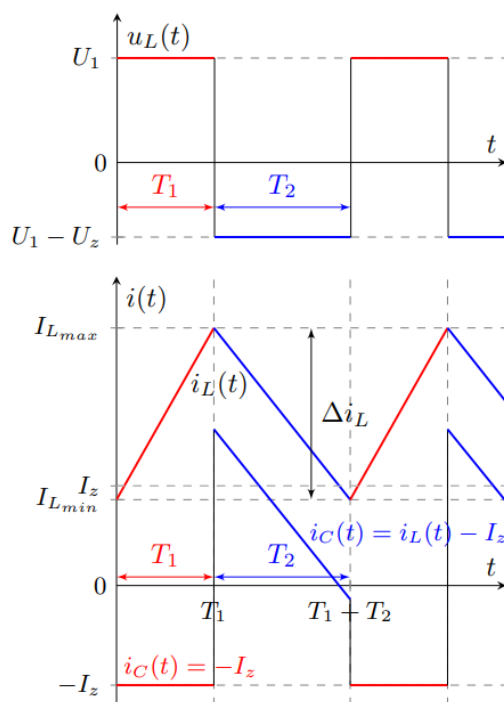
$$\Delta i_L \cdot L = U_1 \cdot T_1 = -(U_1 - U_Z) \cdot T_2$$



Obrázek 2.3: Zvlnění napětí na kapacitoru snižujícího měniče. Převzato z [11]



Obrázek 2.4: Principiální schéma zvyšujícího měniče. Převzato z [11]



Obrázek 2.5: Časový průběh napětí $u_L(t)$ a proudu $i_L(t)$ zvyšujícího měniče. Převzato z [11]

Pokud z tohoto vztahu vyjádříme napětí U_Z , získáme vztah pro výstupní napětí viz vztah 2.7

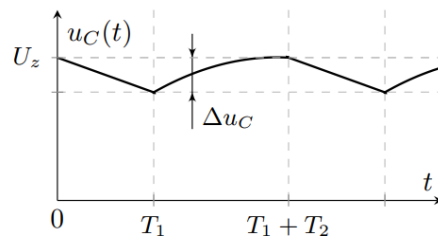
$$U_Z = U_1 \frac{T_1 + T_2}{T_2} = U_1 \frac{T}{T_2} = U_1 \frac{1}{f \cdot T_2} \quad (2.6)$$

Nároky na indukčnost použité cívky viz vztah 2.8

$$L = \frac{U_1 \cdot T_1}{\Delta i_L} = \frac{(U_Z - U_1) \cdot T_2}{\Delta i_L} \quad (2.7)$$

Pro ustálený stav bude zvlnění napětí na kapacitoru dáno lineárním vybíjením kapacitoru do zátěže v čase T_1 v závislosti na odebíraném proudu. Zvlnění na kapacitoru bude tedy popsáno následujícím vztahem.[11]

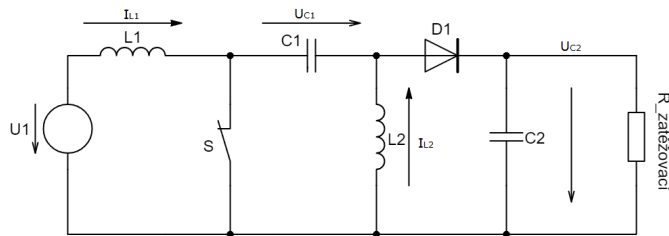
$$\Delta u_c = \frac{I_Z \cdot T_1}{C} \quad (2.8)$$



Obrázek 2.6: Zvlnění napětí na kapacitoru zvyšujícího měniče. Převzato z [11]

2.1.4 SEPIC

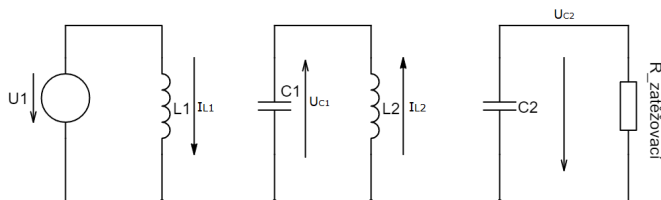
SEPIC neboli single-ended primary-inductor convertor je typ měniče, který umožňuje snižující i zvyšující konverzi. Tento typ měniče je často používán pro nabíjení baterií. Schéma zapojení je nakresleno na obrázku 2.7.



Obrázek 2.7: Principiální schéma zapojení SEPIC měniče

Měnič opět pracuje ve dvou stavech. Ve stavu, kdy je spínač S sepnutý, je induktor L1 připojen přímo na vstupní zdroj napětí. Kapacitor C1 je

přepojen paralelně k induktoru L2 a dioda je zapojena v závěrném směru. Zátěž je napájena kapacitorem C2. Schematické znázornění sepnutého stavu viz obrázek 2.8.



Obrázek 2.8: Schéma SEPIC měniče v sepnutém stavu

Proud cívkou L1 lineárně roste po dobu sepnutí spínače T_1 dle vztahu 2.10.

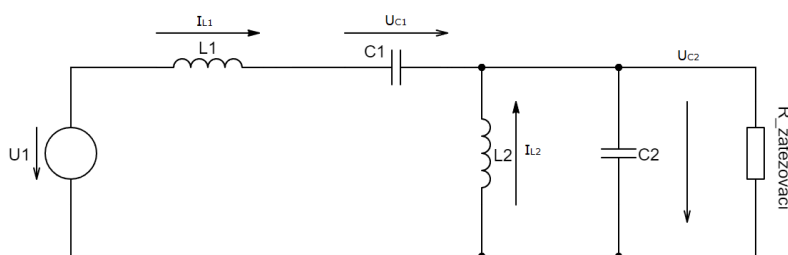
$$I_{L1} = \frac{U_1 \cdot T_1}{L1} \quad (2.9)$$

Proud cívkou L2 je úměrný napětí na kondenzátoru C1, pokud je kapacita kondenzátoru C1 dostatečně veliká, aby bylo možné napětí na něm považovat za konstantní, pak platí vztah 2.11.

$$I_{L2} = \frac{U_{C1} \cdot T_1}{L2} \quad (2.10)$$

Napětí na zátěži je stejné jako napětí na kapacitoru C2 a proud zátěži je úměrný její velikosti. Je-li kapacita kapacitoru C2 dostatečně veliká, můžeme považovat napětí na zátěži za konstantní $U_{C2} = U_Z$.

Pro rozepnutý stav spínače S platí schéma znázorněné na obrázku 2.9. Kapacitor C1 je nabíjen proudem o velikosti I_{L1} a kapacitor C2 je nabíjen proudem o velikosti $I_{L1} + I_{L2}$



Obrázek 2.9: Schéma SEPIC měniče v rozepnutém stavu

Pro ideální SEPIC měnič paltí následující vztah

$$U_Z = U_{C2} = U_1 \cdot \frac{D}{1 - D} = U_1 \cdot \frac{T_1}{T_2} \quad (2.11)$$

kde D je střída špínání špínacího prvku a U_{C2} je napětí na připojené zátěži. [12]

Kapitola 3

Akumulátory

Akumulátory slouží k uchování energie pro pozdější využití. Nejčastěji jsou používány akumulátory využívající elektrochemických jevů k uschování energie. Dodáváním elektrické energie do akumulátoru obnovujeme jeho chemickou strukturu a následnou chemickou reakcí v baterii získáváme elektrickou energii zpět. U olověných akumulátorů je nabíjecí proud zhruba desetina kapacity akumulátoru. Akumulátory mohou být tedy nabíjeny i několik hodin.

Tabulka 3.1: Porovnání různých typů baterií. Převzato z [13] a upraveno

Typ	Nom. napětí	Počet cyklů	Hustota energie [Wh/kg]
Pb	2,10 V	500-800	30-40
NiCd	1,25 V	1500	40-60
NiMh	1,25 V	500	60-80
Li-Ion	3,6 V	500-1000	100
Li-Pol	2,7 V	150	150-200

kde Pb jsou olověné akumulátory, NiCd - Nikl-kadmiové, NiMh - Nikl-metal hydridový, Li-Ion Lithium-iontový, Li-Pol Lithium-polymerový.

Lithiové baterie jsou populární a výhodné díky své energetické hustotě a hmotnosti. Nevýhodou těchto baterií je citlivost na přebíjení, které může vést k poškození a přehřívání baterií.

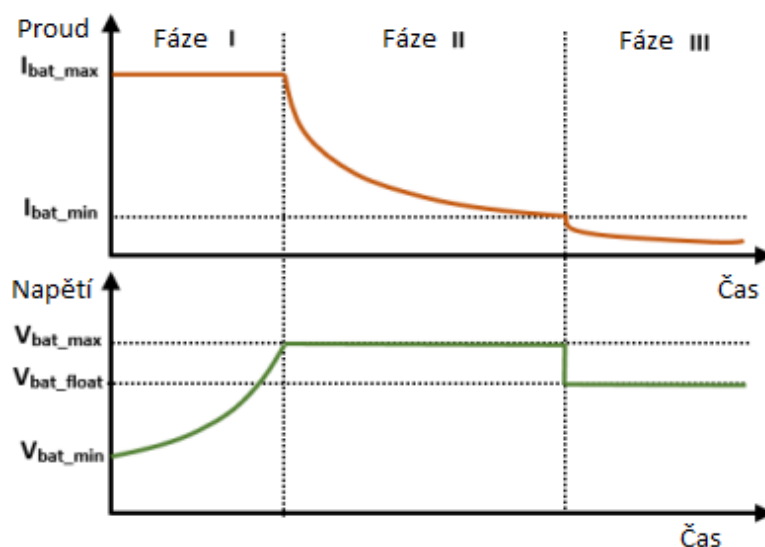
Akumulátory na bázi niklu mají nízké výrobní náklady a vlastnost uchovat energii na dlouhou dobu. Nevýhodou těchto baterií je nižší energetická hustota oproti lithiovým bateriím a tzv. "paměťový efekt", kdy při dobíjení baterií, aniž by byly baterie dostatečně vybité, může si baterie zapamatovat novou nejnižší hodnotu a tím snížit svou kapacitu.

V solárních systémech jsou často používány gelové olověné akumulátory, díky své ceně a bezúdržbovému použití. V dnešní době jsou vyráběny gelové baterie, které již netrpí na vysychání elektrolytu a není nutné je doplňovat vodou. Oproti Lithium-iontovým bateriím je jejich cena zhruba třetinová.

3.0.1 Nabíjecí cykly akumulátorů

Nabíjecí cyklus akumulátoru je rozdělen na 3 fáze:

- První fází cyklu nabíjení akumulátoru je nabíjení konstantním proudem tzv. Bulk charge, kdy je do akumulátoru dodáván konstantní proud a napětí na akumulátoru postupně roste.
- V druhé fázi nabíjecího cyklu akumulátoru (absorbtion charge) je dosaženo $U_{bat-max}$ (pro 12 V akumulátory bývá tato hodnota mezi 13-15 V). V této fázi je dosaženo maximálního napětí na baterii a proud odebíraný akumulátorem postupně klesá, dokud není baterie plně nabita. Poté je proud odebíraný baterií téměř nulový.
- Třetí fáze nabíjecího cyklu je fáze udržovací, kdy je akumulátor již dobitý a odebírá pouze proud kompenzující samovybíjení akumulátoru. Napětí na akumulátoru je nastaveno na jeho jmenovitou hodnotu, která je nižší než ve druhé fázi při dobíjení konstantním napětím.



Obrázek 3.1: Popis nabíjecích cyklů baterie. Převzato z [14]

V solárních systémech může tedy být MPPT algoritmus používán pouze v první fázi, kdy je akumulátoru jedno, jaký proud přijímá, a je schopný pojmout maximální množství energie. Množství energie je omezeno tepelnými účinky na baterii při daném nabíjecím proudem. Výrobce akumulátorů udává maximální bezpečný nabíjecí proud. Ve druhé fázi, musí být na akumulátor připojeno konstantní napětí, aby se předešlo jeho přebíjení a akumulátor si sám určí, jaký jím teče proud. Není tedy možné již získat maximální energii z panelu.

Kapitola 4

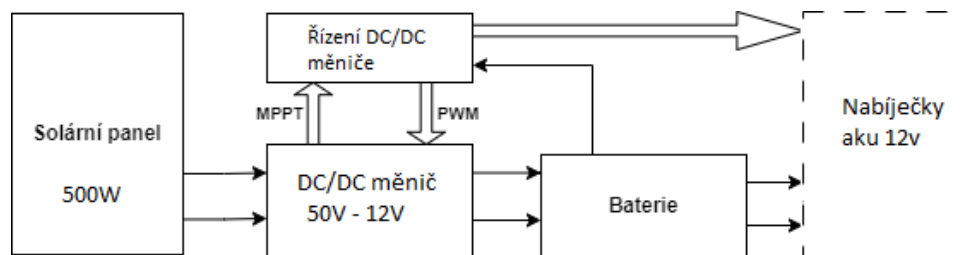
Praktická část

V praktické části mé práce se budu zabývat návrhem měniče s algoritmem MPPT pro dobíjení akumulátorů ručního nářadí ze solárního panelu za použití originálních 12 V nabíječek prodávaných výrobcem. Pro mé účely použiji snižující typ měniče, protože solární panel bude v bodu maximálního výkonu mít napětí vždy vyšší než 14V. Pokud by v bodu maximálního výkonu měl panel napětí nižší než 14 V bude velmi nízký výstupní proud panelu.

Měnič bude navržen pro využití při stavebních pracích, kdy ještě není možné využít elektrickou síť, ale je zbytečné používat elektrický agregát se spalovacími motory. Systém bude vytvářet dostatečnou zásobu energie pro dobíjení ručního nářadí s akumulátory, jako například vrtačky, drážkovačky, ruční vysavač apod..

4.1 Počáteční rozvaha

Systém bude dimenzovaný na připojení až 4 nabíječek ručního nářadí. Jedna nabíječka má síťový odběr 230 W a baterie je dobíjena cca 2 hodiny. Pro nabití jedné baterie musí mít systém k dispozici alespoň 460 Wh. Pro 4 nabíječky bude muset být vnitřní kapacita systému alespoň 1840 Wh. Blokový návrh solárního systému viz obr. 4.1.



Obrázek 4.1: Blokový návrh solárního systému

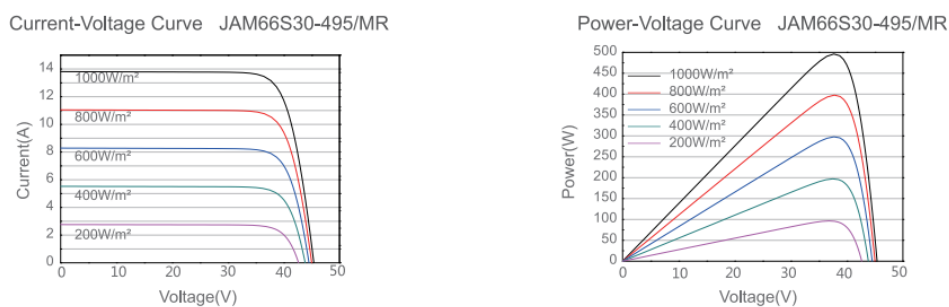
4.2 Solární panel

Systém bude provozovaný s 500 W peak solárním panelem od firmy JA solar. Parametry solárního panelu:

Tabulka 4.1: Parametry solárního panelu JAM66S30-500/MR

JAM66S30-500/MR	
Napětí naprázdno [V]	45,59
Proud na krátko [A]	13,93
Napětí při max. výkonu [V]	38,35
Proud při max. výkonu [A]	13,04
Efektivita modulu [%]	21,100

Charakteristiky solárního panelu JAM66S30 dodávané výrobcem v produktovém listu obr. 4.2.



Obrázek 4.2: Charakteristiky solárního panelu JAM66S30-500/MR

4.3 Výběr akumulátorů

Ve své bakalářské práci jsem vybral jako systémové baterie gelové olověné akumulátory, díky jejich nízké ceně oproti lithium-iontovým, které jsou také hojně používány v solárních systémech. Nevýhodou olověných akumulátorů oproti lithium-iontovým je nižší počet nabíjecích cyklů a větší hmotnost. Použiji 2x 12 V 100 Ah, abych pokryl minimální potřebu 1840 Wh. Souhrn vlastností baterií viz tabulka 4.2.

Tabulka 4.2: Parametry baterie VRLA AGM MB 100-12

VRLA AGM MB 100-12	
Jmenovité napětí [V]	12,0
Nabíjecí napětí [V]	13,8
Typický nabíjecí proud [A]	10,0
Max. nabíjecí proud [A]	25,0
Vypínací napětí [V]	10,5

Výsledná kapacita baterií bude 2400 Wh a systém bude plně nabitý po 4 hodinách a 48 minutách při osvětlení 1000 W/m².

4.4 Návrh snižujícího měniče

Pro návrh snižujícího měniče jsem využíval informace ze skript docenta Jiřího Hospodky [11] a jehož činnost je popsána v kapitole 2.1.2 této práce. Pracovní frekvenci měniče jsem zvolil 100 kHz.

Výpočet střídý pro krajní hodnoty

Střída je poměr mezi sepnutým a vypnutým stavem spínacího prvku. Je dána poměrem vstupního a výstupního napětí. Čím bude napěťový rozdíl menší tím větší bude celková střída. Určení krajní hodnoty střídý je potřeba pro výpočet indukčnosti akumulárního induktoru. Maximální napětí dodané solárním panelem je U_{IN-MAX} , které je uvedené výrobcem 45,59 V. Minimální napětí na výstupu měniče je napětí vybité systémové baterie $U_{BAT-MIN}$ tedy 10,5 V.

$$D = \frac{U_{BAT-MIN}}{U_{IN-MAX}} = \frac{10,5 \text{ V}}{45,59 \text{ V}} \doteq 0,23 \quad (4.1)$$

Z krajní hodnoty střídý lze pak určit minimální dobu, po kterou bude spínač sepnutý T_1 .

$$T_1 = D \cdot T = D \cdot \frac{1}{f} = 0,23 \cdot \frac{1}{100000 \text{ Hz}} = 2,3 \mu s \quad (4.2)$$

■ Výpočet indukčnosti akumulčního induktoru

Indukčnost hlavní akumulční cívky je vypočtená dle vztahu 4.4. Aby však bylo možné indukčnost vypočítat, je potřeba určit maximální proudový přírůstek na cívce ve spojitém režimu při maximálním povoleném rozkmitu, nejčastěji 30 %.

$$\Delta i_L = 0,3 \cdot \frac{P_{IN-MAX}}{U_{BAT-MIN}} = 0,3 \cdot \frac{500 \text{ W}}{10,5 \text{ V}} \doteq 14,3 \text{ A} \quad (4.3)$$

Nyní lze vypočítat indukčnost akumulční cívky.

$$L = (U_{IN-MAX} - U_{BAT-MIN}) \cdot \frac{T_1}{\Delta i_L} \quad (4.4)$$

$$L = (45,59 \text{ V} - 10,5 \text{ V}) \cdot \frac{2,3 \mu\text{s}}{14,3 \text{ A}} \doteq 5,64 \mu\text{H}$$

■ Výpočet maximálního proudu induktorem

Cívkou bude protékat maximální proud v případě, že měnič bude pracovat v bodu nejvyššího výkonu solárního panelu a zároveň na baterii bude nejnižší možné napětí. Střední hodnotu tohoto proudu lze vypočítat dle vztahu 4.5.

$$I_{L-MAX-STR} = \frac{P_{IN-MAX}}{U_{BAT-MIN}} = \frac{500 \text{ W}}{10,5 \text{ V}} \doteq 47,6 \text{ A} \quad (4.5)$$

K této střední hodnotě je pak nutné připočíst polovinu proudového rozkmitu na cívce. Výsledný vztah

$$I_{L-MAX} = I_{L-MAX-STR} + \frac{1}{2} \Delta i_L = 47,6 \text{ A} + \frac{1}{2} \cdot 14,3 \text{ A} = 54,75 \text{ A} \quad (4.6)$$

■ 4.4.1 Výběr akumulčního induktoru

Z výpočtů vyplývá, že použitá cívka musí snést proud alespoň 55 A a minimální indukčnost cívky je 5,7 μH . Tyto hodnoty jsou spolu svázané rozkmitem na cívce, tedy pokud bude vyšší indukčnost, sníží se rozkmit proudu a i celkový maximální proud. Shrnutí požadavků na cívku je v tabulce 4.3.

Tabulka 4.3: Požadavky na induktor

Požadavky na induktor		
Jmenovitý proud	>	55 A
Indukčnost	>	5,7 μH

Podle požadavků na induktor jsem vybral výkonový induktor od výrobce Würth Elektronik s feritovým vinutým jádrem.

Tabulka 4.4: Vybraný induktor

7443763540100	
Jmenovitý proud	56,7 A
Saturační proud	62 A
Indukčnost	10 μ H
Stejnoseměrný odpor	1,2 m Ω
Nárůst teploty při 47,6 A	30 K

Zpětným dosazením do předchozího vztahu ověřím proudovou rezervu použitého induktoru.

$$\Delta i_L = (U_{IN-MAX} - U_{BAT-MIN}) \cdot \frac{T_1}{L} \quad (4.7)$$

$$\Delta i_L = (45,59 \text{ V} - 10,5 \text{ V}) \cdot \frac{2,3 \mu\text{s}}{10 \mu\text{H}} \doteq 8,07 \text{ A}$$

$$I_{L-MAX} = 47,6 \text{ A} + \frac{1}{2} \cdot 8,07 \text{ A} \doteq 51,6 \text{ A} \quad (4.8)$$

Proudová rezerva na induktoru je tedy 5 A. Takovou rezervu lze považovat za dostatečnou a zvlnění proudu na cívce je přibližně 17%.

■ Výpočet vyhlazovacího kapacitoru

Vyhlazovací kapacitor má za úkol na výstupu měniče udržet konstantní napětí. Toto lze vypočítat podle vztahu 4.9.

$$C = \frac{\Delta i_L}{8 \cdot f \cdot \Delta U_C} \quad (4.9)$$

Za zvlnění napětí na kapacitoru jsem si zvolil $\Delta U_C = 0,01 \text{ V}$ tak, aby se napětí na výstupu téměř neměnilo.

$$C = \frac{8,07 \text{ A}}{8 \cdot 100 \text{ kHz} \cdot 0,01 \text{ V}} \doteq 1 \text{ mF}$$

Jako vyhlazovací kapacitu jsem následně zvolil paralelní kombinaci dvou 470 μ F elektrolytických kondenzátorů s výslednou kapacitou 0,94 mF. Zvlnění na kapacitorech přepočítám zpětným dosazením do vztahu 4.9.

$$\Delta U_C = \frac{\Delta i_L}{8 \cdot f \cdot C} = 10,7 \text{ mV}$$

Tento vztah je teoretický a nepočítá s reálným ESR (ekvivalentním sériovým odporem) kapacitoru.

4.4.2 Výběr spínacího tranzistoru

Mezi důležité parametry MOSFET tranzistorů pro mou aplikaci patří maximální napětí mezi elektrodami drain a source, které tranzistor snese, aniž by došlo k proražení, a maximální proud, který tranzistorem může téci, aniž by došlo k jeho zničení. Dalšími důležitými parametry jsou kapacita gate elektrody, ta ovlivňuje především rychlost spínání tranzistoru a odpor mezi elektrodami drain a source v sepnutém stavu. Tento odpor bývá u MOSFET tranzistorů malý, ale při velkých proudech na tranzistoru může vznikat znaitelná výkonová ztráta. Ta tranzistor ohřívá a tranzistor následně může ztratit své vlastnosti. Souhrn požadovaných vlastností tranzistoru uvádím v tabulce 4.5.

Tabulka 4.5: Požadované vlastnosti tranzistoru

Požadované vlastnosti tranzistoru		
Napětí DRAIN-SOURCE	>	45,59 V
Stálý proud	>	47,6 A
Náboj na GATE		Co nejmenší
R_{DS-ON}		Co nejmenší

Vybral jsem tranzistor IPP019N06NF2S od firmy Infineon Technologies má průrazné napětí $U_{DS}=60$ V trvalý proud drainem 160 A. To by nebylo nutné, ale jeho výhodou je nízký odpor $R_{DS-ON} = 1,9 m\Omega$, na kterém při sepnutém stavu a maximálním proudu bude ztrátový výkon

$$P_{STATICKÉ} = R_{DS-ON} \cdot I_{MAX}^2 = 1,9 m\Omega \cdot (47,6 A)^2 = 4,3 W$$

4.4.3 Výběr Shottkyho diody

Při výběru Shottky diody je důležitým parametrem proud, který může diodou téci, aniž by došlo k poškození, následně pak také napětí na přechodu, které určuje ztrátu na diodě. Mnou vybraná Shottky dioda STPS30M60S od firmy STMicroelectronics má efektivní hodnotu průchozího proudu 90 A a je tedy vyhovující do mé aplikace a napětí na přechodu 0,5 V. Maximální výkonová ztráta na diodě bude

$$P_{ZTRÁT} = U_{FV} \cdot I_{MAX} = 0,5 V \cdot 47,6 A = 23,35 W$$

4.4.4 Výběr budiče spínacího tranzistoru

Specializované integrované obvody pro buzení spínacích tranzistorů vyrábí několik výrobců. Při výběru budiče tranzistoru jsem vybíral takový budič, který obsahuje řízení nábojové pumpy a tím umožňuje budit i při plovoucím napětí na source spínacího MOSFET. Vybral jsem budič LTC7003 od firmy Analog Devices, který umožňuje budit při vstupním napětí od 3,5 V do 60 V. Výhodou tohoto budiče je velké množství ochran, které nabízí k ochraně celého obvodu. V následující tabulce uvádím souhrn vlastností tohoto budiče a jejich využití v mé aplikaci.

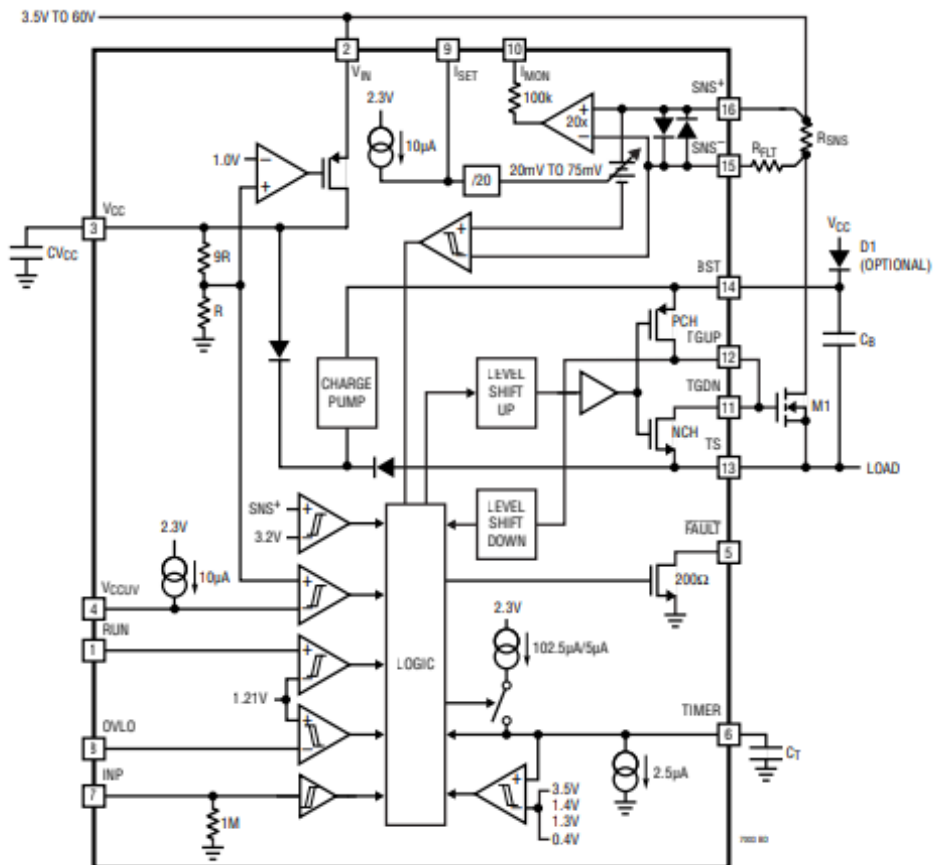
Tabulka 4.6: Vlastnosti LTC7003

LTC7003	
Ochrana proti nadproudu	Použitá
Monitorování proudu	Nepoužitá
Ochrana proti přepětí	Použitá
Ochrana proti podpětí	Použitá
Ochrana proti přehřátí	Použitá
Ochrana proti podpětí napájecího pinu	Použitá

Aby bylo možné porozumět funkcím budiče, je třeba znát vnitřní strukturu obvodu. Ta je uvedena v katalogovém listu produktu od výrobce obrázek 4.3.

- Teplotní ochrana budiče je aktivní vždy. Pokud teplota budiče přesáhne 180°C je pin TGDN přitažen k TS a tím tedy vyřadí budící funkci. Následně čeká, dokud teplota neklesne pod 150°C, kdy umožní budiči přejít do normálního stavu, kdy TGUP je přitahováno k napětí nábojové pumpy BST.
- Ochrana proti nadproudu je realizována pomocí pinů SNS+ a SNS-, kde je snímáno napětí na měřicím rezistoru R_{SENS} . Napěťový limit, při kterém ochrana začíná pracovat, lze nastavit odporem na pinu I_{SET} , kdy je odpor připojen mezi tuto svorku a zem. Napěťový rozsah je 20-70 mV. Po překročení limitu je nabíjen časovací kondenzátor na pinu Timer a tím je možno nastavit, jak dlouho může nadproud v obvodu trvat, aniž by byl obvod rozepnut. V případě, že napětí na časovacím kondenzátoru dosáhne hodnoty 1,3 V je FAULT pin přitažen k zemi s vnitřním odporem 200 Ω a je tedy možnost signalizaci nadproudu zachytit.
- Nastavení podpěťové ochrany je přístupné na pinu RUN. Pokud je na tomto pinu menší napětí než 0,7 V, je budič ve vypnutém stavu. Při napětí nad 1,21 V na tomto pinu je budič uveden do budícího stavu. Toto napětí lze nastavit pomocí napěťového děliče ze vstupního napětí a tím nastavit ochranu proti podpětí. Doporučená hodnota odporů děliče výrobcem je v řádu M Ω .
- Nastavení přepěťové ochrany je přístupné na pinu OVLO. Pokud napětí na tomto pinu přesáhne 1,21 V, budič přestane budit.

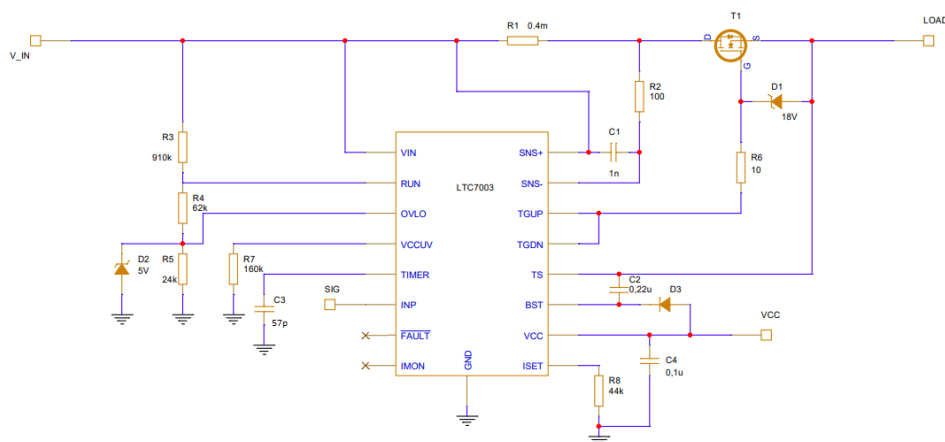
- Podpěťová ochrana V_{CC} je nastavitelná na pinu V_{CCUV} . Pomocí odporu připojeného k tomuto pinu nastavujeme vypínací napětí budiče při poklesu V_{CC} pod hodnotu v rozmezí 3,5 V-10,5 V dle hodnot odporů, uváděných v produktovém listu výrobce.



Obrázek 4.3: Vnitřní struktura LTC7003, výstřižek z katalogu [15]

Volba úrovní ochran

Obrázek 4.4 zapojení budiče s nastavenými prvky ochran.



Obrázek 4.4: LTC7003 kompletní zapojení

Maximální napětí na vstupu jsem zvolil $V_{IN}=50\text{ V}$ a minimální 14 V tak, aby budič budil jen v případě, že je na FV panelu větší napětí než na straně systémových akumulčních baterií a přešel tak toku energie z baterií zpět do panelu. Pro výpočet hodnot odporového děliče jsem použil vztahů udávaných výrobcem pro $R_{CELKOVÉ}=1\text{M}\Omega$.

$$R_5 = R_{CELKOVÉ} \cdot \frac{1,21\text{ V}}{U_{PŘEPĚTÍ}} = 1\text{ M}\Omega \cdot \frac{1,21\text{ V}}{50\text{ V}} = 24,2\text{ k}\Omega$$

$$R_4 = R_{CELKOVÉ} \cdot \frac{1,21\text{ V}}{U_{PODPĚTÍ}} - R_5 = 1\text{ M}\Omega \cdot \frac{1,21\text{ V}}{14\text{ V}} - 24,2\text{ k}\Omega \doteq 62,2\text{ k}\Omega$$

$$R_3 = R_{CELKOVÉ} - R_4 - R_5 = 1\text{ M}\Omega - 62,2\text{ k}\Omega - 24,2\text{ k}\Omega = 913,6\text{ k}\Omega$$

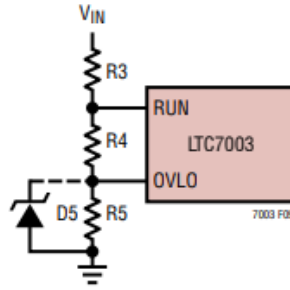
Zvolil jsem odpory v řadě nejbližší těmto hodnotám $R_3=910\text{ k}\Omega$, $R_4=62\text{ k}\Omega$ a $R_5=24\text{ k}\Omega$. K odporu R_5 je přidávána paralelně Zenerova dioda na 5 V pro ochranu pinu OVLO, protože pokud by bylo napětí na tomto pinu větší než 6 V , budič by byl nenávratně poškozen. Obrázek 4.5 zapojení těchto odporů dle doporučení výrobce.

Nadproudovou ochranu obvodu jsem nastavil pomocí pinu I_{SET} na hodnotu napětového rozdílu mezi $SNS+$ a $SNS-$ 20 mV , aby byla na snímacím odporu R_{SENSE} co nejmenší ztráta.

Aby obvod nepřesáhl jmenovitý proud hlavní akumulční cívky maximální proud I_{MAX} 55 A , zvolíme snímací odpor R_{SENSE} tak, aby měl hodnotu

$$R_{SENSE} = \frac{20\text{ mV}}{55\text{ A}} \doteq 0,36\text{ m}\Omega \quad (4.10)$$

Použil jsem odpor s hodnotou $0,4\text{ m}\Omega$ a napětí mezi $SNS+$ a $SNS-$ jsem pomocí odporu R_8 připojeného mezi pin I_{SET} a zem nastavil na 22 mV . Výpočet dle vztahu uváděném výrobcem:



Obrázek 4.5: LTC7003 napěťové ochrany, výstřižek z katalogu [15]

$$R_{SET} = \frac{22 \text{ mV}}{0,5 \text{ } \mu\text{A}} = 44 \text{ k}\Omega \quad (4.11)$$

Výkonová ztráta na snímacím odporu potom bude

$$P_{SENSE} = 0,4 \text{ m} \cdot \Omega(55 \text{ A})^2 = 1,21 \text{ W} \quad (4.12)$$

Nastavení podpěťové ochrany napájecího napětí budiče V_{CC} jsem nastavil na vypínací napětí baterie 10,5 V pomocí 160 k Ω odporu R_7 připojeného mezi tento pin a zem.

Nastavení časovače nadproudu na pinu Timer. Po vyhodnocení nadproudového stavu je vnitřním komparátorem k pinu Timer připojen vnitřní zdroj proudu, který začne nabíjet kondenzátor připojený k pinu Timer. Pro výpočet hodnoty, po kterou bude nadproud povolen jsem použil následující vztah udávaný výrobcem.

$$T_{NADPROUDU}[\mu\text{s}] = \frac{1,4\text{V} \cdot C_{TIMER}[\text{F}]}{100\mu\text{A}} + 1,5\mu\text{s} \quad (4.13)$$

Při periodě signálu $T=10\mu\text{s}$ a nejmenší střídě vypočtené dle vztahu 4.1 v sekci návrh snižujícího měniče $D=0,23$ bude nejkratší sepnutý stav trvat 2,3 μs .

$$C_{TIMER} < \frac{(T_{NADPROUDU}[\mu\text{s}] - 1,5 \mu\text{s})100 \mu\text{A}}{1,4 \text{ V}} \quad (4.14)$$

$$C_{TIMER} < \frac{(2,3 \mu\text{s} - 1,5 \mu\text{s})100 \mu\text{A}}{1,4 \text{ V}} = 57 \text{ pF}$$

■ Dynamické ztráty na tranzistoru

Na zvoleném budiči závisí jak velké ztráty budou na použitém spínacím tranzistoru. Dynamické ztráty tranzistoru jsou úměrné době potřebné k sepnutí a následně vypnutí tranzistoru. Tranzistor PP019N06NF2S má vstupní kapacitu přibližně 7,5 nF v celém svém napěťovém rozsahu U_{DS} . V produktovém listu LTC7003 jsou uvedeny časy náběžných a sestupných hran pro otevření a zavření tranzistoru v rozsahu (10 - 90 %) pro vstupní kapacity 1 a 10 nF. Pro vstupní kapacitu 10 nF je náběžný čas $t_r = 90$ ns a sestupný čas $t_f = 40$ ns. Dynamické ztráty jsou počítány podle vztahu 4.15 převzatého z [16]

$$P_{DYNAMICKÉ} = \frac{1}{2} \cdot U_{IN} \cdot I_{DS} \cdot (t_r + t_f) \cdot f_{SW} \quad (4.15)$$

Kde maximální ztráty budou pokud měnič bude pracovat v bodu nejvyššího výkonu solárního panelu při 500 W. Napětí $U_{IN} = 38,35$ V a maximální možný proud tranzistorem $I_{DS} = 47,6$ A, pokud bude systémová baterie vybita.

$$P_{DYNAMICKÉ} = \frac{1}{2} \cdot 38,35 \text{ V} \cdot 47,6 \text{ A} \cdot (90 \text{ ns} + 40 \text{ ns}) \cdot 100 \text{ kHz} = 11,86 \text{ W}$$

■ 4.5 Návrh vstupního filtru

Vstupní filtr má za úkol filtrovat spínání obvodu tak, aby se výstup panelu jevil jako stejnosměrný. Zajistí, že i v době T_2 , kdy je spínací tranzistor zavřený, bude z panelu odebírána energie a nedojde tak ke ztrátě energie, kterou získáváme z panelu. Protože se snažíme zajistit stejnosměrný výstup z panelu bude tento filtr typu dolní propust. Zvolil jsem topologii CLC filtru. Filtrační frekvence musí být alespoň 10 krát nižší než frekvence spínací

$$f_{filt} <^{10x} f_{sw}$$

Filtrační frekvenci jsem zvolil

$$f_{filt} = 5000 \text{ Hz}$$

Důležitým nárokem na vstupní filtr je maximální napětí, které je možné na filtr připojit, to je omezeno provozním napětím na použitých kondenzátorech. Maximální proud, který filtrem může téci, ovlivňuje použitá cívka. V tomto případě je maximálním proudem proud na krátko dodávaný panelem. Pro realizaci filtru jsem zvolil 2 elektrolytické kondenzátory s maximálním stejnosměrným napětím 60 V a kapacitou 470 μF . Následně jsem dopočítal hodnotu tlumivky dle vztahu 4.16, převzatého z [17].

$$L_{IN-MIN} = \frac{1}{(\pi f)^2 C} = \frac{1}{(\pi \cdot 5 \text{ kHz})^2 \cdot 470 \mu F} \doteq 8,623 \mu H \quad (4.16)$$

Zvolil jsem cívku s indukčností 8,2 μH .

4.6 Návrh výstupního filtru

Výstupní filtr má za úkol filtrovat zvlnění na výstupu snižujícího měniče tak, aby výstupní napětí bylo možné považovat opravdu za konstantní. Použiji stejný kondenzátor jako ve snižujícím měniči $C=470 \mu F$.

$$L_{OUT-MIN} = \frac{1}{(2\pi f)^2 C} = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot 2,5 \text{ kHz})^2 \cdot 470 \mu F} \doteq 8,62 \mu H \quad (4.17)$$

Indukčnost tlumivky mi vyšla téměř stejná jako pro vstupní filtr, ale vzhledem k vyššímu výstupnímu proudu jsem zvolil induktor s nižší indukčností $6,8 \mu H$, který byl cenově výhodnější.

4.7 Měření obvodových veličin

Arduino UNO, které používám jako řídicí kontrolér, má k dispozici 6 analogových vstupů s vnitřním AD převodníkem, který má rozsah 0-5 V s rozlišením 2^{10} bitů, rozlišovací schopnost je tedy 5mV. Mohu tedy v obvodu měřit celkem 6 veličin, aniž bych musel použít externí AD převodníky.

Měření napětí solárního panelu

Aby bylo možné přesně určit bod maximálního výkonu solárního panelu, je potřeba znát napětí na tomto panelu. Napětí budu snímat pomocí napěťového děliče. Maximální napětí panelu je 45,59 V. Zvolil jsem maximální měřicí napětí s rezervou jako 55 V. Pokud bude odpor R_1 připojen k měřené veličině a odpor R_2 připojen na zem a napětí bude snímáno mezi těmito odpory, bude platit

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{U_{PANEL-MAX}}{U_{PANEL-SENS}} - 1 = \frac{55 \text{ V}}{5 \text{ V}} - 1 = 10 \quad (4.18)$$

R_2 jsem zvolil 10 k Ω , aby ztrátový výkon na napěťovém děliči byl zanedbatelný.

$$R_1 = 10R_2 = 10 \cdot 10 \text{ k}\Omega = 100 \text{ k}\Omega \quad (4.19)$$

Výkonová ztráta na takovémto děliči bude

$$P = \frac{U_{PANEL-MAX}^2}{(R_1 + R_2)} = \frac{55 \text{ V}^2}{110 \text{ k}\Omega} = 27,5 \text{ mW} \quad (4.20)$$

Měření napětí výstupu

Napětí na výstupu měniče bude v případě připojení 12 V olověných akumulátorů maximální hodnotu 13,8V. Volím s rezervou trochu větší hodnotu maximálního měřicího napětí 15 V.

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{U_{OUT-MAX}}{U_{OUT-SENS}} - 1 = \frac{15 \text{ V}}{5 \text{ V}} - 1 = 2 \quad (4.21)$$

Pro odpor R_2 jsem zvolil hodnotu 47 k Ω , hodnotu odporu R_1 dvojnásobnou, tedy 94 k Ω . Odpor R_1 je připojen k měřené veličině a odpor R_2 je připojen k zemi.

Výkonová ztráta tohoto děliče je

$$P = \frac{U_{OUT-MAX}^2}{(R_1 + R_2)} = \frac{14 \text{ V}^2}{141 \text{ k}\Omega} \doteq 1 \text{ mW} \quad (4.22)$$

Měření proudu solárního panelu

Měření proudu solárního panelu je taktéž potřeba k určení maximálního výkonového bodu, ve kterém bude solární panel pracovat. Protože výstupní

proud je stejnosměrná veličina je vhodné k měření použít buď hallovou sondu, která reaguje na magnetické pole vytvořené protékajícím proudem, nebo měřicí odporový bočník, jako v případě ochrany budiče. Nevýhoda odporového bočníku je, že pokud chceme mít co nejmenší výkonový úbytek měřením, bude odečítané napětí velmi malé v řádu mV. Pro mou aplikaci jsem vybral sensor proudu s hallovou sondou ACS724LMATR-20AB-T od firmy Allegro MicroSystems. Parametry sensoru uvádím v tabulce 4.7.

Tabulka 4.7: vlastnosti ACS724LMATR-20AB-T

ACS724LMATR-20AB-T		
Napájecí napětí		5 V
Proudový rozsah	-20 A	20 A
Napěťová citlivost		100 mV/A

Proudový sensor má citlivost $1\text{mV}=10\text{mA}$ a zachytitelný rozdíl pomocí arduina je 5mV . Rozlišovací schopnost celkového měření proudu je tedy 50mA , což je pro určení bodu maximálního výkonu dostatečné. Dle simulační analýzy provedené v LTSpice, je změřitelná odchylka střídavý v bodu maximálního výkonu $\Delta D=0,002$, která znamená rozdíl přibližně desetinu wattu.

■ Měření proudu na výstupu měniče

Proud na výstupu měniče je zajímavý údaj pro dopočtení výstupního výkonu. Pro měření jsem opět použil sensor s hallovou sondou ACS37010LLZATR-050B5 od firmy Allegro MicroSystems pro maximální hodnotu měřeného proudu 50 A. Vlastnosti sensoru uvádím v tabulce 4.8.

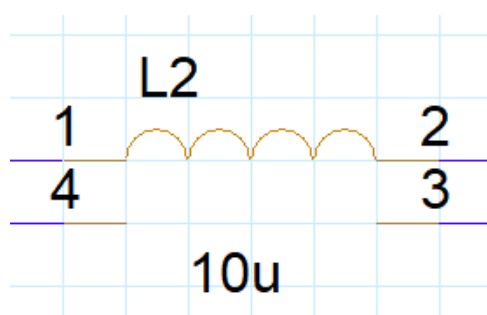
Tabulka 4.8: Vlastnosti ACS37010LLZATR-050B5

ACS37010LLZATR-050B5		
Napájecí napětí		5 V
Proudový rozsah	-50 A	50 A
Napěťová citlivost		40 mV/A

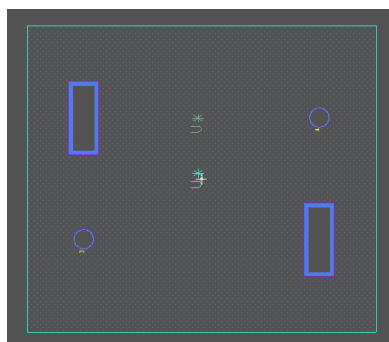
Při citlivosti snímání použitého arduina 5mV , bude rozpoznatelná velikost proudu 125mA .

4.8 Návrh desky plošných spojů

Pro návrh desky plošných spojů jsem použil prostředí OrCAD, kde jsem nejprve nakreslil kompletní schéma zapojení a následně vytvořil desku plošných spojů. Pro vytvoření desky plošných spojů bylo nutné si vytvořit vlastní knihovnu se schematickými značkami použitých komponent a symboly popisujícími fyzikální rozměry reálných pouzder součástek. K tomuto jsem využil předpřipravené návrhy, které poskytuje internetový obchod Mouser, případně produktové listy součástek.

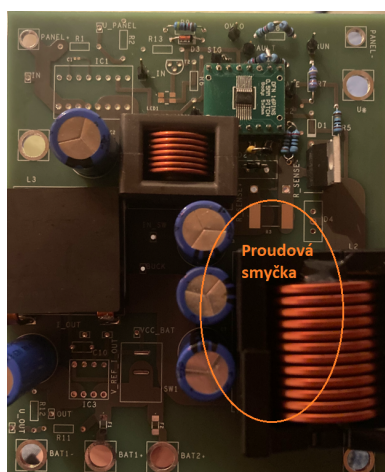


Obrázek 4.6: Schematická značka akumulční cívky, z prostředí OrCAD Capture



Obrázek 4.7: Symbol akumulční cívky popisující reálné rozměry, z prostředí OrCAD PCB Editor

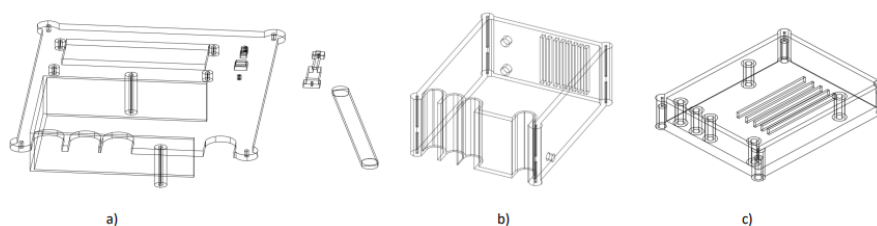
Při návrhu desky plošných spojů jsem se snažil jednotlivé komponenty složit tak, abych co nejvíce omezil plochu proudové smyčky, která se uzavírá mezi vstupním filtrem výstupními kapacitami a Shottky diodou. Výsledná deska plošných spojů s vyznačenou proudovou smyčkou viz obr. 4.7. Návrh plošného spoje je uveden v příloze F.



Obrázek 4.8: Výsledná deska plošných spojů s vyznačenou proudovou smyčkou

4.9 Návrh krabičky pro snižující měnič

Krabičku pro snižující měnič jsem navrhoval v programu ProgeCAD. Krabička byla navržena tak, aby bylo možné ji vytisknout na 3D tiskárně a je složena ze tří částí, které jsou následně spojeny samořeznými vruty do plastu. Pro tisk krabičky jsem mohl vybírat mezi materiály PLA a PETG, z kterých jsem vybral PETG, jehož výhodou je vyšší bod tání mezi 220-250 °C oproti PLA, které mění svou konzistenci již při teplotě 180 °C, tedy již při teplotě vypnutí spínacího budiče. Materiál PETG by také měl být odolnější oproti materiálu PLA. Kompletní výkres krabičky je uveden v příloze příloze J. V obrázku 4.8 přikládám vizuální přehled všech tří částí, kde a) Horní díl, b) Střední díl, c) Spodní díl.



Obrázek 4.9: Krabička pro snižující měnič

Kapitola 5

Programová část

V této části bakalářské práce se budu věnovat návrhu programu v prostředí Arduino IDE, který by měl zajišťovat správný chod snižujícího měniče a komunikaci s uživatelem.

5.1 Požadavky na software

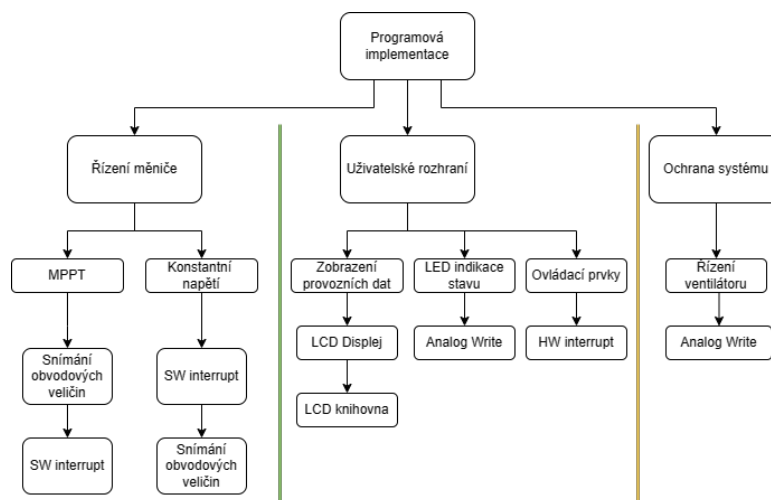
Systém bude řízen třemi stavy, které určuje napětí na vstupu měniče a napětí na výstupu měniče.

- První stav: pokud na vstupu nebude napětí alespoň 14 V, měnič bude vypnutý a mikrokontrolér bude čekat dokud napětí z panelu nepřesáhne 14 V.
- Druhý stav: pokud je napětí na vstupu vyšší než 14 V a zároveň napětí na baterii není vyšší než maximální nabíjecí napětí 13,6 V, uvede mikrokontrolér měnič do stavu, kdy je hledán bod nejvyššího výkonu, pomocí MPPT algoritmu. V tomto stavu setrvá dokud baterie nedosáhne maximálního nabíjecího napětí nebo pokud napětí z panelu neklesne pod 14 V.
- Třetí stav: pokud napětí na vstupu je vyšší než 14 V a zároveň napětí na baterii dosáhlo maximálního nabíjecího napětí, bude měnič řízen mikrokontrolérem tak, aby na výstupu bylo konstantní napětí. Pokud toto napětí přesáhne maximální nabíjecí napětí, mikrokontrolér měnič vypne.

Následným požadavkem je komunikace s uživatelem, aby uživatel věděl v jakém režimu se měnič zrovna nachází a jaký je jeho vnitřní stav. Mikrokontrolér bude s uživatelem komunikovat pomocí LCD displeje, tlačítka a LED indikačních kontrol.

Posledním požadavkem na software je zajištění bezpečného chodu měniče. Ochrany měniče jsou již implementovány pomocí použitého budiče LTC7003.

Software bude dále řídit ventilaci měniče. Kdy mikrokontrolér bude v závislosti na vstupním výkonu řídit ventilátor pro chlazení celého systému. Na obrázku 5.1 je uveden blokový diagram jednotlivých částí.



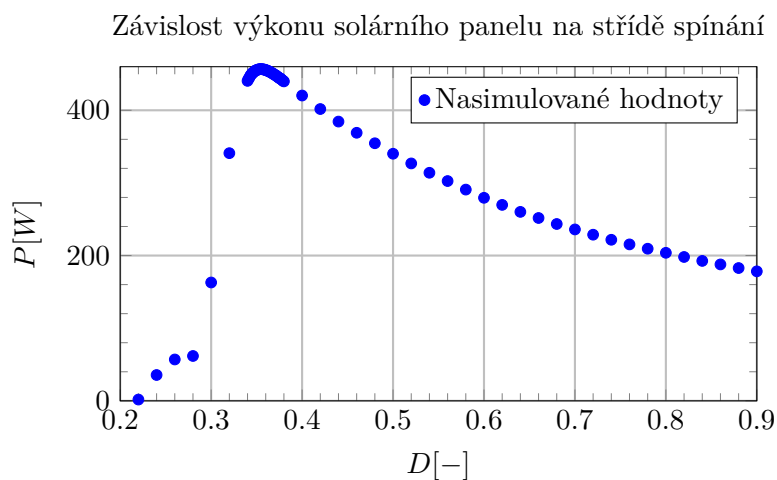
Obrázek 5.1: Blokový diagram pro návrh softwaru pro arduino

5.2 Návrh algoritmu MPPT

Má aplikace bude obsahovat jeden solární panel, který bude vystaven dynamickým změnám slunečního ozáření. Proto jsem se zaměřil na návrh hybridního algoritmu.

5.2.1 Analýza solárního systému

V simulačním prostředí LTSpice jsem si nasimuloval činnost snižujícího měniče pro solární panel o maximální výkonové špičce 456 W. Zjišťoval jsem závislost mezi použitou střídou a velikostí výstupního výkonu ze solárního panelu.

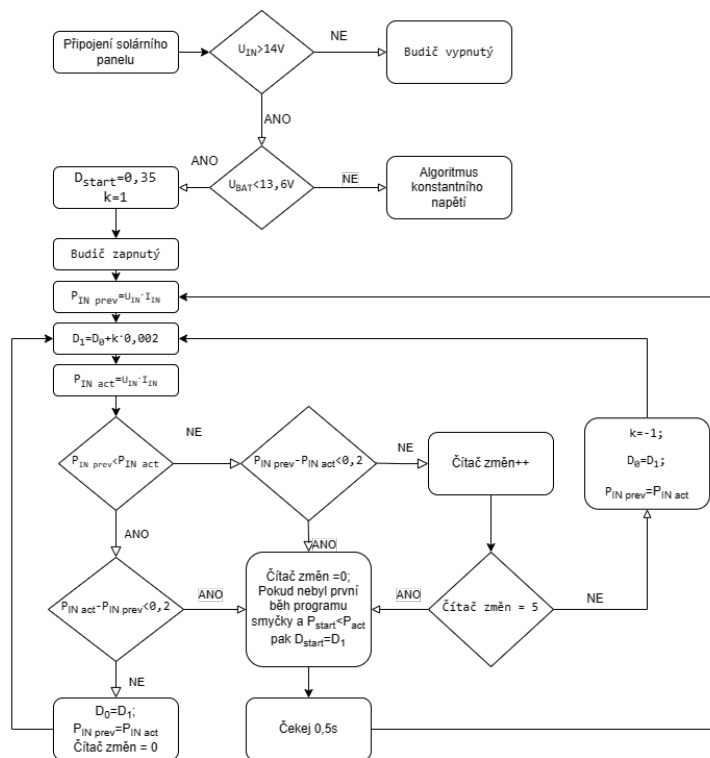


Z odsimulovaných hodnot jsem získal výsledek, že bod maximálního výkonu se nachází okolo střídny 0,35. Na tomto předpokladu jsem postavil počátek algoritmu MPPT, který bude mít po prvním připojení k solárnímu panelu předem nastavenou střídnu a to právě na 0,35.

Následně pak algoritmus MPPT přejde do režimu Perturb and Observe, při kterém kontrolér bude měnit střídnu a následně vyhodnocovat důsledek změny.

Poté co kontrolér najde bod maximálního výkonu, přepíše základní použitou střídnu střídou námi použitého panelu. To zajistí, že pro tento panel bude při ideálních podmínkách velmi rychle dohledán bod maximálního výkonu a bude tedy zajištěna nejvyšší efektivita solárního panelu.

Abych předešel zakmitání a neočekávaným stavům, po každé změně střídny bude měnič čekat 5ms před tím, než změří novou hodnotu výkonu.

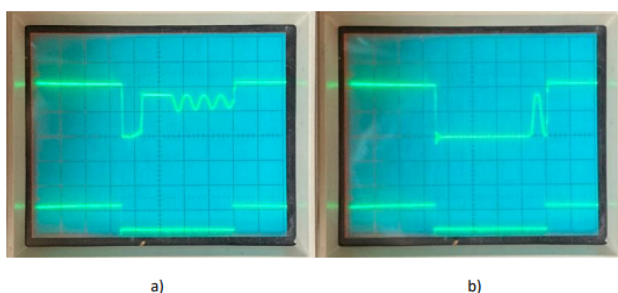


Obrázek 5.2: Blokový diagram algoritmu MPPT

Pokud bude změna výkonu menší než dvě desetiny watu, vyhodnotí algoritmus, že bylo nalezeno maximum, případně pokud MPPT algoritmus pětkrát po sobě změní směr, bude vyhodnoceno, že měnič kmitá kolem maxima. Funkce MPPT bude aktivní, pokud bude připojena zátěž, případně pro 1 fázi nabíjecího cyklu baterií, kdy jsou baterie dobíjeny konstantním proudem a napětí na nich postupně roste. V případě že budou baterie nabitě na 13,8V, bude MPPT algoritmus vyměněn algoritmem konstantního napětí tak, aby baterie nebyly přebíjeny.

5.3 Algoritmus konstantního napětí

Algoritmus konstantního napětí bude mít počátek střídavy vždy v 0. Následně pak zvýšením střídavy zvyšuje napětí na akumulátorech až do určité předem nastavené úrovně, kterou jsem zvolil jako 13,7 V. Tedy střední hodnotu rozsahu maximálního nabíjecího napětí, který je 13,6-13,8 V. Pokud je dosaženo napětí na výstupu změnou střídavy měniče, bude tato střída držena, dokud se napětí na výstupu nezvětší. Pokud se napětí na výstupu zvětší na mez 13,8V, měnič vypne a tento algoritmus bude opakován. Výstupní napětí nelze přesně vypočítat dle vztahu 2.3 z teoretického úvodu, protože tento vztah platí pouze, když je odebíraný proud zátěží dostatečně veliký. Pro proudy, které nejsou dostatečně velké, aby otočily polaritu na cívce po celou dobu vypnutého tranzistoru, nebude vztah z teoretické části platit. Na obrázku 5.3 jsou vyobrazeny průběhy na Shottky diodě při odebíraném nízkém a velkém výstupním proudy, kde horní průběh je napětí na Shottky diodě a spodní průběh je řídicí signál. Střída řídicího signálu 0,5. a) malý výstupní proud b) větší výstupní proud.



Obrázek 5.3: Průběh napětí na Shottky diodě

Pro horní průběh bylo měřítko 10 V/díl a spodní řídicí průběh 5 V/díl, s časovou základnou 2 μs /díl pro oba případy. Při malých proudcích není Shottky dioda otevřena celou dobu T_2 a při střídě $D=0,5$ je výstupní napětí vyšší než odpovídá lineárnímu vztahu $U_{vst} \cdot D$ viz obr. 5.3 a) v případě dostatečného proudu zátěží se pak čas průběhu napětí na Shottkyho diodě blíží obdélníku s odpovídající střídou $D=0,5$ viz obr. 5.3 b). Pokud je Shottky dioda otevřena v čase T_2 , cívkou protéká proud a měnič se nachází v takzvaném spojitým režimu. Pokud bude Shottky dioda v čase T_2 zavřena cívkou neprochází proud a na diodě se objeví rezonanční zákmity, měnič se nachází v nespojitým režimu.



Obrázek 5.4: Vstupní a výstupní napětí snižujícího měniče

Na obrázku 5.4 je vyfocené vstupní a výstupní napětí pro použitou zátěž z případu b) z obrázku 5.3. a vstupní napětí 16 V, levý multimetr vstupní napětí, pravý multimetr výstupní napětí.

Protože nabíjecí proud akumulátoru při nabíjení neustále nelineárně klesá, rozhodl jsem se držet výstupní napětí na akumulátoru výše zmíněným způsobem, který ochrání baterii vůči přepětí.

5.4 Uživatelské rozhraní

Uživatelské rozhraní snižujícího MPPT měniče bude tvořeno dvěma LED diodami, LCD displejem a tlačítkem pro přepínání informací na displeji.

Pro komunikaci mezi mikrokontrolérem a LCD displejem jsem použil knihovnu LiquidCrystal-I2C.h, která po počáteční inicializaci displeje, následně dokáže komunikovat s LCD displejem jednoduše pomocí příkazů `lcd.setCursor()`, nastaví kurzor displeje na určitou pozici, `lcd.print()`; vypíše obsah funkce na displej, počáteční znak začíná na kurzoru, `lcd.clear()`; vyčistí obsah displeje.

Pro použití tlačítka využívám hardwarové přerušení, kdy indikuju změnu stavu na tlačítkovém pinu z horního do spodního. Následně pak určím informaci která bude zobrazována.

LED indikátory stavu jsem použil takové, aby bylo jasné, zda měnič pracuje či nikoli. Červená LED indikuje že měnič je připravený, ale na vstupu není dostatečné napětí aby začal pracovat. Zelená LED indikuje, že měnič je v aktivním režimu a na výstup dodává energii.

Informace zobrazované displejem:

- Aktuální vstupní výkon
- Aktuální napětí na panelu
- Maximální dosažený výkon
- Aktuální střída
- Aktuální napětí na výstupu měniče
- Aktuální výstupní proud měniče
- Aktuální výstupní výkon
- Aktuální režim měniče

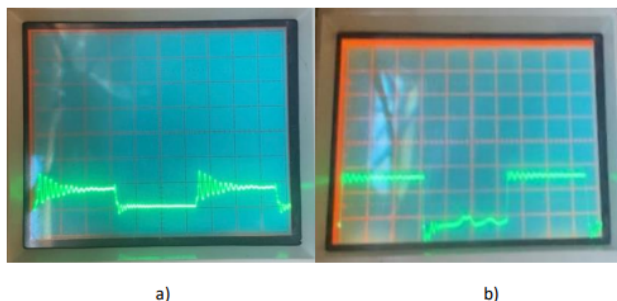
Kompletní kód je uveden v příloze G.

Kapitola 6

Měření

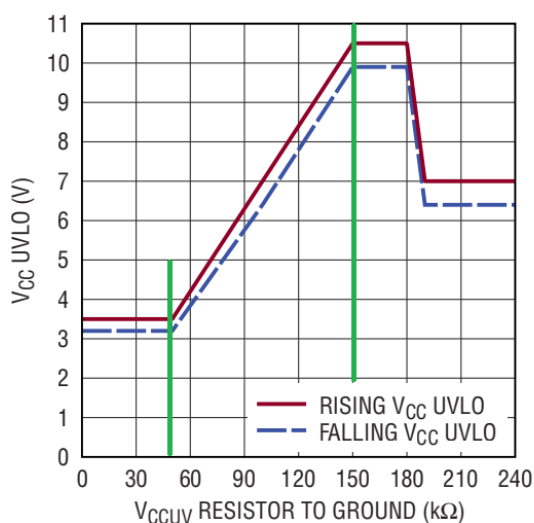
V kapitole měření uvádím veškerá provedená měření a problémy při oživování snižujícího měniče.

Při prvních pokusech o oživení budiče spínacího tranzistoru jsem používal pro dobíjení nábojové pumpy Shottky diodu. Zjistil jsem, že napětí na nábojové pumpě zakmitávalo a při vyšších budících napětích mělo za následek vyhoření budiče. Shottky diodu jsem pak následně vyměnil za síťovou diodu, která má lepší parametry zpětného proudu v závěrném směru. Zakmitávání na nábojové pumpě se výrazně zmenšilo. Porovnání budiče s Shottky diodou a síťovou usměrňovací diodou uvádím na obrázku 6.1. V konečném zapojení jsem použil diodu FDH333TR s velmi nízkým zpětným proudem.



Obrázek 6.1: Průběh napětí na nábojové pumpě. Střída řídicího signálu 0,5. a) použití Shottky diody b) použití síťové diody

Měřítka osciloskopu pro případ a) 10 V/díl, pro případ b) 5 V/díl, s časovou základnou 2 μ s/díl pro oba případy. Následně při zavedení ochrany podpětí na pinu Vcc, připojením odporu mezi piny Vccuv a zem, jsem při použití 160 k Ω odporu měl potíže, že budič nebudil vůbec. Šlo o špatné pochopení datasheetu a rozsah mezi hodnotami nebyl volitelný v celém rozsahu grafu, ale pouze v rozsahu odporů 50-150 k Ω viz obr. 6.2. Ochranu podpětí na pinu VCC jsem následně připojil na zem, a tím podpětíovou ochranu na pinu VCCUV, tak nastavil na hodnotu 3,5 V.



Obrázek 6.2: Graf V_{CCUV} uváděný výrobcem se zeleně vyznačeným rozsahem hodnot odporů pro nastavení UVLO [15]

Po těchto úpravách byl budič již ve funkčním stavu. Pro připojení odporové zátěže větší než 1Ω na výstup měniče, byla funkce měniče správná. Při připojení vyšší zátěže, tedy odporovu menšího než 1Ω na výstup měniče, nastal periodický problém vypínání a zapínání budiče v periodických cyklech. Problém byl v tom, že kapacitor na pinu V_{CC} se nestíhal dobíjet a napětí na něm postupně klesalo. Toto jsem vyřešil výměnou použitého elektrolytického kapacitoru za keramický kapacitor o velikosti $10 \mu F$.

6.1 Měření charakteristik snižujícího měniče

Charakteristiky snižujícího měniče jsem měřil ve školní laboratoři pomocí laboratorního zdroje KEITHLEY 2231A-30-3, který umožňuje napěťový rozsah 0-30 V do výstupního proudu 3 A s nastavitelnou proudovou pojistkou. Snižující měnič jsem měřil při napětí 15 V pro odporové zátěže 2Ω a 50Ω , které jsem měl k dispozici. Naměřené hodnoty viz tabulky 6.1, 6.2 .

Tabulka 6.1: Měření při odporové zátěži 2Ω

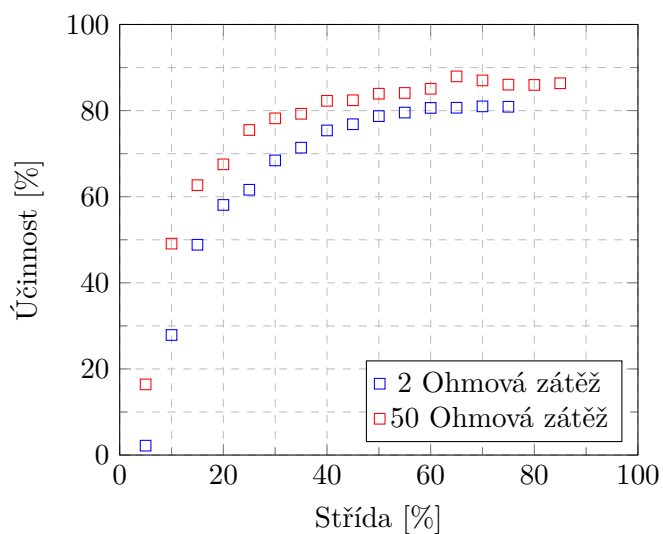
D [%]	I_{IN} [A]	I_{OUT} [A]	U_{IN} [V]	U_{OUT} [V]	P_{IN} [W]	P_{OUT} [W]	Účinnost [%]
5,00	0,04	0,17	15,00	0,07	0,54	0,01	2,18
10,00	0,08	0,45	15,00	0,70	1,13	0,31	27,88
15,00	0,15	0,77	15,00	1,45	2,30	1,12	48,84
20,00	0,24	1,04	15,00	2,04	3,65	2,12	58,09
25,00	0,34	1,27	15,00	2,50	5,15	3,17	61,61
30,00	0,49	1,56	15,00	3,25	7,40	5,06	68,43
35,00	0,67	1,85	15,00	3,90	10,10	7,21	71,39
40,00	0,88	2,14	15,00	4,65	13,20	9,95	75,39
45,00	1,11	2,42	15,00	5,30	16,70	12,83	76,83
50,00	1,37	2,70	15,00	6,00	20,58	16,20	78,72
55,00	1,66	2,98	15,00	6,63	24,84	19,76	79,54
60,00	1,96	3,25	15,00	7,30	29,43	23,73	80,62
65,00	2,31	3,53	15,00	7,90	34,58	27,89	80,66
70,00	2,65	3,78	15,00	8,50	39,68	32,13	80,98
75,00	3,00	4,00	15,00	9,10	45,00	36,40	80,89

Proudová pojistka zdroje \rightarrow nad 3 A**Tabulka 6.2:** Měření při odporové zátěži 50Ω

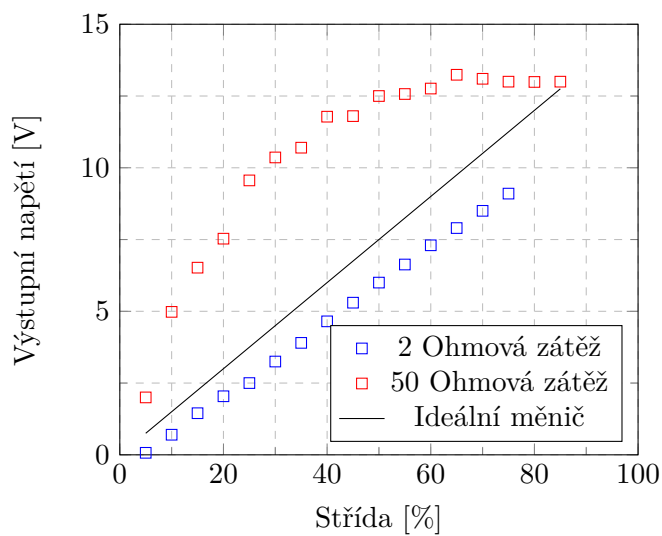
D [%]	I_{IN} [A]	I_{OUT} [A]	U_{IN} [V]	U_{OUT} [V]	P_{IN} [W]	P_{OUT} [W]	Účinnost [%]
5,00	0,04	0,05	15,00	2,00	0,59	0,10	16,41
10,00	0,07	0,11	15,00	4,98	1,07	0,52	49,10
15,00	0,10	0,14	15,00	6,52	1,43	0,89	62,68
20,00	0,12	0,16	15,00	7,53	1,74	1,17	67,51
25,00	0,17	0,20	15,00	9,56	2,52	1,90	75,49
30,00	0,19	0,21	15,00	10,36	2,84	2,22	78,20
35,00	0,20	0,22	15,00	10,70	2,97	2,35	79,26
40,00	0,23	0,24	15,00	11,78	3,47	2,85	82,27
45,00	0,23	0,24	15,00	11,80	3,48	2,87	82,40
50,00	0,26	0,26	15,00	12,50	3,84	3,22	83,92
55,00	0,26	0,26	15,00	12,57	3,87	3,25	84,10
60,00	0,26	0,26	15,00	12,76	3,95	3,36	85,07
65,00	0,27	0,27	15,00	13,24	4,11	3,61	87,94
70,00	0,27	0,27	15,00	13,10	4,08	3,55	87,01
75,00	0,27	0,27	15,00	13,00	4,07	3,50	86,03
80,00	0,27	0,27	15,00	12,99	4,04	3,47	85,96
85,00	0,27	0,27	15,00	13,00	4,05	3,50	86,35

Naměřené hodnoty vynesené do grafu

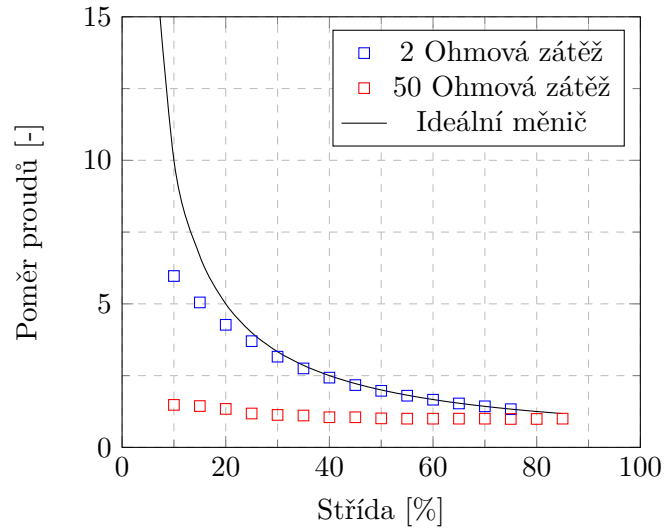
Účinnost snižujícího měniče v závislosti na použité střídě



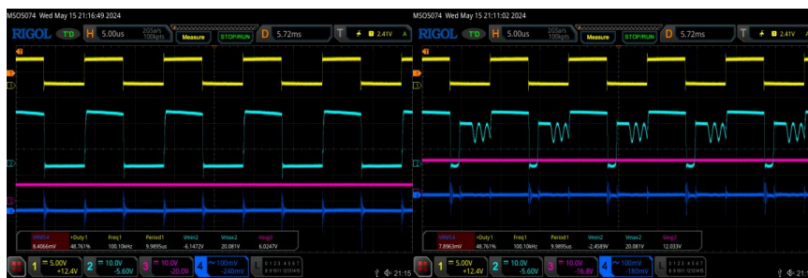
Vztah výstupního napětí snižujícího měniče na použité střídě



Vztah poměru výstupního ku vstupnímu proudu snižujícího měniče na použité střídě



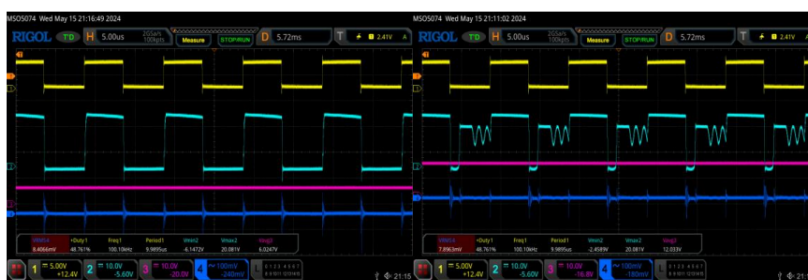
Záznam z osciloskopu viz obr.6.3 a 6.4.



a)

b)

Obrázek 6.3: Měření snižujícího měniče, střída 50%. a) odporová zátěž 2Ω a b) odporová zátěž 50Ω



a)

b)

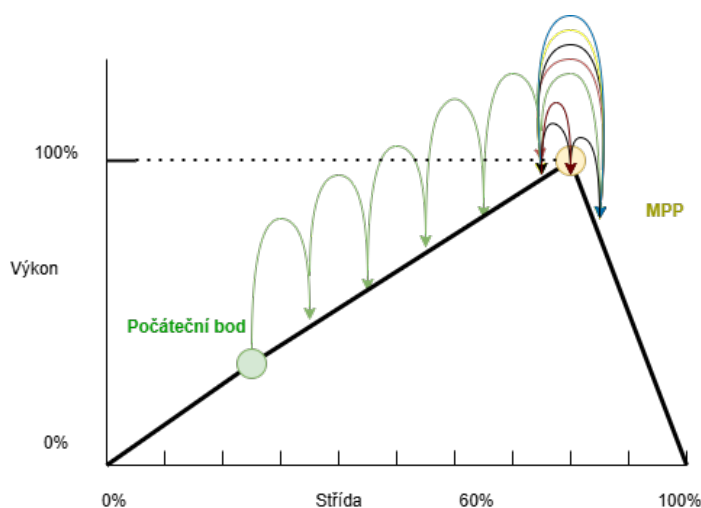
Obrázek 6.4: Měření snižujícího měniče, střída 30%. a) odporová zátěž 2Ω a b) odporová zátěž 50Ω

Kde žlutý průběh je PWM řídicí signál, světlemodrý je napětí na gate svorce tranzistoru, fialový je výstupní signál v DC režimu a tmavě modrý je zvlnění na výstupním signálu v AC režimu. Horizontální měřítko $5 \mu\text{s}/\text{díl}$.

6.2 Měření algoritmu MPPT

Ověření algoritmu MPPT jsem nasimuloval na laboratorním zdroji nastaveném proudové pojistky. Bod maximálního výkonu se tedy bude nacházet v bodě, kdy začne zabírat proudová pojistka. Napětí na laboratorním zdroji jsem nastavil na 16 V a proudovou pojistku pro první měření na 1 A. Průběh algoritmu jsem pomocí sériové linky sledoval na PC.

Při tomto nízkém výkonu nastal problém, že při změně střídny o dvě tisíce hrála velkou roli náhodná složka měření a program měl tendenci se zacyklit v jednom místě. Pro omezení této náhodné chyby jsem navrhl a realizoval řešení, kdy algoritmus MPPT bude rozlišovat čtyři velikosti změny střídny (10%, 5%, 1%, 0,1%). Tyto velikosti změn se zmenší vždy, když algoritmus vyhodnotí, že našel maximum. Princip návrhu vylepšení algoritmu viz obr. 6.5.



Obrázek 6.5: Princip vylepšeného MPPT algoritmu

Tento algoritmus bude mít pomalejší dohledání přesného bodu maximálního výkonu, ale bude odolnější proti náhodným chybám a oscilacím mimo MPP. Zároveň vždy se bude nacházet kolem MPP díky své první rychlé smyčce.

Následně byl algoritmus schopný dohledat maximální bod výkonu tedy bod kdy začala působit proudová pojistka zdroje. Na laboratorním zdroji jsem pak zvedal proudovou pojistku, abych ověřil funkčnost algoritmu při zvyšujícím se bodu maximálního výkonu. Použitý laboratorní zdroj má vlastnost, že při některých hodnotách proudové pojistky neudrží na výstupu konstantní napětí z důvodu přepínání vnitřních rozsahů zdroje a výstupní napětí zdroje se sníží, tím je snížen i vstupní výkon dodávaný do měniče. Měnič byl schopný dohledat i tyto body MPP, které neležely přímo nahodnotách proudové pojistky.

■ Fotodokumentace



Obrázek 6.6: Fotodokumentace měření 1



Obrázek 6.7: Fotodokumentace měření 2

Kapitola 7

Závěr

Ve své bakalářské práci jsem se seznámil s metodami sledování maximálního výkonového bodu MPPT fotovoltaického panelu a jejich využití k řízení výkonu solárních panelů pomocí MPPT měničů. Na základě získaných informací jsem vytvořil hybridní algoritmus, využívající pevnou střídu a metodu Perturb & Observe k řízení snižujícího měniče. Dále jsem podle požadavků na solární systém s FV panelem o nominální hodnotě 500 W navrhl a realizoval systém se snižujícím měničem pro dobíjení akumulátorů ručního náradí, který ke své činnosti právě využívá navržený hybridní algoritmus MPPT. Vzhledem k finanční náročnosti celého systému jsem realizoval funkční vzorek snižujícího měniče, řízeného navrženým algoritmem MPPT implementovaným v mikrokontroléru ATmega328P na kmitočtu 100kHz, bez vybraného solárního panelu a systémových baterií. Funkční vzorek jsem testoval ve školní laboratoři pomocí dostupného laboratorního zdroje KEITHLEY 2231A-30-3. Na tomto zdroji jsem ověřil funkčnost snižujícího měniče, který dosahoval účinnosti až 87 % a algoritmu MPPT, který dovedl spolehlivě dohledat bod maximálního výkonu.

Při oživování snižujícího měniče jsem měl počáteční problémy s použitou nábojovou pumpou v integrovaném budiči, která již není schopna pracovat na poměrně vysokém zvoleném kmitočtu 100kHz a dle doporučení výrobce budiče je nutné jí doplnit externí nábojovou pumpou. Zde ovšem velmi záleží na výběru vhodné diody, která musí být rychlá, ale zároveň musí být velmi kvalitní v závěrném směru. Použitá Shottky dioda na této pozici se jevila jako nevhodná vzhledem k relativně velkému proudu v závěrném směru a způsobovala nespolehlivou činnost měniče.

Snižující měnič pro FV systém pro nabíjení až 4 baterií ručního náradí pomocí originálních nabíječek potřebuje pro spolehlivou funkci řadu ochran. FV panel není stabilním zdrojem a jeho vlastnosti jsou dané intenzitou jeho osvětlení. Je třeba řešit ochrany systému proti přepětí, podpětí nadproudu i zpětnému proudu a to tak, aby se zbytečně nesnižovala účinnost systému. Původně jsem použil k buzení spínacího tranzistoru budič LTC 7004, který ovšem řadu ochran nemá a bylo by je nutné řešit externě nebo pomocí SW. Proto jsem nakonec použil integrovaný budič typu LTC 7003, který obsahuje

všechny uvedené ochrany. Jejich správné nastavení vzhledem k požadované funkci systému je také součástí této práce. Vzhledem k funkci ochran, které jsou v daném budiči řešeny na vysokých impedancích, je velmi důležité správné navržení tištěného spoje, kde jsou obvody ochran co nejdále od smyček s vysokým pulzním proudem. Toto bylo také problematické při ožívování vzorku snižujícího měniče a řešila to až verze DPS uvedená v příloze F.

Z naměřených výsledků funkčního vzorku vyplývají očekávané vlastnosti systému. Navržený algoritmus MPPT byl schopen vyhledat bod nejvyššího výkonu FV panelu (simulovaného laboratorním zdrojem) a nastavit řízení snižujícího měniče do tohoto bodu. Měnič dobře fungoval v rozsahu střídy PWM od 30 % a dosahoval dobré účinnosti 70 – 87 %.

Součástí měření bylo i ověření ochran podpětí, přepětí a zpětného proudu. Funkce ochrany proti nadproudu nemohla být ověřena vzhledem k parametrům simulačního zdroje.

Při malých výkonech dosažených laboratorním zdrojem měla na funkčnost systému velký vliv náhodná složka měření proudových sensorů, která byla v řádu jednotek mV, ale ve výsledku měla za následek chybu měření v řádu desetin A a systém měl tendenci při malé změně střídy nacházet falešné body maximálního výkonu. Z tohoto důvodu jsem původní navržený algoritmus upravil tak, aby byl proti těmto rušivým jevům odolnější. Mnou použité Hallovy senzory proudu nejsou vhodné pro měření malých proudů.

Pro budoucí realizaci bych navrhl následující:

- Návrh desky plošných spojů vytvořit tak, aby bylo možné připojit k ní přímo řídicí mikrokontrolér a vyvarovat se zbytečně dlouhým přívodním vodičům, které u spínaných zdrojů mohou znamenat rušení a nepřesnosti měření.
- Pro dosažení lepší účinnosti snižujícího měniče by bylo možné vyměnit použitou Shottkyho diodu za MOSFET tranzistor a snížit tak napěťový úbytek a výkonovou ztrátu na této větvi.
- Ověřit funkci systému při maximálních provozních podmínkách tj. při MPP FV panelu při maximální intenzitě osvětlení a při maximálním provozním proudu.
- Zkompletovat navržený systém s vybraným FV panelem a systémovou baterií a provést měření v reálném prostředí.
- Vytvoření aplikace pro upozornění při dobití akumulátorů ručního náradí
- Zajímavé by bylo přidání statistických dat o přijatém a vydaném výkonu.



Literatura

- [1] Y. Chakraborty, A. Choudhury, P. Roy, D. K. Bhattacharjee, M. S. Al-Mamun, S. Kundu, G. Paul, M. R. Islam, M. A. R. Akash, *Design and Implementation of a Solar-Battery Hybrid Electric Vehicle Charging Station with Fast Charging Capability*, IEEE, 2021. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9761153>
- [2] MegaMarketTrade. (n.d.). Fotovoltaika. [Online] Dostupné z: <https://www.megamarkettrade.eu/fotovoltaika/>
- [3] FAHIM, Samuel R.; HASANIEN, Hany M.; TURKY, Rania A.; ALEEM, Shady H. E. Abdel a ČALASAN, Martin. A Comprehensive Review of Photovoltaic Modules Models and Algorithms Used in Parameter Extraction. *Energies* [online]. 2022, roč. 15, č. 23, ISSN 1996-1073. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/en15238941>.
- [4] Pasanen, J., Kutil, R., Weiss, J., Krajník, T., & Saska, M. (2015). *Autonomous Navigation for Flying Robots Using Range Measurements and GPS*. In 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (pp. 1776–1782). IEEE. http://pasan.feld.cvut.cz/a1b13svs/2015_svs3ab.pdf
- [5] Kai Chen, Shulin Tian, Yuhua Cheng, Senior Member, IEEE, and Libing Bai(2014). *An Improved MPPT Controller for Photovoltaic System Under Partial Shading Condition*. IEEE Transactions on Sustainable Energy (Volume: 5, Issue: 3, July 2014) <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6807815>
- [6] Stefan Moring, Anton Pols *Maximum Power Point Tracking: Algorithm and Software Development*. Delft University of Technology Faculty of EEMCS June 27, 2012) <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:ceb32d5b-985a-4684-ab14-84888f0b1b11?collection=education>
- [7] M. Hammami, G. Grandi, and M. Rudan, "RCC-MPPT algorithms for single-phase PV systems in case of multiple dc harmonics," in *2017 6th International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, IEEE,

- 2017, pp. 678-683. ISBN 978-1-5090-4682-9. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ICCEP.2017.8004763>.
- [8] M. Otsuki, T. Koike-Akino, Y. Kishiyama a T. Sugiyama, *Maximum Power Point Tracking (MPPT) Techniques for solar PV system under variable ambient conditions: A Review*, IEEE, 2023. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10236353>
- [9] A. Ali, K. Almutairi, S. Padmanaban, V. Tirth, S. Algarni *et al.*, "Investigation of MPPT Techniques Under Uniform and Non-Uniform Solar Irradiation Condition—A Retrospection," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 127368-127392, 2020. [Online]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3007710>
- [10] B. Guo, J. Jin, Y. Wang, H. Wang a Y. Wang, "A novel method for real-time facial expression recognition based on convolutional neural network," in *2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, 2015, s. 2009–2014. doi: 10.1109/ROBIO.2015.7419199. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7167963>
- [11] Hippo, *Elektronické obvody*, [Online], Dostupné z: <https://hippo.feld.cvut.cz/vyuka/soubory/ElektronickeObvody.pdf>
- [12] B. K. Padhi, S. N. Padhy, and K. C. Bhuyan, "Controller design for reduced order model of SEPIC converter," in *2016 International Conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPES)*, IEEE, 2016, pp. 1533-1538. ISBN 978-1-5090-4620-1. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/SCOPES.2016.7955696>. [cit. 2024-05-05].
- [13] Gazizov, Eldar. *Bakalářská práce Gazizov Eldar*. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, 2018. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/77413/F2-BP-2018-Gazizov-Eldar-Bakalarska_prace_Gazizov_Eldar.pdf
- [14] Abdelilah Hassoune, Mohamed Khafallah, Abdelouahed Mesbahi, Tarik Bouragba, *Experimental Analysis of Control in Electric Vehicle Charging Station Based Grid Tied Photovoltaic-Battery System*, *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 13, pp. 276–284, May 2019. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2702875>
- [15] LTC7003, *Fast 60V Protected High Side NMOS Static Switch Driver*, [Online], Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ltc7003.pdf>
- [16] AND9083/D, *MOSFET Gate-Charge Origin and its Applications*, [Online], Dostupné z: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/AND9083-D.PDF>
- [17] 3Roam, *CLC Filter Calculator*, [Online], Dostupné z: <https://3roam.com/clc-filter-calculator/>



Přílohy

Příloha A

Seznam zkratek

Zkratka	Význam
FV	Fotovoltaický
MPP	Bod nejvyššího výkonu
PWM	Pulzně šířková modulace
MPPT	Systém hledající bod maximálního výkonu
P&Q	Metoda posuvu a pozorování
INC	Metoda přírůstkové vodivosti
d	Derivace
∂	Parciální derivace
\ln	Přirozený logaritmus
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor
CS	Metoda rozmítání proudu
RC	Metoda korelovaného zvlnění
β	Beta metoda
CLS	Metoda lineárního rozmítání proudu
TWC	Metoda porovnání tří bodů
CV	Metoda konstantního napětí
PC	Metoda základního článku
LT	Metoda vyhledání v tabulce
AC	Střídavý proud
DC	Stejnoseměrný proud
Pb	Olovo
NiCd	Nikl-kadmium
NiMh	Nikl-metalhydrid
Li-Ion	Lithium-iont
Li-Pol	Lithium-polymer
UV	Podpětí
OVLO	Přepětí
CLC filtr	Pi člen složený z kapacitoru, induktoru, kapacitoru
PLA	Polylaktidová vlákna
PETG	Polyethylentereftalát s glykolem
ESR	Ekvivalentní sériový odpor

Příloha B

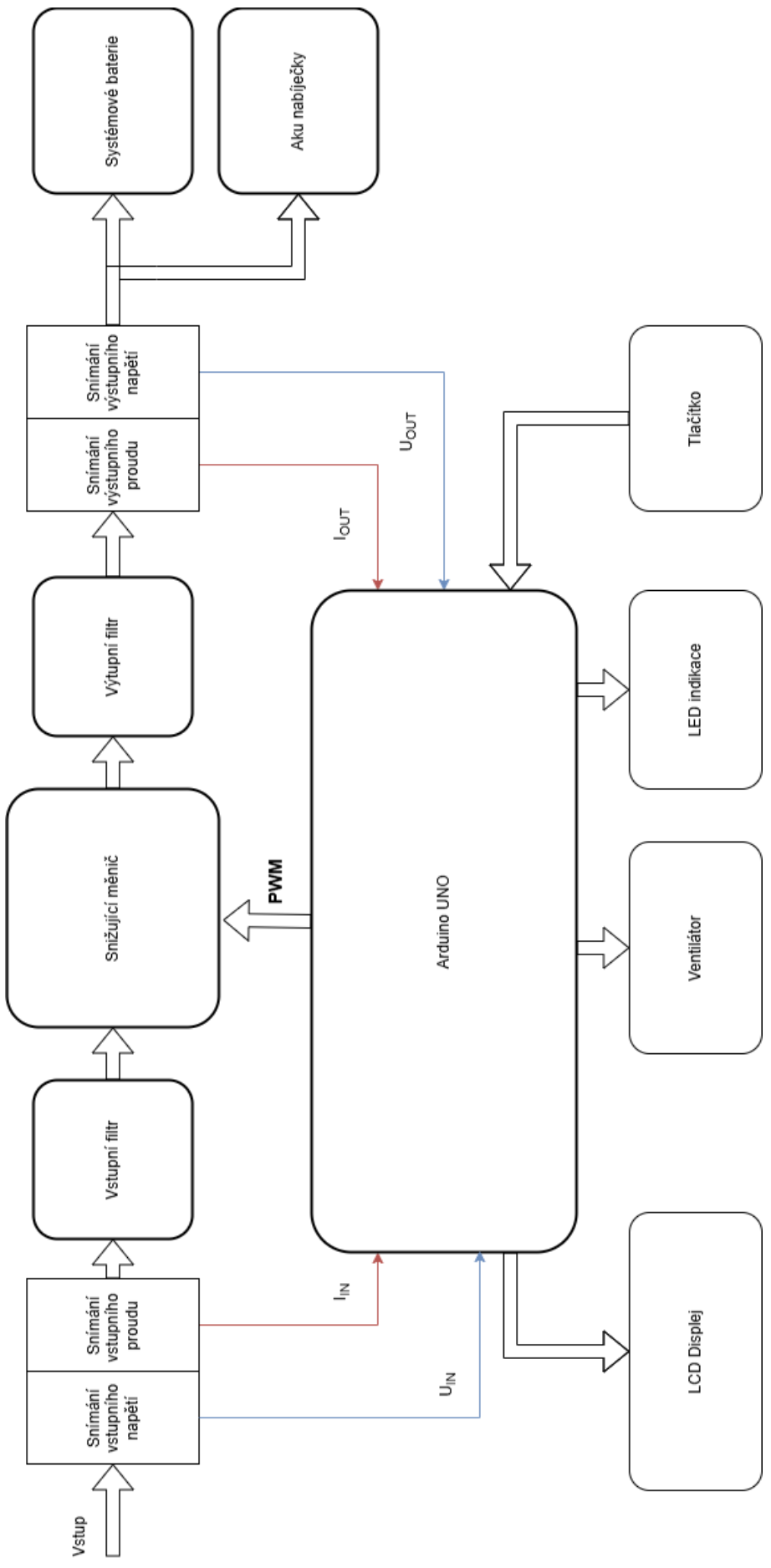
Symbols

Symbol	Význam	Rozměr
U	Elektrické napětí	V
I	Elektrický proud	A
I_{PV}	Generovaný proud FV článku	A
R_P	Paralelní odpor FV článku	Ω
R_S	Sériový odpor FV článku	Ω
I_S	Proud PN strukturou FV článku	A
I_{RP}	Proud parazitním paralelním odporem	A
T_{vs}	Teplota vnitřní struktury	K
T_{ref}	Teplota považovaná za referenční	K
K_I	Koeficient změny proudu na teplotě	A/K
I_{sc}	Zkrazový proud FV článku	A
G	Intenzita slunečního záření	W/m^2
G_{ref}	Referenční intenzita slunečního záření	W/m^2
U_t	Teplotní napětí	V
m	Faktor ideálnosti diody	-
V	Anglické označení veličiny napětí	V
C	Kapacita	F
L	Indukčnost	H
q	Elektrický náboj elektronu	C
η	Faktor kvality diody	-
k	Bolzanova konstanta	eV/K
f	Frekvence	Hz
f_{sw}	Spínací frekvence	Hz
T	Perioda	s
T_1	Doba sepnutého spínače	s
T_2	Doba rozepnutého spínače	s



Příloha C

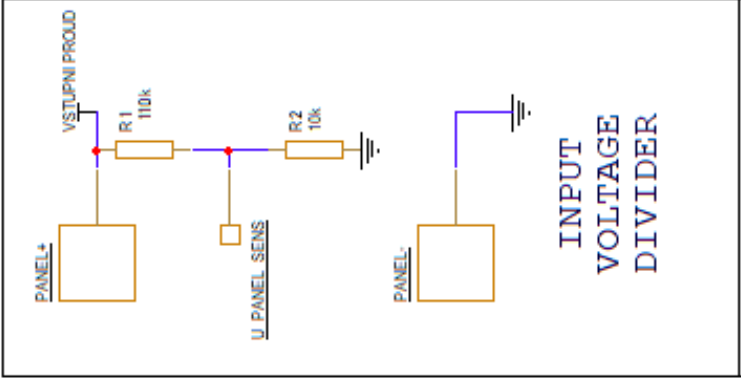
Blokové schéma



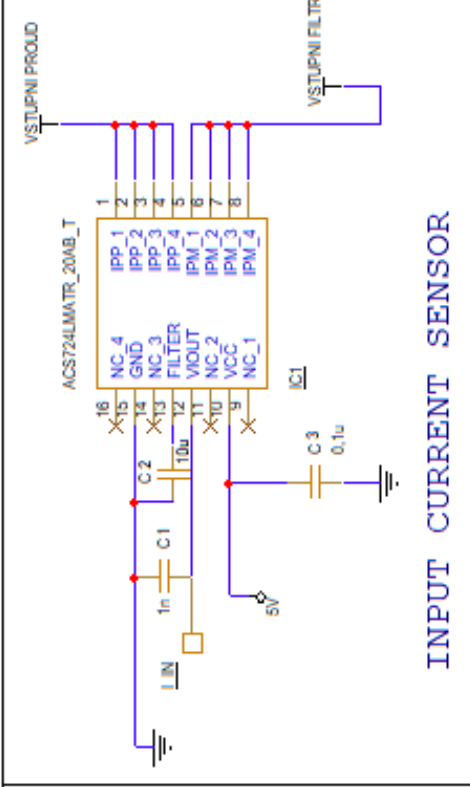


Příloha D

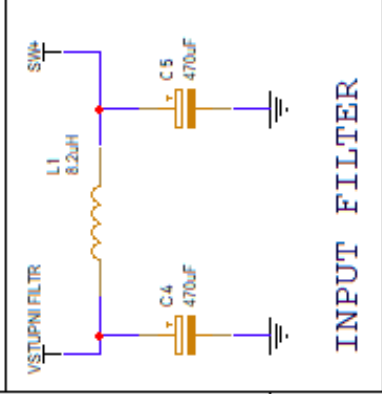
Schéma zapojení snižujícího měniče



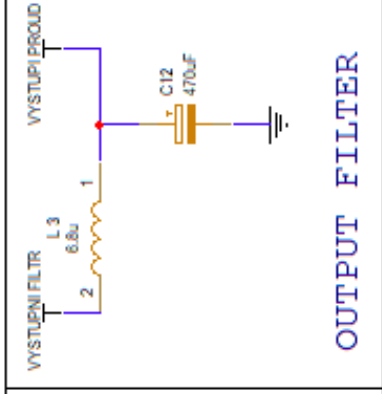
INPUT VOLTAGE DIVIDER



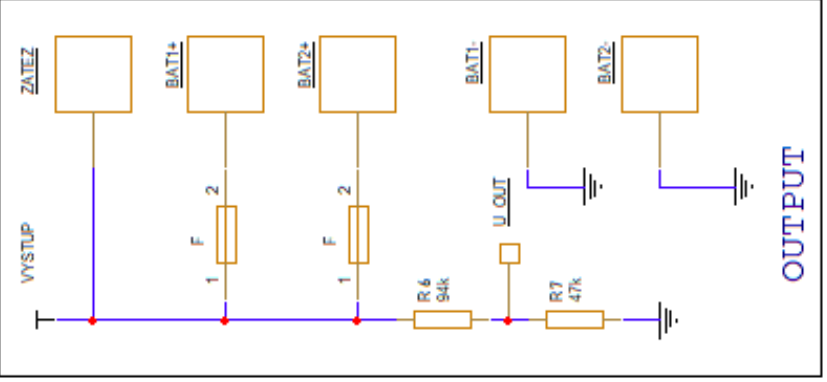
INPUT CURRENT SENSOR



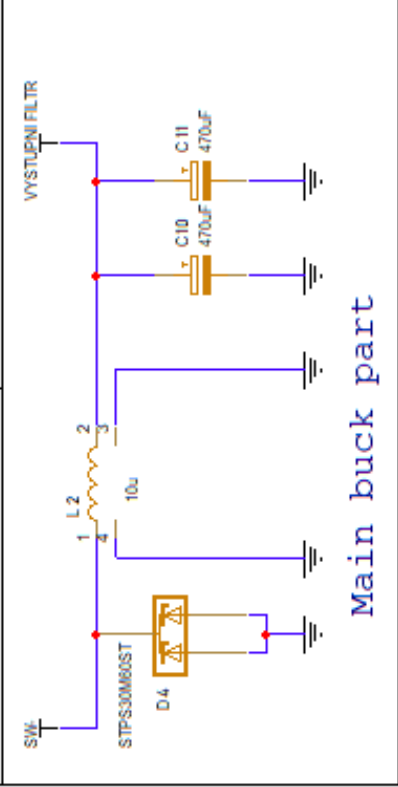
INPUT FILTER



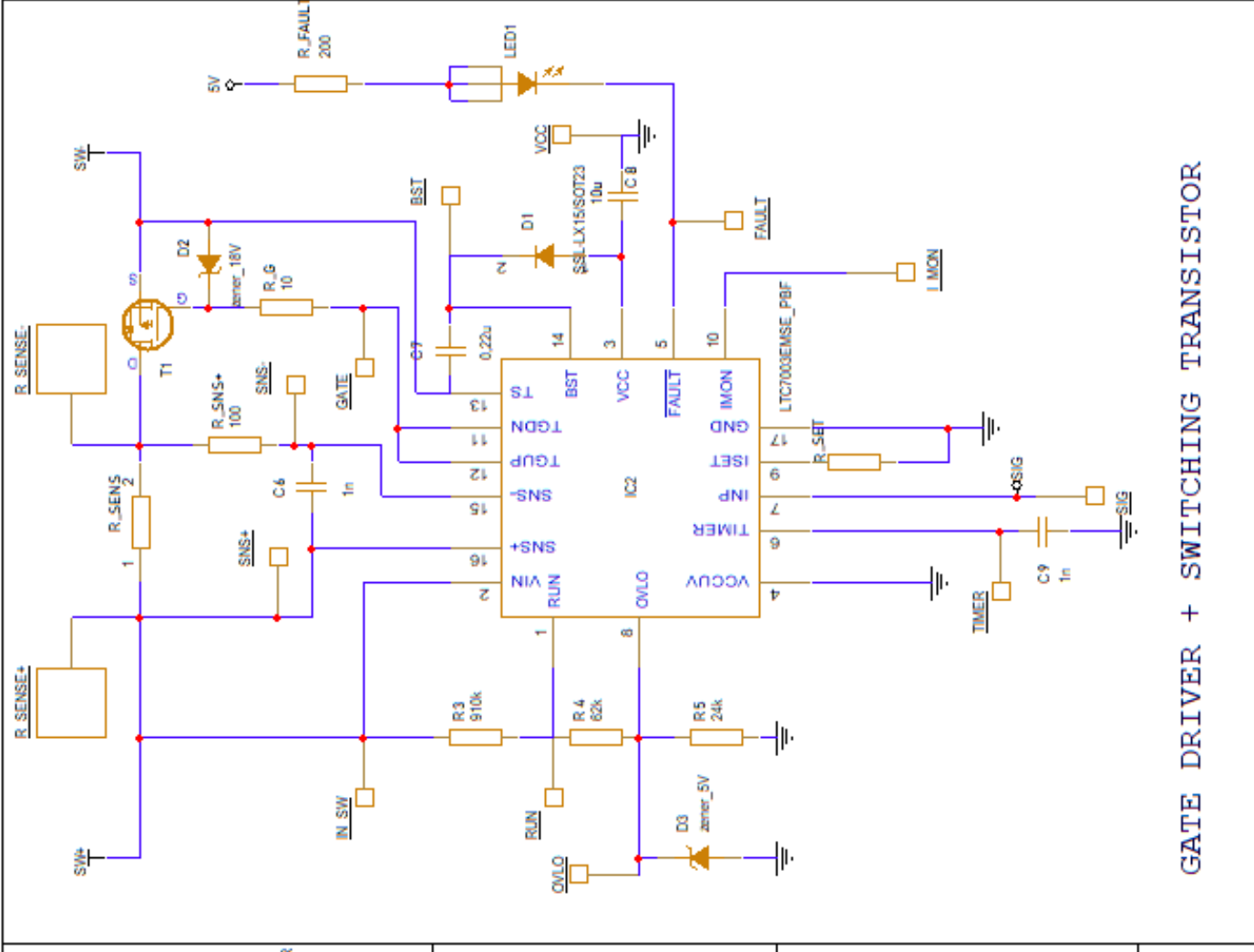
OUTPUT FILTER



OUTPUT



Main buck part



GATE DRIVER + SWITCHING TRANSISTOR

Title		STEP DOWN MPPT SOLAR	
Size	A4	Document Number	1
Date	Sunday, May 12, 2024	Sheet	1 of 1

Příloha E

Seznam použitých součástek

Tabulka E.1: Seznam součástek

Řízení	
Mikrokontrolér Ventilátor	Arduino UNO
Uživatelské rozhraní	
Displej	LCD1602
LED1	ASCQFR30-B2231R0R105
LED2	ASCQFG30-N1222G2G302
Tlačítko	WS-TASV SMT Tact Switch
Zátěž	
4x zásuvka	K3203

Tabulka E.2: Seznam součástek

Snižující měnič		
	Hodnota	Jednotka
R1	110 k	Ω
R2	10 k	Ω
R3	910 k	Ω
R4	62 k	Ω
R5	24 k	Ω
R_SENS	0,4 m	Ω
R_SNS+	100	Ω
R_UV	0	Ω
R_SET	44 k	Ω
R_G	10	Ω
R_FAULT	200	Ω
R6	94 k	Ω
R7	47 k	Ω
C1	10 n	F
C2	10 u	F
C3	0,1 u	F
C4	470 u	F
C5	470 u	F
C6	1 n	F
C7	0,22 u	F
C8	10 u	F
C9	1 n	F
C10	470 u	F
C11	470 u	F
C12	470 u	F
C13	1 n	F
C14	0,1 u	F
L1	8,2 u	H
L2	10 u	H
L3	6,8 u	H
IC1	ACS724LMATR_20AB_T	
IC2	LTC7003EMSE#PBF	
IC3	ACS37010LLZATR_050B5	
D1	FDH333TR	
D2	1N6006B	
D3	BZX 55/C 5V1	
D4	STPS30M60S	
T1	IPP019N06NF2S	

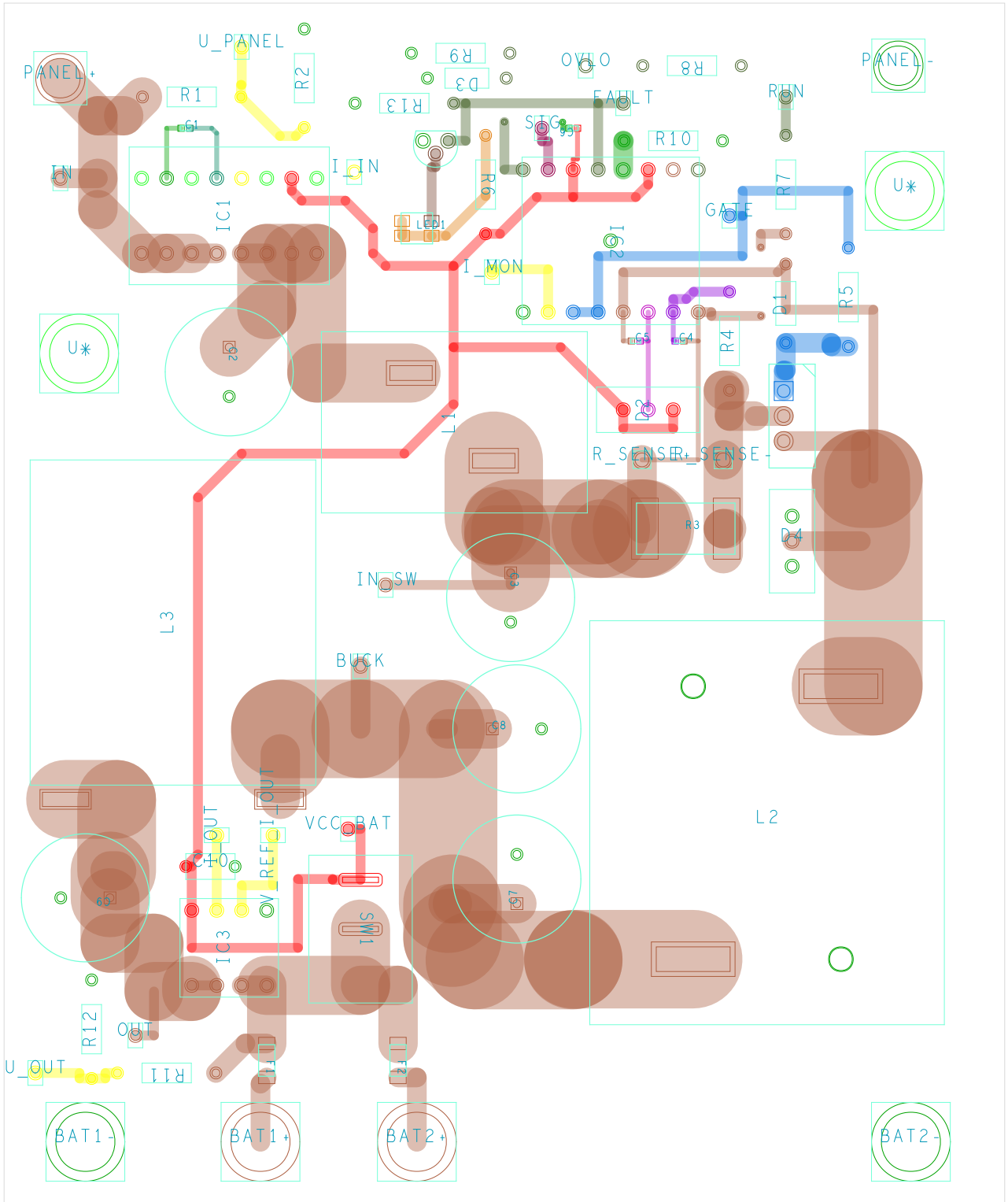


Příloha F

Deska plošných spojů

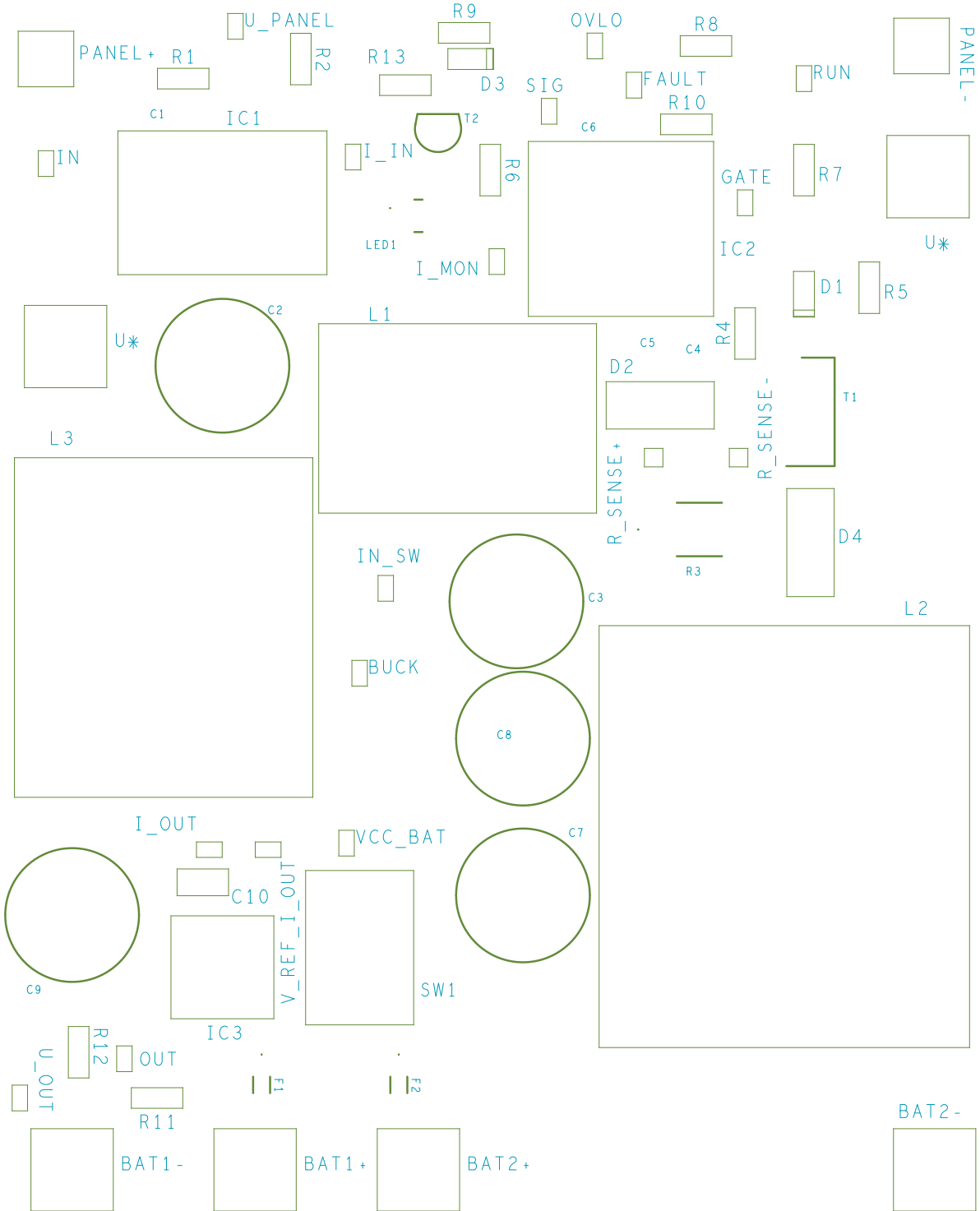
Deska plošných spojů kterou jsem si v rámci bakalářské práce nechal vyrobit v prototypové výrobě ve firmě Pragobord. Jedná se o první verzi, kterou jsem během měření upravil do výsledného zapojení viz příloha D.

ART FILM - TOP



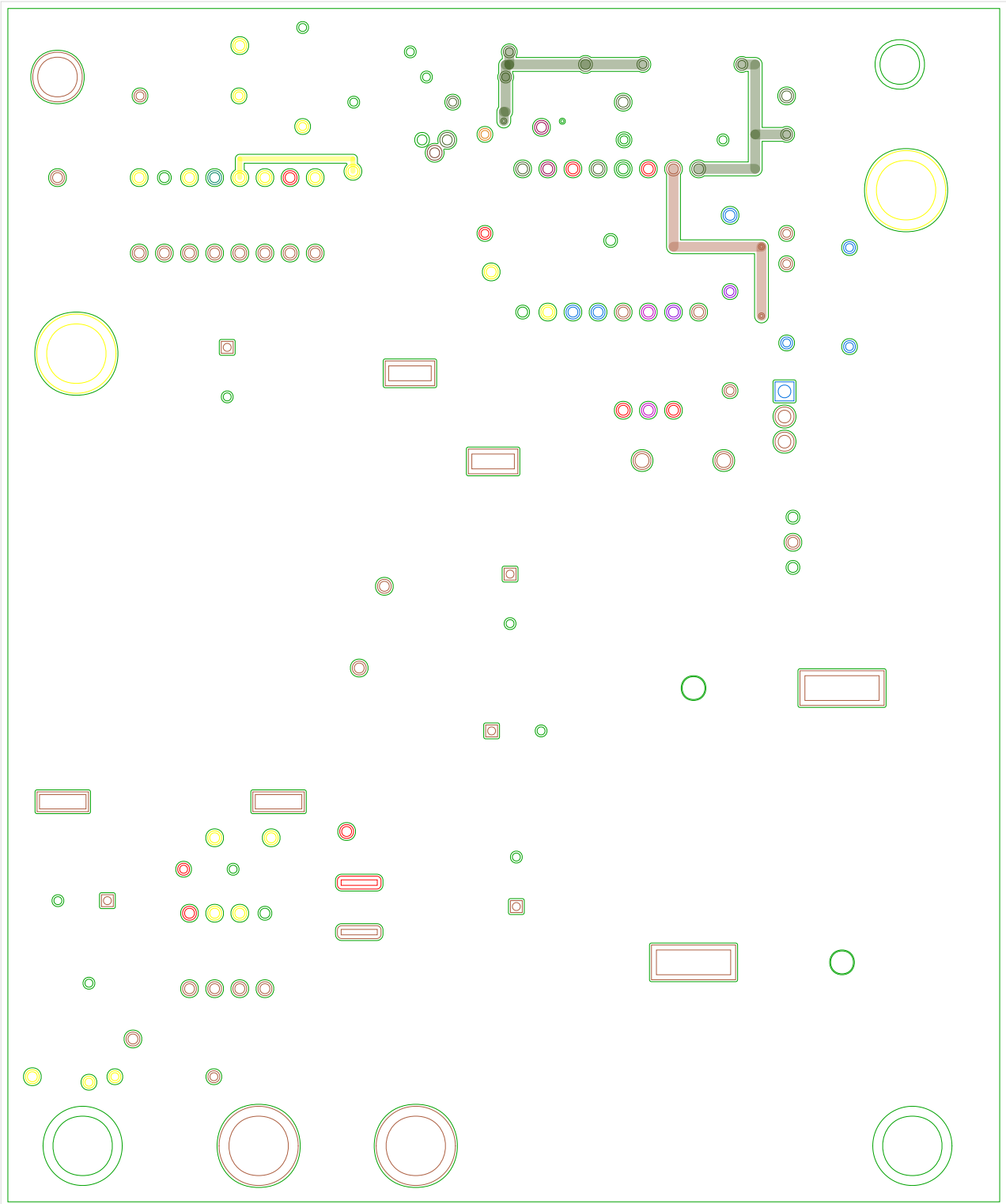
ART FILM - TOP

ART FILM - PLT



ART FILM - PLT

ART FILM - BOT



ART FILM - BOT

Příloha G

Použitý kód

```
#include <TimerOne.h>           //knihovna pro řízení PWM signálu
#include <Wire.h>                //knihovna pro komunikaci I2C
#include <LiquidCrystal_I2C.h>  // knihovna pro použití řadiče lcd s I2C sběrnicí

//_____Definice použitého LCD displeje_____

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);

//_____Definice jednotlivých pinů a neměnných proměnných_____

#define PWM_PIN 9
#define PWM_FREQ 100000 // 100 kHz
#define PANEL_U A0
#define PANEL_I A1
#define OUT_U A2
#define OUT_I A3
#define RED_LED 12
#define GREEN_LED 13
#define TURBINE 10
#define BUTTON 2
#define Vcc_5V 7

//_____Nastavení globálních proměnných_____

float act_D = 0; //aktuální střída
int MPPT_counter = 0;
float Power[2] = { 0, 0 }; //pole pro ukládání výkonů, předešlého a aktuálního
float U_Panel = 0;
float I_Panel = 0;
float U_Bat = 0;
float I_Bat = 0;
int k[2] = { 1, 0 };
int citac_zmen = 0;
int BAT_counter = 0;
```

```
float P_Out = 0;
int stav = 0;
int zobrazeniDispleje = 0;
int citac_hl_cyklu = 0;
float prev_stav = 0;
float P_max = 0;
int krok = 0;
float prirustek = 0.1;

volatile int buttonState = HIGH; // Nastaví výchozí stav tlačítka jako HIGH

//_____Struktura pro inicializaci MPPT algoritmu_____

struct setup_MPPT {
private:
    float D = 0.35;
    float P = 0;
public:
    void assign_D(float new_D) {
        D = new_D;
    }

    void assign_P(float new_P) {
        P = new_P;
    }

    float get_D() {
        return D;
    }
    float get_P() {
        return P;
    }
};

//_____Definice HW přerušení při zmáčknutí tlačítka_____

void buttonInterrupt() {
    // Čtení stavu tlačítka pouze při přerušení
    citac_hl_cyklu = 0;
    buttonState = digitalRead(BUTTON);
    zobrazeniDispleje++;
    if (zobrazeniDispleje > 8) {
        zobrazeniDispleje = 1;
    }
}
```

```
//-----Prvotní nastavení Arduina UNA-----

void setup() {
  //-----Nastavení funkcí jednotlivých pinů-----
  pinMode(PWM_PIN, OUTPUT);
  pinMode(RED_LED, OUTPUT);
  pinMode(GREEN_LED, OUTPUT);
  pinMode(TURBINE, OUTPUT);
  pinMode(BUTTON, INPUT_PULLUP);
  pinMode(Vcc_5V, OUTPUT);
  digitalWrite(Vcc_5V, HIGH); //zapne na pinu sedm 5 voltů napájecí napětí pro sensory
  //-----Přiřazení HW přerušení k tlačítku-----
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(BUTTON), buttonInterrupt, FALLING);
  //-----Inicializace PWM-----
  Timer1.initialize(1000000 / PWM_FREQ); // Frekvence PWM v mikrosekundách
  Timer1.pwm(PWM_PIN, act_D); // Počáteční délka pulzu nastavena na 0
  Wire.begin(); // Inicializace I2C komunikace
  //-----Inicializace displeje-----
  lcd.begin();
  lcd.backlight();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Inicializace");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("provedena");
  delay(2500);
  lcd.clear();
}

void loop() {
  setup_MPPT init;
  while (1) {

    //přečte vstupní hodnotu napětí v rozsahu od a přiřadí ji rozsah od 0-55V
    U_Panel = map(analogRead(PANEL_U), 0, 1023, 0, 55000) / 1000.0;
    if (U_Panel > 14)
      //Pokud je napětí na panelu větší než 14V začíná měnič pracovat
      {
        digitalWrite(RED_LED, LOW);
        digitalWrite(GREEN_LED, HIGH);
        //přečte napětí na připojených bateriích a přiřadí jej k rozsahu 0-15V
        U_Bat = map(analogRead(OUT_U), 0, 1023, 0, 15000) / 1000.0;
        if (U_Bat < 13.6)

```

```
//Pokud je napětí na bateriích nižší než 13.6V bude menič pracovat
v režimu MPPT
{
  stav = 1; // stav MPPT algoritmu
  BAT_counter = 0;
  if (MPPT_counter == 0)
  //pokud je první běh MPPT algoritmu, načte se inicializační střída
  {
    krok = 0;
    Timer1.setPwmDuty(PWM_PIN, (int)(init.get_D() * 1023));
    delay(20);
    k[1] = k[0];
    U_Panel = map(analogRead(PANEL_U), 0, 1023, 0, 55000) / 1000.0;
    I_Panel = map(analogRead(PANEL_I), 0, 1023, -20000, 20000) / 1000.0;
    I_Panel = I_Panel - map(447, 0, 1023, -20000, 20000) / 1000.0;
    //Odečtení offsetu senzoru zjištěného při prvním zapojení
    if (I_Panel < 0) {
      I_Panel = 0;
    }
    Power[0] = U_Panel * I_Panel;
    //vypočte první hodnotu výkonu a uloží ji do paměti
    act_D = init.get_D() + k[1] * prirustek;
    //zvětší hodnotu střídy o přírůstek
    Timer1.setPwmDuty(PWM_PIN, (int)(act_D * 1023));
    //nastaví novou hodnotu střídy
    delay(5);
    //algoritmus čeká aby se hodnota výstupního výkonu mohla ustálit
  }
  if (act_D >= 1 || act_D <= 0)
  // Ošetření stavu střídy, pokud by střída měla být vyšší než 1 nebo
  nižší než 0 nastaví střídu zpět na 50%
  {
    act_D = 0.5;
    k[1] = -k[0];
  }
  U_Panel = map(analogRead(PANEL_U), 0, 1023, 0, 55000) / 1000.0;
  I_Panel = map(analogRead(PANEL_I), 0, 1023, -20000, 20000) / 1000.0;
  I_Panel = I_Panel - map(447, 0, 1023, -20000, 20000) / 1000.0;
  //Odečtení offsetu senzoru zjištěného při prvním zapojení
  if (I_Panel < 0) {
    I_Panel = 0;
  }
  Power[1] = U_Panel * I_Panel;

  if (Power[0] < Power[1])
  //pak jde algoritmus MPPT na správnou stranu
```



```

{
  if (Power[1] - Power[0] < 0.2) //Program nalezl maximum
  {
    if (krok < 4) {
      krok++;
    } else {
      if (Power[1] > init.get_P())
        //Pokud je hodnota výkonu větší než zatím kterákoli byla, tak
        je uložena nová inicializační střída a hodnota výkonu
        {
          krok = 0;
          init.assign_P(Power[1]);
          init.assign_D(act_D);
          Power[0] = Power[1];
          delay(5000);
        } else {
          krok = 0;
          Power[0] = Power[1];
          delay(5000);
        }
      }
    }

  } else {
    k[1] = k[0];
    Power[0] = Power[1];
    act_D = act_D + k[1] * prirustek;
    //zvětší hodnotu střídy o aktuální přírůstek
    Timer1.setPwmDuty(PWM_PIN, (int)(act_D * 1023));
    //nastaví novou hodnotu střídy
    k[0] = k[1];
    delay(5); //čas pro ustálení
  }
} else //algoritmus MPPT jde na špatnou stranu
{
  k[1] = -k[0];
  //změní znaménko konstanty k
  act_D = act_D + 2 * k[1] * prirustek;
  //změní hodnotu střídy o přírůstek
  Timer1.setPwmDuty(PWM_PIN, (int)(act_D * 1023));
  k[0] = k[1];
  delay(5); //čas pro ustálení
}
if (k[0] != k[1]) {
  citac_zmen++;
} else {
  citac_zmen = 0;
}

```

```
}
if (citac_zmen == 5)
//5krát algoritmus zmenil svůj smer, osciluje tedy kolem maxima
výkonového bodu
{
  citac_zmen = 0;
  if (krok < 4) {
    krok++;
  } else {
    if (Power[1] > init.get_P())
//Pokud je hodnota výkonu větší než zatím kterákoli byla, tak
je uložena nová inicializační střída a hodnota výkonu
    {
      krok = 0;
      init.assign_P(Power[1]);
      init.assign_D(act_D);
      Power[0] = Power[1];
      delay(5000);
    } else {
      krok = 0;
      Power[0] = Power[1];
      delay(5000);
    }
  }
}
MPPT_counter++;
} else {
stav = 2; //stav konstantního napětí
MPPT_counter = 0;
if (BAT_counter == 0) {
  act_D = 0;
  do {
    act_D = act_D + 0.001;
    Timer1.setPwmDuty(PWM_PIN, (int)(act_D * 1023));
    delay(5);
    U_Bat = map(analogRead(OUT_U), 0, 1023, 0, 15000) / 1000.0;
  } while (U_Bat > 13.7);
} else {
U_Bat = map(analogRead(OUT_U), 0, 1023, 0, 15000) / 1000.0;
if (U_Bat > 13.75) {
  Timer1.setPwmDuty(PWM_PIN, 0); //vypne budič
} else {
  Timer1.setPwmDuty(PWM_PIN, (int)(act_D * 1023));
  delay(5);
}
}
}
```

```

        BAT_counter++;
    }
} else {
    stav = 3; // stav vypnutého budiče
    digitalWrite(RED_LED, HIGH);
    digitalWrite(GREEN_LED, LOW);
    Timer1.setPwmDuty(PWM_PIN, 0); //nastaví novou hodnotu střidy
    MPPT_counter = 0;
    citac_zmen = 0;
    BAT_counter = 0;
    act_D = 0;
    U_Bat = map(analogRead(OUT_U), 0, 1023, 0, 15000) / 1000.0;
    //přečte napětí na připojených bateriích a přiřadí jej k rozsahu 0-15V
}

I_Bat = map(analogRead(OUT_I), 0, 1023, -50000, 50000) / 1000.0;
I_Bat = I_Bat - map(538, 0, 1023, -50000, 50000) / 1000.0;
//Odečtení offsetu senzoru zjištěného při prvním zapojení

if ((stav == 3) || (I_Bat < 0)) {
    //Ošetření chybového snímání proudu při vypnutém stavu měniče
    I_Bat = 0;
    P_Out = 0;
} else {
    P_Out = U_Bat * I_Bat;
}

I_Panel = map(analogRead(PANEL_I), 0, 1023, -20000, 20000) / 1000.0;
I_Panel = I_Panel - map(447, 0, 1023, -20000, 20000) / 1000.0;

if ((stav == 3) || (I_Panel < 0.2)) {
    //Ošetření chybového snímání proudu při vypnutém stavu měniče
    I_Panel = 0;
    I_Bat = 0;
    Power[0] = 0;
} else {
    Power[0] = I_Panel * U_Panel;
}

//Zobrazovací část kódu

if (Power[0] > P_max) {
    P_max = Power[0];
}

if (citac_hl_cyklu == 0 || citac_hl_cyklu == 1)

```

```
//pokud je cyklus nebo dva po vyvolani hw interuptu
pak se vymaze obsah displeje
{
    lcd.clear();
}
if (citac_hl_cyklu % 90 == 0) {
    if (citac_hl_cyklu % 9000 == 0) {
        lcd.clear();
    }
    switch (zobrazeniDispleje) {
        case 0:
            lcd.setCursor(0, 0);
            lcd.print("Stisknete");
            lcd.setCursor(0, 1);
            lcd.print("tlacitko ----->");
            break;
        case 1:
            lcd.setCursor(0, 0);
            lcd.print("Vstupni vykon: ");
            lcd.setCursor(0, 1);
            lcd.print(Power[0]);
            lcd.print("W");
            break;
        case 2:
            lcd.setCursor(0, 0);
            lcd.print("Napeti na panelu: ");
            lcd.setCursor(0, 1);
            lcd.print(U_Panel);
            lcd.print("V");
            break;
        case 3:
            lcd.setCursor(0, 0);
            lcd.print("Max dos. vykon: ");
            lcd.setCursor(0, 1);
            lcd.print(P_max);
            lcd.print("W");
            break;
        case 4:
            lcd.setCursor(0, 0);
            lcd.print("STRIDA: ");
            lcd.print(act_D);
            break;
        case 5:
            lcd.setCursor(0, 0);
            lcd.print("Napeti na zatezi");
            lcd.setCursor(0, 1);
```

```

        lcd.print(U_Bat);
        lcd.print("V");
        break;
    case 6:
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("Proud zatezi");
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print(I_Bat);
        lcd.print("A");
        break;
    case 7:
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("Vystupni vykon: ");
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print(P_Out);
        lcd.print("W");
        break;
    case 8:
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("Pracovni rezim: ");
        lcd.setCursor(0, 1);
        if (prev_stav != stav) {
            lcd.clear();
        }
        if (stav == 1) {
            lcd.print("MPPT");
        } else if (stav == 2) {
            lcd.print("KONS. NAP.");
        } else if (stav == 3) {
            lcd.print("MENIC VYPNUTY");
        }
        prev_stav = stav;
        break;

    default:
        break;
}
}

citac_hl_cyklu++;

//-----ŘÍZENÍ VENTILÁTORU-----
if (Power[0] > 100) {
    int vetrani = map(Power[0], 100, 500, 215, 255);
    analogWrite(TURBINE, vetrani);
} else {

```

```
    analogWrite(TURBINE, 0);
  }

  //-----ZMĚNA KROKU POSUVU PRO ALGORITMUS MPPT-----
  switch (krok) {
    case 0:
      prirustek = 0.1;
      break;
    case 1:
      prirustek = 0.05;
      break;
    case 2:
      prirustek = 0.01;
      break;
    case 3:
      prirustek = 0.001;
      break;
    default:
      krok = 0;
      break;
  }
}
}
```

Příloha H

Osazená deska plošných spojů



Příloha I

Použité měřicí přístroje

Tabulka I.1: Použité měřicí přístroje

Zařízení	Výrobce	Název	Funkce
Laboratorní zdroj	KEITHLEY	2231A-30-3	Imitace solárního panelu
4 kanálový digitální osciloskop	RIGOL	MSO5074	Měření napětí v obvodu
Multimetr	FK technics	FKEM420A	Měření výstupního proudu
Multimetr	KEITHLEY	DMM6500	Měření výstupního napětí



Příloha J

Výkres krabičky pro MPPT měnič

