

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2024

Josef Komár



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

FOTOVOLTAICKÝ NABÍJEČ NOTEBOOKU S BEZDRÁTOVOU KONEKTIVITOU

PHOTOVOLTAIC LAPTOP CHARGER WITH WIRELESS CONNECTIVITY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Josef Komár

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Kufa, Ph.D.

BRNO 2024

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: Josef Komár

ID: 230271

Ročník: 3

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Fotovoltaický nabíječ notebooku s bezdrátovou konektivitou

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte technologie a typy fotovoltaických panelů. Prozkoumejte rozdíly v možnosti řízení fotovoltaické křivky panelu pomocí MPPT (Maximum Power Point Tracking) a PWM regulátorem. Popište různé principy BMS (Battery Management System), které jsou zapotřebí pro battery-pack a vhodné nabíjecí a ochranné obvody akumulátorů. Navrhněte obvodové schéma zařízení, jehož součástí budou: fotovoltaický panel o minimálním výkonu 20 W, měnič s vhodným výstupním napětím, management interních akumulátorů s kapacitou minimálně 40 Wh, výstupní měnič s minimálním výkonem 60 W a bezdrátový modul pro odesílání diagnostických dat. Provedte výrobu, osadte a oživte dané zařízení. Ověřte správnou funkčnost zařízení. Naprogramujte firmware zařízení tak, aby byl schopen bezdrátově odesílat data na další zařízení. Systém bude odesílat minimálně napětí panelu, stav interních akumulátorů a odebraný proud z výstupního měniče. Změřte výkony jednotlivých částí systému.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] SUTAR, A., et al., Solar Energy based Mobile Charger Using Inductive Coupling Transmission. In: 2020 4th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS) [online]. IEEE, 2020, s. 995-1000 [cit. 2022-06-12]. Dostupné z: doi:10.1109/ICICCS48265.2020.9120916
- [2] NEETHU, M a R. SENTHILKUMAR. Soft Computing Based MPPT Controller for Solar Powered Battery Charger Under Partial Shading Conditions. In: 2019 Fifth International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES) [online]. IEEE, 2019, s. 1-6 [cit. 2022-06-12]. Dostupné z: doi:10.1109/ICEES.2019.8719314

Termín zadání: 16.2.2024

Termín odevzdání: 27.5.2024

Vedoucí práce: Ing. Jan Kufa, Ph.D.

doc. Ing. Lucie Hudcová, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem a následnou konstrukcí fotovoltaického nabíječe určeného primárně pro notebook. Fotovoltaický regulátor pracuje s využitím principu MPPT (Maximum Power Point Tracking) a je řízen pomocí mikrokontroleru ESP32. Řídící algoritmus neustále vyhledává bod maximálního výkonu, tímto je dosaženo maximálního možného výkonu a účinnosti FV panelu. Následně vyrobená energie je ukládána do bateriového systému, který disponuje BMS včetně ochran a balanceru jednotlivých článků. Nabíječ obsahuje nastavitelný výstup s napětím 18 – 22 V pro napájení přenosného počítače a 5 V výstup pro napájení zařízení pomocí USB. Všechny důležité parametry (napětí, proudy a výkony) nabíječ bezdrátově odesílá pomocí rozhraní Wi-Fi.

Klíčová slova

Fotovoltaický panel, fotovoltaický regulátor, DC/DC měnič, MPPT, BMS, Li-Ion, smart, Wi-Fi, ESP32

Abstract

This thesis deals with the design and construction of a photovoltaic charger designed primarily for a laptop. The solar charge controller works using the MPPT (Maximum Power Point Tracking) principle and is controlled by a ESP32 microcontroller. The control algorithm constantly searches for the maximum power point, thus achieving the maximum possible power and efficiency of the PV panel. The produced energy is then stored in the battery system, which has a BMS including protections and cell balancers. The charger includes an adjustable 18 – 22 V output for powering a laptop computer and 5 V output for powering devices via USB. All important parameters (voltages, currents and powers) are sent wirelessly by the charger via Wi-Fi interface.

Keywords

Photovoltaic panel, solar charge controller, DC/DC converter, MPPT, BMS, Li-Ion, smart, Wi-Fi, ESP32

Bibliografická citace

KOMÁR, Josef. *Fotovoltaický nabiječ notebooku s bezdrátovou konektivitou* [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-04-29]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/159027>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Jan Kufa.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	<i>Josef Komár</i>
VUT ID studenta:	<i>230271</i>
Typ práce:	<i>Bakalářská práce</i>
Akademický rok:	<i>2023/24</i>
Téma závěrečné práce:	<i>Fotovoltaický nabíječ notebooku s bezdrátovou konektivitou</i>

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 27. května 2024

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Kufovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: 27. května 2024

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK.....	10
ÚVOD	11
1. FOTOVOLTAICKÝ ČLÁNEK.....	12
1.1 PRINCIP ČINNOSTI FV ČLÁNKU	12
1.2 VLASTNOSTI FV ČLÁNKU	13
1.2.1 Náhradní schéma	13
1.2.2 Voltampérová charakteristika	14
1.2.3 Vliv intenzity solárního záření	14
1.3 TYPY FV ČLÁNKŮ	15
1.3.1 Monokrystalické články.....	15
1.3.2 Polykrystalické články.....	15
1.3.3 Tenkovrstvé (amorfní) články.....	16
1.3.4 Srovnání různých typů fotovoltaických článků.....	17
1.4 FOTOVOLTAICKÝ PANEL.....	17
1.5 KONSTRUKCE FV PANELU	18
2. FOTOVOLTAICKÉ REGULÁTORY.....	19
2.1 ŘÍZENÍ POMOCÍ PWM.....	19
2.2 DC/DC MĚNIČ NAPĚTÍ.....	20
2.2.1 Step up měnič (boost).....	20
2.2.2 Step down měnič (buck)	21
2.2.3 Buck-boost měnič.....	21
2.3 ŘÍZENÍ POMOCÍ MPPT	22
2.4 MPPT ALGORITMY	22
2.4.1 Perturb and Observe (P&O).....	23
2.4.2 Metoda přírůstkové vodivosti.....	23
2.4.3 Metoda konstantního napětí.....	24
2.4.4 Podílová metoda napětí naprázdno	24
2.4.5 Podílová metoda proudu nakrátko.....	24
3. AKUMULÁTORY A JEJICH ŘÍZENÍ.....	25
3.1 LIHNO-IONTOVÉ AKUMULÁTORY.....	25
3.2 SROVNÁNÍ RŮZNÝCH TYPŮ AKUMULÁTORŮ	26
3.3 ŘÍZENÍ AKUMULÁTORŮ	26
3.4 BATTERY MANAGEMENT SYSTEM.....	27
3.5 BALANCER ČLÁNKŮ	27
3.5.1 Pasivní balancování.....	28
3.5.2 Prediktivní pasivní balancování.....	28
3.5.3 Aktivní balancování	28
3.6 NABÍJECÍ METODY	29
3.6.1 Konstantní proud (CC).....	29
3.6.2 Konstantní napětí (CV)	29
3.6.3 Konstantní proud následovaný konstantním napětím (CCCV)	29

3.6.4	<i>Více-stupňové proudové nabíjení (MCC)</i>	30
3.7	OCHRANNÉ OBVODY.....	31
3.7.1	<i>Ochrana proti přepětí (přebití)</i>	31
3.7.2	<i>Ochrana proti nadměrnému vybití</i>	31
3.7.3	<i>Ochrana proti nadproudům</i>	32
3.7.4	<i>Ochrana proti zkratu</i>	32
3.7.5	<i>Tepelná ochrana</i>	32
4.	VLASTNÍ ŘEŠENÍ – HARDWARE	33
4.1	KONCEPCE.....	33
4.2	PARAMETRY FV PANELU.....	34
4.3	VÝROBA A PARAMETRY BATTERY-PACKU.....	35
4.4	ŘÍDÍCÍ ČÁST – MIKROKONTROLER.....	36
4.4.1	<i>ESP32-DevKitC</i>	37
4.4.2	<i>ESP32 vs ATmega328P</i>	37
4.4.3	<i>Obvodové schéma řídicí části</i>	38
4.5	VÝKONOVÁ ČÁST – SNIŽUJÍCÍ MĚNIČ S MPPT.....	38
4.5.1	<i>Měření napětí – ADS1015</i>	39
4.5.2	<i>Měření proudu – ACS724</i>	40
4.5.3	<i>Budič MOSFET – IR2104</i>	40
4.5.4	<i>Opatření proti zpětnému toku proudu</i>	40
4.5.5	<i>Výběr cívky a filtračních kondenzátorů</i>	41
4.6	ZDROJE PRO VLASTNÍ SPOTŘEBU.....	41
4.6.1	<i>Snižující měnič 12 V – LM5169</i>	42
4.6.2	<i>Regulátor 5 V – LD1117</i>	43
4.6.3	<i>Snižující měnič 3,3 V – LM5169</i>	43
4.7	NÁVRH VÝSTUPNÍHO MĚNIČE.....	44
4.8	NÁVRH, VÝROBA A OSAZENÍ DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ.....	45
4.9	DALŠÍ POUŽITÉ KOMPONENTY.....	47
4.10	KOMPLETACE ZAŘÍZENÍ, CENA.....	48
5.	FIRMWARE A BEZDRÁTOVÉ ODESÍLÁNÍ DAT	50
5.1	NÁVRH FIRMWARE.....	50
5.2	BEZDRÁTOVÉ ODESÍLÁNÍ DAT – WI-FI.....	50
6.	PRAKTICKÉ MĚŘENÍ NAVRŽENÉHO ZAŘÍZENÍ	52
6.1	PRŮBĚH VÝKONU FV PANELU A STAVU NABITÍ AKUMULÁTORU.....	53
6.2	VSTUPNÍ A VÝSTUPNÍ HODNOTY NAPĚTÍ A PROUDŮ.....	54
6.3	PRŮBĚH VÝKONU A PROUDU LABORATORNÍ ZÁTĚŽÍ.....	55
6.4	PRŮBĚH TEPLoty CHLADIČE.....	55
6.5	NABÍJENÍ AKUMULÁTORU METODOU CC/CV.....	56
7.	ZÁVĚR	57
	LITERATURA	59
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	63
	SEZNAM PŘÍLOH	65

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Fotovoltaický článek, lze pozorovat sběrné vodiče [2]	12
1.2	Struktura fotovoltaického článku [3].....	13
1.3	Náhradní schéma fotovoltaického článku [1], [4]	13
1.4	Voltampérová a výkonová charakteristika FV článku [4]	14
1.5	Vliv intenzity slunečního záření na výrobu FV článku [5].....	15
1.6	Polykrystalický (vlevo) a monokrystalický článek (vpravo) [8]	16
1.7	Tenkovrstvý článek nanesený na ohebné fólii [9]	17
1.8	Schéma konstrukce fotovoltaického panelu [10].....	18
2.1	Typické schéma zapojení solárního regulátoru [12].....	19
2.2	Schéma step up (boost) měniče (inspirováno dle [14])	20
2.3	Schéma step down (buck) měniče (inspirováno dle [14])	21
2.4	Schéma buck-boost měniče (inspirováno dle [14])	21
2.5	Základní blokové schéma MPPT regulace	22
3.1	Princip funkce Li-ion akumulátoru [19].....	25
3.2	Pasivní balancer (vlevo) a aktivní balancer (vpravo) [25].....	28
3.3	Simulace průběhu nabíjení metodou CCCV (1 C_{rate}) [28].....	30
3.4	Simulace průběhu nabíjení pětistupňovou metodou MCC [28]	30
3.5	Různé možnosti realizace ochranných obvodů [29], [30]	31
4.1	Koncepční schéma fotovoltaického systému.....	33
4.2	Testování jednotlivých článků chytrou nabíječkou	35
4.3	Vyrobený a nabodovaný battery-pack 7S2P	36
4.4	Kompletní battery-pack včetně BMS a izolace	36
4.5	Obvodové schéma řídicí části.....	38
4.6	Obvodové schéma výkonové části	39
4.7	Schéma obvodu ADS1015	40
4.8	Obvodové schéma interních zdrojů	42
4.9	Obvodové schéma výstupního měniče pro nabíjení notebooku	45
4.10	3D model desky plošných spojů (TOP).....	46
4.11	3D model desky plošných spojů (BOTTOM)	46
4.12	Osazená deska plošných spojů včetně chladiče.....	47
4.13	Kompletní zařízení v elektroinstalační krabici.....	48
4.14	Kompletní zařízení s popisy na štítcích.....	49
5.1	Vytvořené webové rozhraní platformy Blynk	51
5.2	Vytvořené mobilní rozhraní platformy Blynk v systému Android.....	51
6.1	Praktické měření 12.5.2024 („laboratorní“ zátěž, FV panel)	52
6.2	Průběh výkonu FV panelu a stavu nabití akumulátoru.....	53
6.3	Vstupní hodnoty napětí a proudu (FV panel)	54
6.4	Výstupní hodnoty napětí a proudu (MPPT měnič).....	54
6.5	Průběh výkonu a proudu zátěží (notebook).....	55
6.6	Průběh výkonu FV panelu a teploty chladiče.....	56
6.7	Ukázka nabíjení akumulátoru metodou CC/CV	56

SEZNAM TABULEK

1.1	Srovnání různých typů fotovoltaických článků [1], [7].....	17
3.1	Srovnání různých typů akumulátorů [21], [22], [23].....	26
3.2	Práh bezpečného napětí u lithno-iontových článků [31]	32
4.1	Mezní a požadované parametry zařízení	34
4.2	Parametry fotovoltaického modulu kaneka HB105 [32].....	34
4.3	Parametry článků Li-ion 18650.....	35
4.4	Srovnání parametrů ESP32 a ATmega328P [34], [35]	37
4.5	Výpočet hodnot cívky a filtračních kondenzátorů (upraveno z [39])	41
4.6	Výrobní cena zařízení.....	49

ÚVOD

Obnovitelné zdroje energie a fotovoltaické systémy jsou v dnešní době velmi diskutovaným tématem, zejména kvůli čisté a šetrné výrobě elektrické energie. Kromě dodávek do distribuční sítě se mohou podílet na soběstačnosti ve spotřebě elektrické energie jednotlivých domácností, průmyslových objektů nebo ostrovních systémů.

Cílem bakalářské práce je navrhnout a následně realizovat soběstačný fotovoltaický systém určený primárně pro napájení notebooku. Důraz je kladen zejména na výslednou efektivitu celého systému, které bude dosaženo využitím synchronních měničů a implementací vlastního MPPT (Maximum Power Point Tracking) algoritmu v mikrokontroleru ESP32. Pro správnou funkci je nutné provést výběr vhodného fotovoltaického panelu a akumulátorů dostatečné kapacity, aby byla nabíječka schopna pracovat při méně příznivých povětrnostních podmínkách a proměnlivém osvětlení. Dalším požadavkem je bezdrátové odesílání důležitých parametrů (napětí, výkony a stav akumulátoru) pomocí Wi-Fi do dalších zařízení. Navržený fotovoltaický systém může najít vhodné uplatnění pro domácí použití nebo aplikaci v obytných vozech.

Bakalářská práce je členěna do šesti základních částí. V první kapitole jsou rozebrány základní typy fotovoltaických článků (panelů), jejich důležité vlastnosti a základní charakteristiky. Druhá kapitola se zabývá rozdíly v řízení fotovoltaické křivky pomocí MPPT a PWM regulátoru, základními topologiemi DC/DC měničů a popisem několika základních MPPT algoritmů. Ve třetí kapitole jsou popsány jednotlivé principy a hlavní funkce správy akumulátorů pomocí BMS, rozdíly mezi aktivním a pasivním balancováním článků, základní nabíjecí metody akumulátorů a možnosti ochranných obvodů. Čtvrtá kapitola je zaměřena na návrh obvodových schémat, výběr vhodných součástek spolu s potřebnými výpočty, návrh desek plošných spojů a následně praktickou realizaci celého systému. Pátá kapitola se věnuje návrhu firmware zařízení a bezdrátovému odesílání dat přes rozhraní Wi-Fi. V šesté kapitole je provedeno praktické měření sestaveného systému, včetně všech naměřených dat, grafů a poznatků.

1. FOTOVOLTAICKÝ ČLÁNEK

Fotovoltaický článek je základním stavebním prvkem systémů určených pro přeměnu slunečního záření na elektrickou energii. V principu se jedná o velkoplošnou polovodičovou součástku s jedním či více PN přechody, nehledě na to, zda jde o článek monokrystalický, polykrystalický nebo například tenkovrstvý. Jednotlivé články jsou velmi tenké destičky, jejichž tloušťka nepřesahuje 400 μm . Rozměry běžných komerčně vyráběných článků bývají zpravidla menší než 200 mm x 200 mm. Propojení jednotlivých článků je realizováno pomocí kontaktů a tenkých sběrných vodičů, které se většinou nachází na přední i zadní straně článků [1], [2].



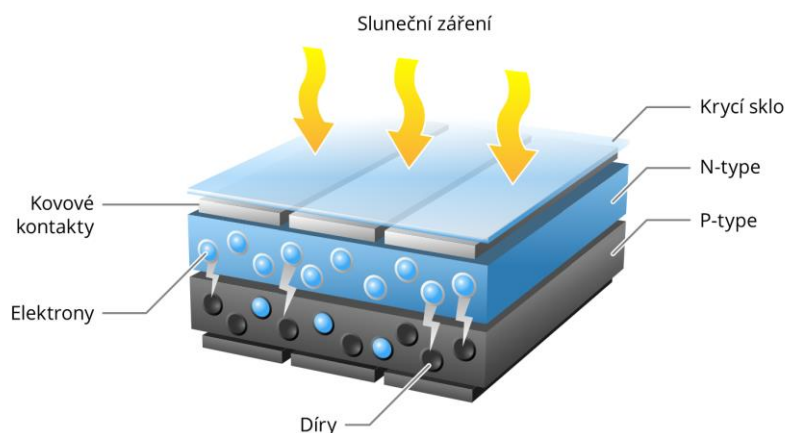
Obrázek 1.1 Fotovoltaický článek, lze pozorovat sběrné vodiče [2]

1.1 Princip činnosti FV článku

Základním principem fotovoltaického článku je fotoelektrický jev, při kterém jsou elektrony uvolněny z dané látky či materiálu v důsledku absorpce elektromagnetického záření. Absorpce (pohlcení elektronů) je způsobena interakcí světla (např. fotonů) s částicemi materiálu (jeho elektrony a jádry). Pro správnou funkci FV článku je důležité, aby foton (sluneční záření) uvolnil v látce elektron a vznikl pár elektron-díra. Jelikož v kovech by došlo k okamžité rekombinaci elektronů, používá se pro tento účel polovodičů, nejčastěji křemíku [1].

Jakmile je solární článek vystaven slunečnímu záření, pohlcené fotony generují v křemíku kladné a záporné náboje. Pokud náboje dosáhnou polovodičového přechodu, musí být následně separovány – kladné náboje (díry) v polovodiči typu P a záporné náboje (elektrony) v polovodiči typu N. Následně vznikne na kontaktech FV článku stejnosměrné napětí o velikosti přibližně 0,5 – 0,7 V. Připojeným vnějším obvodem tudíž protéká stejnosměrný proud. Jeho velikost je úměrná intenzitě slunečního záření. Kladný pól článku se nachází po celé ploše zadní strany destičky. Záporný pól, umístěný na

přední straně, je tvořen kontaktní mřížkou tak, aby pokrývala co nejmenší plochu článku [2].

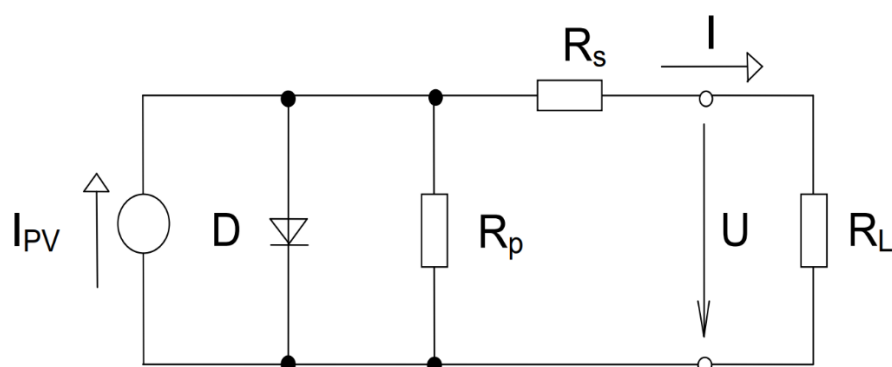


Obrázek 1.2 Struktura fotovoltaického článku [3]

1.2 Vlastnosti FV článku

1.2.1 Náhradní schéma

Fotovoltaický článek můžeme modelovat pomocí náhradního obvodu zobrazeného na obrázku 1.3. Ozářená část PN přechodu je charakterizována jako zdroj proudu. Oblast typu P se nabíjí kladně a oblast typu N záporně. Tímto je přechod propustně polarizován a část generovaného proudu teče zpětně diodou D . Svodovým odporem R_p jsou modelovány technologické nedokonalosti (mikrosvody) PN přechodu, sériovým odporem R_s je modelován vliv odporu materiálu a proudových sběrnic [1].



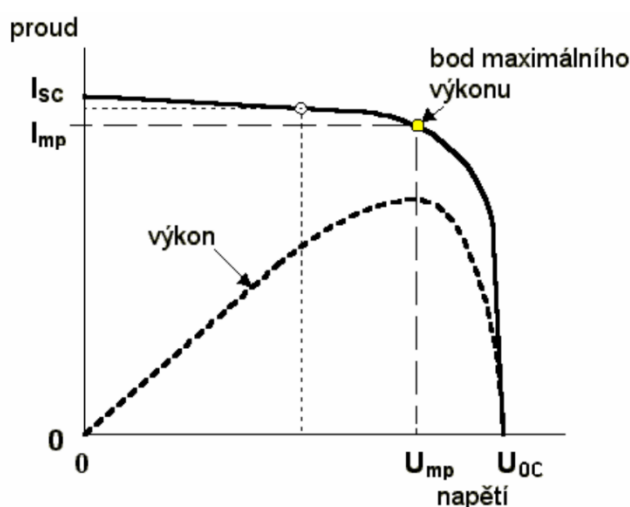
Obrázek 1.3 Náhradní schéma fotovoltaického článku [1], [4]

1.2.2 Voltampérová charakteristika

Základní charakteristikou fotovoltaického článku je průběh jeho voltampérové charakteristiky, který můžeme pozorovat na obrázku 1.4. Jedná se o závislost elektrického napětí na odebíraném proudu při konstantním osvitu.

Mezi hraniční veličiny na voltampérové charakteristice patří napětí naprázdno U_{OC} (open circuit) a proud nakrátko I_{SC} (short circuit). Jak již název napovídá, napětí U_{OC} lze naměřit při nezátženém obvodu (bez spotřebiče) a proud nakrátko I_{SC} je měřen jako maximální (zkratový) proud, který je schopen článek při daném osvitu dodávat.

Hodnoty proudu I_{MPP} a napětí U_{MPP} odpovídají hodnotám v bodě maximálního výkonu (maximum power point, MPP) fotovoltaického článku.

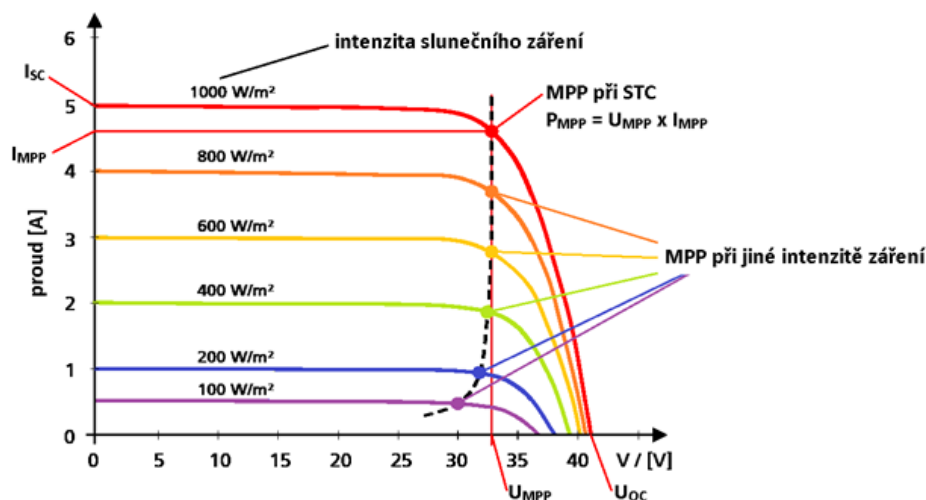


Obrázek 1.4 Voltampérová a výkonová charakteristika FV článku [4]

Veškeré výše uvedené veličiny jsou výrobcem udávány při standardních testovacích podmínkách STC, tedy při standardní testovací teplotě $T = 25\text{ °C}$, intenzitě slunečního záření $I = 1000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ a definované vzduchové hmotě (Air Mass) $AM = 1,5$ [-]. Na průběh charakteristiky má vliv zejména intenzita slunečního záření či teplota [1].

1.2.3 Vliv intenzity solárního záření

Účinnost a aktuální výkon fotovoltaických článků má nejvyšší závislost na intenzitě solárního záření. Při rostoucí hodnotě osvitu roste zkratový proud I_{SC} téměř lineárně, naopak napětí naprázdno U_{OC} roste pouze minimálně. Závislost výkonu P_{MPP} na osvitu má také téměř lineární charakter, kromě viditelné odchylky při velmi nízkých úrovních osvitu. Možné průběhy voltampérových charakteristik při různých hodnotách osvitu lze pozorovat na obrázku níže.



Obrázek 1.5 Vliv intenzity slunečního záření na výkon FV článku [5]

1.3 Typy FV článků

V současné době existuje mnoho různých typů fotovoltaických článků. Do největší a hlavní skupiny patří články na bázi křemíku, které můžeme rozdělit na články monokrystalické, polykrystalické a tenkovrstvé (amorfní). Fotovoltaické články na křemíkové bázi jsou v současnosti stále nejvíce používané a na trhu dosahují největšího podílu. Mezi další typy článků lze zařadit např. tenkovrstvé technologie na bázi CdTe a CIGS, nebo různé organické články. Velké množství technologií je stále ve stádiu výzkumu a vývoje.

1.3.1 Monokrystalické články

Monokrystalické články, jak již název napovídá, jsou vyráběny z jediného krystalu křemíku. Při výrobě se většinou používá tzv. Czochralského metoda: pomocí ponořeného zárodku krystalu se z vysoce čisté křemíkové taveniny vytahuje kulatá monokrystalická tyč až do průměru 30 cm a délky několika metrů. Jelikož je nutné nejprve křemík roztavit při teplotě přibližně 1420 °C, celý proces výroby je energeticky velmi náročný. Kulatá křemíková tyč se ořeže na požadovaný tvar (většinou čtverec) a následně je nařezána na tenké destičky (tzv. wafery) o tloušťce přibližně 150-300 μm [6].

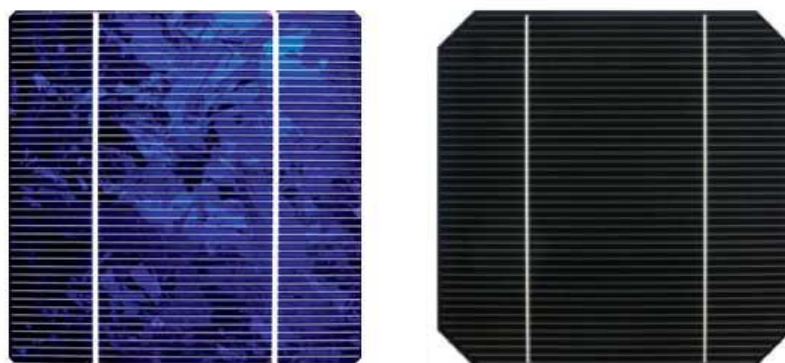
Typickým znakem monokrystalického článku je tmavomodrý až černý homogenní povrch. Jelikož jsou články vyráběny z velmi čistého křemíku, dosahují účinnosti až 27 % [7]. Typická účinnost se pohybuje v rozsahu 16-22 %.

1.3.2 Polykrystalické články

Polykrystalické články lze na první pohled snadno rozpoznat podle modře se třpytící krystalické struktury. Nehomogenní struktura je výsledkem výrobního procesu metodou blokového lití, kde dochází k tvorbě krystalů s rozdílnou orientací. Křemík se ve vakuu

zahřeje na 1500 °C a v grafitové nádobě se následně ochlazuje až do bodu tání. Tím vzniknou polykrystalické křemíkové bloky, které jsou následně nařezány na tyče a ty pak na výsledné tenké destičky (wafery). Jelikož jsou při výrobě použity hranaté bloky, výsledný odpad je mnohem menší než při výrobě monokrystalických článků [6].

Mezi výhody lze zařadit lepší výtěžnost z rozptýleného světla, která je způsobena různým úhlem natočení jednotlivých krystalů. Výrobní náklady jsou také nižší než v případě monokrystalického článku. Typická efektivita polykrystalických článků je 13-18 %, v laboratorních podmínkách až 23 % [7].



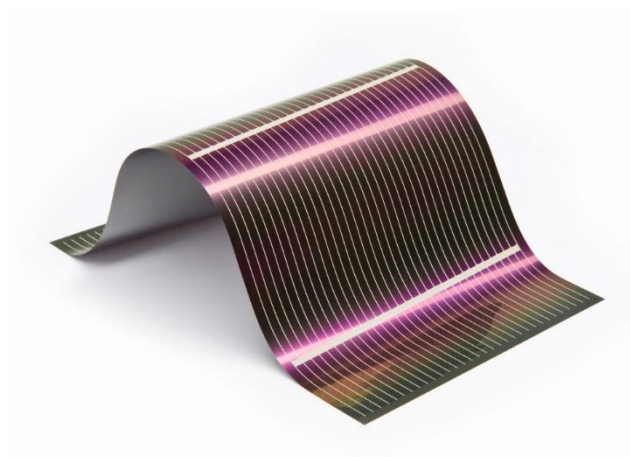
Obrázek 1.6 Polykrystalický (vlevo) a monokrystalický článek (vpravo) [8]

1.3.3 Tenkovrstvé (amorfní) články

Proces výroby tenkovrstvých panelů je poměrně odlišný od mono/polykrystalické technologie. Nejsou vyráběny jednotlivé fotovoltaické články, ale rovnou celý modul (panel) v sekvenci technologických operací. Na nosnou podložku (většinou sklo) je nejprve nanášena vrstva TCO (transparentní vodivý oxid), laserem jsou odděleny oblasti jednotlivých článků, poté je nanášen tenkovrstvý článek a nakonec vodivý kontakt. Na výrobu je spotřebováno mnohem menší množství materiálu (např. křemíku), tudíž jsou články levnější na výrobu. Články mohou být vyrobeny i jako pružná fólie nebo polopropustné články [1], [6].

Mezi výhody řadíme nižší cenu, variabilitu provedení, flexibilitu a vyšší účinnost výroby při nízkém osvětlení či rozptýleném světle. Nevýhodou je nízká celková účinnost, a tudíž nižší měrný výkon na zastavěnou plochu. Typická efektivita tenkovrstvých Si článků dosahuje 8-12 %, v laboratorních podmínkách až 14 %.

V případě tenkovrstvé technologie CdTe (telurid kadmennatý) nebo CIGS (copper indium gallium selenide) lze dosáhnout účinnosti 15 až 22 % [7].



Obrázek 1.7 Tenkovrstvý článek nanesený na ohebné fólii [9]

1.3.4 Srovnání různých typů fotovoltaických článků

V níže uvedené tabulce jsou srovnány typické účinnosti různých typů fotovoltaických článků při ideálním (kolmém) osvitu. Jednotlivé účinnosti se však mohou při nízkém osvitu nebo rozptýleném světle měnit ve prospěch jiných typů článků.

Tabulka 1.1 Srovnání různých typů fotovoltaických článků [1], [7]

Typ článku	Typická účinnost [%]	Laboratorní účinnost [%]	Životnost [rok]
Monokrystalický křemík	16 – 22	27	25 – 30
Polykrystalický křemík	13 – 18	23	20 – 25
Amorfní křemík	8 – 12	14	10 – 20
Telurid kademnatý (CdTe)	12 – 18	22	25 – 30
Copper indium gallium selenide (CIGS)	12 – 16	23	–

1.4 Fotovoltaický panel

Fotovoltaický panel (modul) je základním stavebním blokem solárních systémů. Samotný fotovoltaický článek dosahuje velmi nízkých hodnot napětí (řádově 0,5 V), tudíž je zapotřebí vytvořit sériové či sérioparalelní spojení více solárních článků. Běžně dostupné FV panely obsahují až 100 FV článků, v závislosti na použité technologii a vnitřním zapojení.

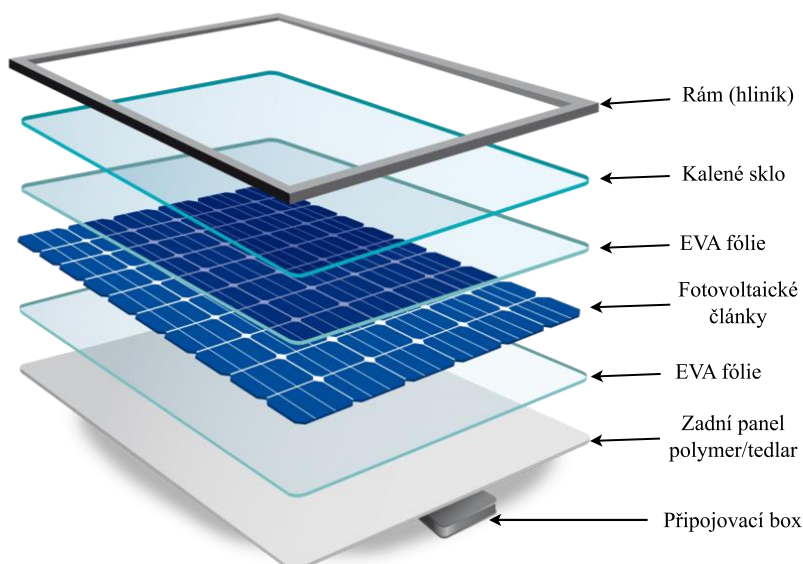
Jmenovitý výkon FV panelu se nejčastěji uvádí v jednotkách W_p (Watt-peak, tedy špičkový výkon). Jedná se o výkon, který je dosažen při standardních testovacích podmínkách STC, tedy při standardní testovací teplotě $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, intenzitě slunečního záření $I = 1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ a definované vzduchové hmotě (Air Mass) $AM = 1,5$ [-].

Výkony jednotlivých panelů se pohybují v širokém rozsahu od 10 W_p (velmi malé moduly) až po 600 W_p (nové moderní moduly). Takto výkonné solární panely většinou využívají technologie Bifacial (fotovoltaické články jsou schopny absorbovat záření z přední i zadní strany současně) nebo technologie Half-cut cell (jednotlivé FV články jsou půleny, za účelem efektivnější výroby při částečném zastínění či pokrytí sněhem).

1.5 Konstrukce FV panelu

Přehledné schéma konstrukce fotovoltaického panelu můžeme pozorovat na obrázku 1.8.

Fotovoltaické články jsou z obou stran laminované pomocí EVA (ethylvinylacetátové) fólie, která zajišťuje ochranu před vlhkostí a vnějšími vlivy. Vrstva kaleného skla musí být vyrobena z velmi čistého materiálu, aby propouštěla co největší množství slunečního záření. Zároveň musí odolat i nepříznivým vlivům počasí jako jsou např. kroupy, zatížení sněhem atd. Konstrukce fotovoltaických panelů se však může lišit v závislosti na výrobci a konkrétním použití [1].



Obrázek 1.8 Schéma konstrukce fotovoltaického panelu [10]

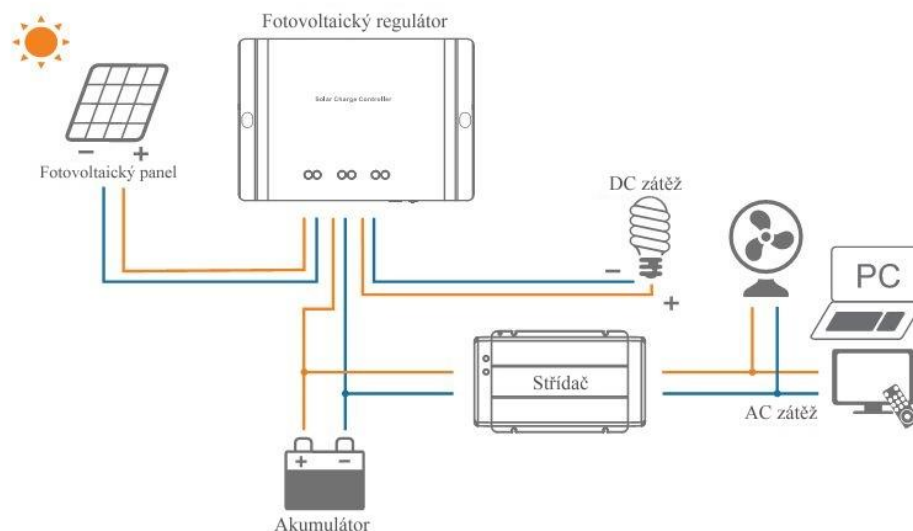
V připojovacím boxu bývají zpravidla umístěny překlenovací (bypass) diody, které slouží k zachování výroby při selhání některého FV článku nebo při částečném zastínění panelu. V takovém případě proud neprotéká přes určitou část článků, ale přes bypass diodu. Dále jsou zde vyvedeny připojovací vodiče se speciálními konektory, většinou typu MC4, popřípadě starší typ MC3.

2. FOTOVOLTAICKÉ REGULÁTORY

V předchozí kapitole byly rozebrány fotovoltaické články a fotovoltaické panely. Aby bylo možné vyrobenou energii efektivně zpracovat a následně uložit do akumulátoru, potřebujeme další funkční člen. Tím je fotovoltaický regulátor, jehož hlavním cílem je efektivně využít veškerou dostupnou el. energii z panelového pole. Dalším úkolem regulátoru je řízení nabíjení akumulátoru, ochrana před přepětím, podpětím či další bezpečnostní opatření.

Obecně jsou regulátory rozděleny do dvou základních kategorií. Jednodušší a levnější regulátor je řízen technologií PWM, která „ořezává“ vstupní napětí z FV panelu. Dražší, avšak efektivnější variantou je využití DC/DC měniče s MPPT řízením, který díky neustálému přizpůsobování napětí a proudu zachová maximální využitelný výkon [11].

Typické schéma zapojení solárního regulátoru je zobrazeno na obrázku níže.



Obrázek 2.1 Typické schéma zapojení solárního regulátoru [12]

2.1 Řízení pomocí PWM

Jak již bylo zmíněno, jedná se o levnější a jednodušší technologii řízení. Hlavním principem činnosti je „ořezání“ vstupního napětí z panelového pole na takovou hodnotu, která odpovídá současnému nabíjecímu napětí pro daný akumulátor. Z toho plyne, že čím vyšší je napěťový rozdíl mezi vstupem a výstupem regulátoru, tím nižší také bude celková efektivita systému [11].

V praxi musí být systémy navrženy tak, aby hodnota napětí U_{MPP} solárního panelu jen o pár voltů převyšovala nejvyšší dovolené napětí akumulátoru. Tedy například sestava dvou běžných 12 V olověných akumulátorů řazených do série, bude mít limitní nabíjecí napětí přibližně 28 V. Ideální hodnota napětí U_{MPP} solárního panelu je tedy kolem 30 V,

což odpovídá panelu o 60 fotovoltaických článcích zapojených v sérii. V případě použití výkonnějšího FV panelu s více články a vyšším napětím, dojde k ořezání napětí na hodnotu výstupu. V takovém případě nelze využít plný potenciál FV panelu a efektivita systému se rapidně snižuje [13].

Hlavní výhodou PWM regulátoru jsou nízké pořizovací náklady a jednoduchost obvodů. Mezi nevýhody řadíme nízkou efektivitu při nevhodném návrhu či obtížné použití více kusů FV panelů řazených do série.

2.2 DC/DC měnič napětí

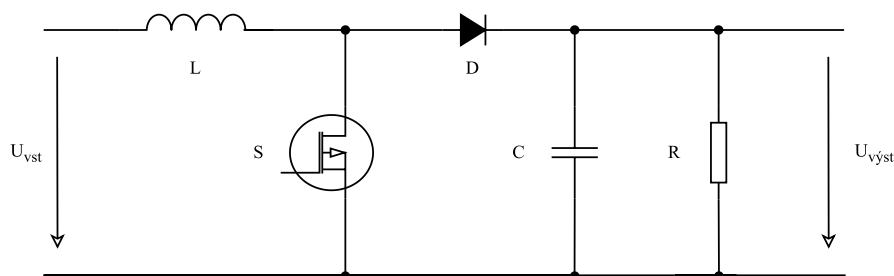
DC/DC měnič (také nazývaný stejnosměrný měnič) je zařízení určené pro změnu velikosti stejnosměrného napětí či proudu. Tyto měniče jsou často využívány pro efektivní a spolehlivou přeměnu napětí mezi různými elektronickými zařízeními.

DC/DC měniče pracují na principu střídavého spínání, kde se spínací prvky (např. tranzistory) otevírají a zavírají v závislosti na střídě řídicího PWM signálu. Existuje mnoho různých druhů a topologií měničů v závislosti na způsobu použití obvodu. Často jsou používány ve většině spínaných zdrojů určených k běžné elektronice [14].

2.2.1 Step up měnič (boost)

Step up měnič (také nazýván boost) je druh měniče, který je využíván ke zvyšování napětí na výstupu. Skládá se z cívky L , kondenzátoru C , spínače (tranzistoru) S , diody D a zátěže R . (viz obrázek 2.2)

Pokud je tranzistor S sepnutý, cívka se nabíjí energií ze zdroje a následně ji uchovává ve formě magnetického pole. Při vypnutém spínači S se pomocí energie cívky nabíjí kondenzátor. Jakmile je dosaženo rovnovážného stavu, dosáhneme také vyššího napětí na výstupu oproti napětí vstupnímu. Velikost výstupního napětí je určena střídou PWM signálu, který řídí daný spínač/tranzistor [14].

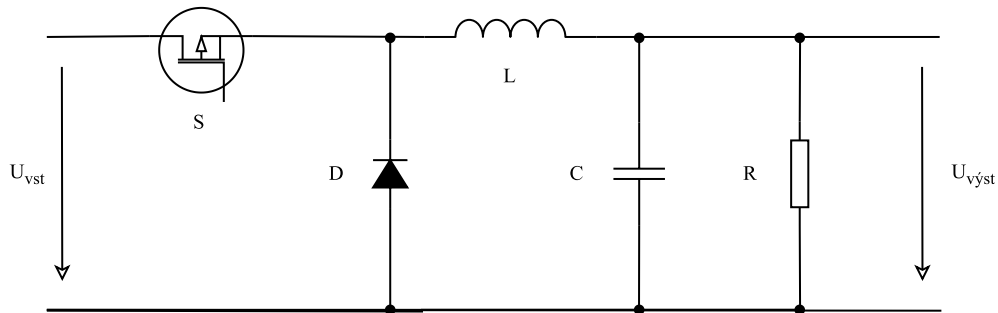


Obrázek 2.2 Schéma step up (boost) měniče (inspirováno dle [14])

2.2.2 Step down měnič (buck)

Snižující měnič neboli step down měnič (také nazýván buck) se často používá pro snižování napětí za účelem nabíjení akumulátorů. Ačkoliv je běžné akumulátory řadit sériově pro dosažení vyššího napětí, celkové napětí battery-packu je většinou nižší než napětí z fotovoltaického pole.

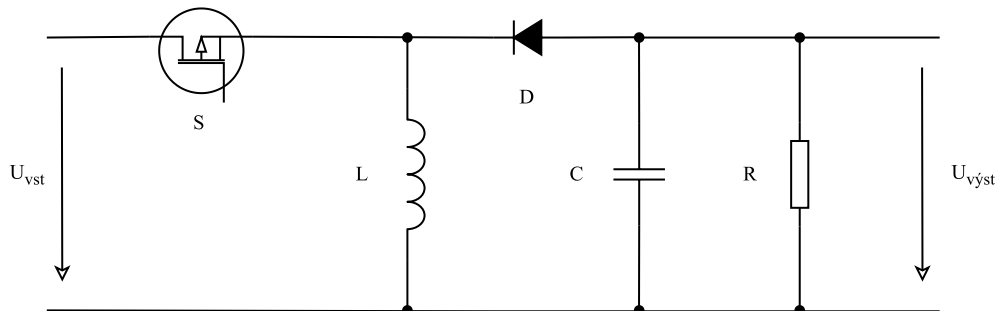
Měnič se skládá z identických součástek jako step up měnič, avšak v jiném pořadí.



Obrázek 2.3 Schéma step down (buck) měniče (inspirováno dle [14])

2.2.3 Buck-boost měnič

Měnič typu buck-boost je kombinací dvou měničů již dříve uvedených. Tento typ topologie umožňuje obousměrnou regulaci, tudíž výsledné napětí lze jak snižovat, tak zvyšovat. Měnič je tedy schopen efektivně regulovat napětí v závislosti na potřebách systému.



Obrázek 2.4 Schéma buck-boost měniče (inspirováno dle [14])

Existuje mnoho různých druhů obousměrných měničů bez galvanického oddělení. Zdroj [15] uvádí níže uvedené typy:

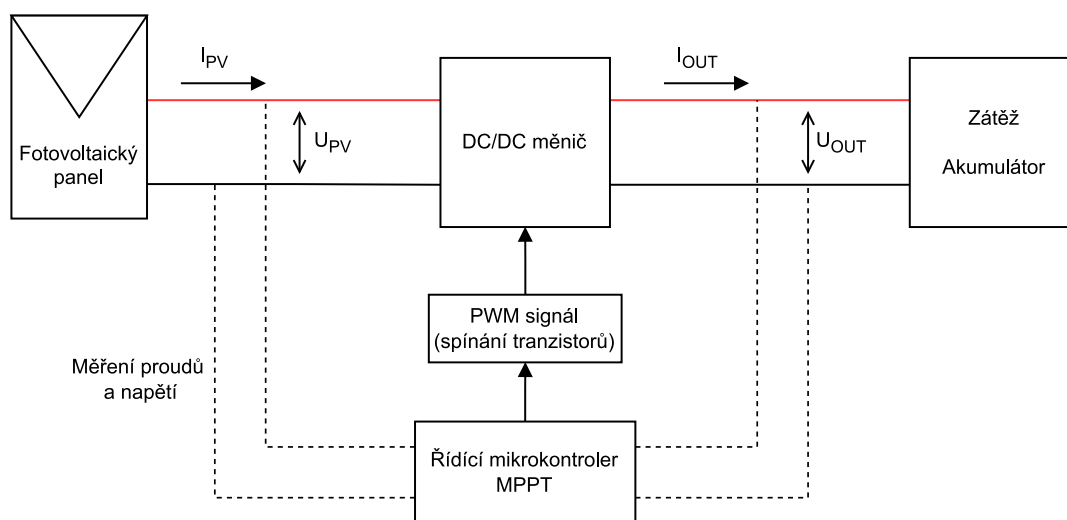
- Invertor
- Měnič bez společné země
- Bezrozptylový měnič
- Bezrozptylový invertor (Ćuk)
- Obousměrný / synchronní měnič

2.3 Řízení pomocí MPPT

Jedná se o pokročilejší a efektivnější typ regulace. Klíčovým prvkem je využití DC/DC měniče spolu s MPPT (Maximum Power Point Tracking) řízením. MPPT regulátor neustále sleduje výstupní napětí a proud FV panelu a dynamicky upravuje pracovní bod tak, aby maximalizoval výkon získaný z fotovoltaického pole. Tímto způsobem je dosaženo nejvyššího dostupného výkonu i při částečném zastínění panelu nebo nepříznivých podmínkách. Zároveň se zvyšuje i účinnost celého systému.

Mezi hlavní výhody řadíme efektivitu, škálovatelnost fotovoltaického pole (použití více FV panelů v sérii, popř. sérioparalelní zapojení) či možnost připojení různých akumulátorů při zachování vysoké efektivity. Jedinou nevýhodou je nákladnost řešení a tím i jeho cena.

Na následujícím obrázku lze pozorovat základní blokové schéma MPPT regulace:



Obrázek 2.5 Základní blokové schéma MPPT regulace

2.4 MPPT algoritmy

Maximální výkon dodávaný fotovoltaickým panelem je závislý na mnoha faktorech, jako je např. aktuální stav počasí, změna osvětlení, částečné zastínění či teplota. Pro získání maximálního množství energie je zapotřebí implementovat vhodný MPPT algoritmus, který dynamicky upravuje pracovní bod FV panelu.

Rychlost konvergence k optimálnímu bodu je jednou z nejdůležitějších vlastností mezi všemi různými MPPT algoritmy. Zrychlení doby náběhu MPPT zlepšuje spolehlivost a zvyšuje účinnost celého systému. Další důležitou vlastností jsou případné oscilace kolem pracovního bodu, ty celkovou efektivitu naopak mírně snižují [16].

Zdroje [16], [17] nejčastěji uvádí níže uvedené typy algoritmů:

- Perturb and Observe (P&O)
- Metoda přírůstkové vodivosti
- Metoda konstantního napětí a proudu
- Podílová metoda napětí naprázdno
- Podílová metoda proudu nakrátko

2.4.1 Perturb and Observe (P&O)

Algoritmus Perturb and Observe (P&O), v překladu „vychyl a pozoruj“, je založen na principu vychýlení napětí (pracovního bodu) do předem známého směru a pozorování změny výkonu. Pokud se pracovní bod nachází na levé straně od bodu maximálního výkonu (MPP), s rostoucím napětím roste i výkon. Naopak na pravé straně od MPP bude s rostoucím napětím výkon klesat.

Jedná se o poměrně jednoduchý a výpočetně nenáročný algoritmus, který nevyžaduje předchozí znalost VA charakteristiky fotovoltaického panelu, měření intenzity slunečního záření či teploty článků. Mezi nevýhody řadíme sníženou schopnost sledovat MPP při velkých změnách úrovně osvětlení či zastínění. Další nevýhodou jsou oscilace kolem MPP, které jsou přítomny i při ustáleném stavu. Oscilace lze potlačit snížením velikosti kroku (změny napětí), avšak na úkor rychlosti regulace. Pro odstranění oscilací lze algoritmus P&O modifikovat např. o fuzzy logiku nebo model ANFIS (Adaptive neuro-fuzzy inference system controller) [17].

2.4.2 Metoda přírůstkové vodivosti

Algoritmus incremental conductance, v překladu metoda přírůstkové vodivosti, využívá principu, že podíl derivace výkonu podle derivace napětí je v bodě MPP nulový.

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = 0 \quad \text{v bodě MPP,} \quad (2.1)$$

Metoda dynamicky upravuje vodivost, zároveň měří přírůstek podílu proudu a napětí, který porovnává s podílem celkového proudu a napětí. Jakmile se hodnoty rovnají, je dosaženo bodu maximálního výkonu. Výsledné vztahy jsou zobrazeny v rovnicích níže:

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}; \quad \left(\frac{dP}{dV} = 0\right) \quad \text{v bodě MPP,} \quad (2.2)$$

$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V}; \quad \left(\frac{dP}{dV} > 0\right) \quad \text{nalevo od MPP,} \quad (2.3)$$

$$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V}; \quad \left(\frac{dP}{dV} < 0\right) \quad \text{napravo od MPP,} \quad (2.4)$$

Výhodou algoritmu jsou menší oscilace kolem bodu MPP oproti metodě P&O. Nevýhodou je však mnohem vyšší náročnost na výpočetní výkon a nestabilita při nízkých úrovních slunečního záření [17].

2.4.3 Metoda konstantního napětí

Jedná se o jednoduchou metodu, která využívá hodnotu napětí v bodě maximálního výkonu fotovoltaického panelu U_{MPP} . Tato hodnota je předem známá například ze štítku jednotlivých modulů. Tato metoda udržuje ideální hodnotu napětí, která je daná při osvětlení $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ a STC podmínkách. Při proměnných hodnotách osvětlení i teploty se však reálné maximum vzdaluje od ideálního. Další nevýhodou je nutnost přepisovat hodnotu U_{MPP} v mikrokontroleru či regulátoru při každé výměně fotovoltaického panelu za jiný [17].

2.4.4 Podílová metoda napětí naprázdno

Základní princip této metody uvažuje, že mezi napětím naprázdno U_{OC} a napětím maximálního bodu výkonu U_{MPP} existuje téměř lineární vztah:

$$U_{MPP} \approx k_1 \cdot U_{OC} , \quad (2.5)$$

kde k_1 je tzv. konstanta úměrnosti. Hodnota k_1 závisí především na konkrétním typu použitého fotovoltaického modulu a pohybuje se v rozsahu 0,7 až 0,8 [-]. Regulace probíhá v cyklech, kdy je při každém cyklu odpojována zátěž a je změřeno dané napětí naprázdno. Výhodou je hlavně jednoduchost takového řešení. Mezi nevýhody lze zařadit sníženou efektivitu způsobenou neustálým odpojováním FV panelu nebo při přechodné oblačnosti, kdy je rychlost regulace velmi pomalá [17].

2.4.5 Podílová metoda proudu nakrátko

Tato metoda je principem obdobná metodě napětí naprázdno. Místo hodnot napětí se však vychází ze vztahu pro proud nakrátko I_{SC} a proud v bodě maximálního výkonu I_{MPP} :

$$I_{MPP} \approx k_2 \cdot I_{SC} , \quad (2.6)$$

kde k_2 je konstanta úměrnosti, která nabývá hodnot 0,8 až 0,9 [-]. Regulace probíhá podobně jak u předchozí metody, v tomto případě měřením zkratového proudu [17].

3. AKUMULÁTORY A JEJICH ŘÍZENÍ

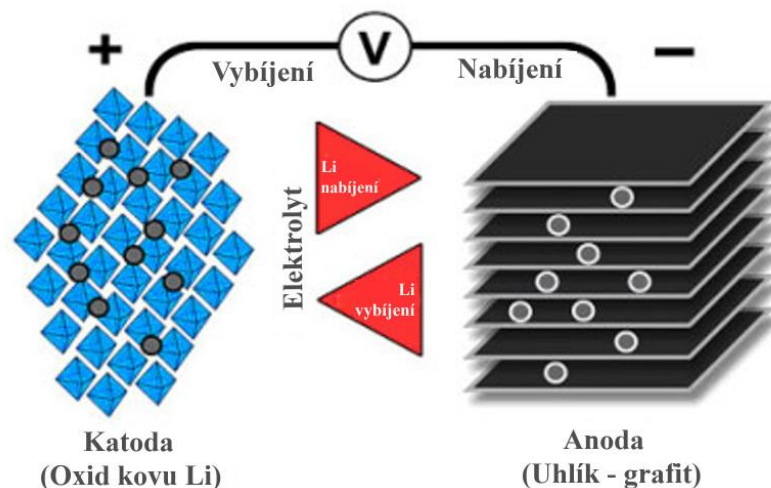
Akumulátory představují důležitou součást fotovoltaických systémů, neboť umožňují ukládání vyrobených přebytků elektrické energie z fotovoltaických panelů pro pozdější využití. Schopnost akumulovat elektrickou (či chemickou) energii je důležitá zejména u soběstačných a ostrovních systémů, které musí být schopny pracovat i při nepříznivých povětrnostních podmínkách nebo během noci.

V současné době se pro ostrovní či hybridní fotovoltaické systémy používají nejčastěji akumulátory na bázi lithia (Li) nebo olova (Pb). S postupným vývojem technologií a cen různých druhů lithno-iontových článků se jejich podíl na trhu neustále zvyšuje [18].

3.1 Lithno-iontové akumulátory

Lithno-iontové články se díky neustálému vývoji a novým technologiím postupně stávají nejrozšířenějším typem akumulátoru. Využití Li-ion článků je velmi široké: od veškeré přenosné elektroniky, přes elektromobily až po hybridní fotovoltaické systémy a stacionární úložiště energie. Mezi hlavní výhody těchto článků patří vysoká hustota energie, nízký vnitřní odpor, lineární pokles napětí nebo absence paměťového efektu. Typické napětí článku se pohybuje v rozmezí 3,20 – 3,60 V, v závislosti na použitém katodovém materiálu [18].

Li-ion články se skládají z kladné a záporné elektrody, separátoru a elektrolytu. Katoda je tvořena zpravidla oxidem kovu a anoda porézním uhlíkem (grafit). Při vybíjení proudí ionty z anody do katody přes elektrolyt a separátor, při nabíjení je směr toku iontů opačný [19].



Obrázek 3.1 Princip funkce Li-ion akumulátoru [19]

Mezi nejčastěji používané katodové materiály Li-ion článků řadíme [20]:

- Lithium-kobalt-oxid – LiCoO_2 (LCO)
 - Nejstarší typ
- LiNiMnCoO_2 (NMC)
 - Vysoká energetická hustota a výkon, elektromobily, elektrokola, průmysl
- Lithium-železo-fosfát – LiFePO_4 (LFP)
 - Vysoká teplotní stabilita, nižší energetická hustota, bezpečné, stacionární úložiště energie (hybridní FV systémy)
- LiNiCoAlO_2 (NCA)
 - Vysoká energetická hustota, elektromobily Tesla

3.2 Srovnání různých typů akumulátorů

Parametry nejčastěji používaných typů akumulátorů jsou porovnány v tabulce níže:

Tabulka 3.1 Srovnání různých typů akumulátorů [21], [22], [23]

Typ akumulátoru	Energetická hustota [Wh/kg]	Nominální napětí [V]	Nabíjecí proud [C_{rate}]	Životnost [cykly]
Olověný (Pb)	30 - 50	2,00	0,1 C	150 - 300
Ni-Cd	45 - 80	1,20	1 C	1000
Ni-MH	60 - 120	1,20	0,5 - 1 C	300 - 500
Nejčastější typy Li-ion článků				
LiCoO_2 (LCO)	150 - 200	3,60	0,7 - 1 C	500 - 1000
LiNiMnCoO_2 (NMC)	150 - 220	3,60	0,7 - 1 C	1000 - 2000
LiFePO_4 (LFP)	90 - 120	3,20	1 C	1000 - 2000
LiNiCoAlO_2 (NCA)	200 - 260	3,60	1 C	500

3.3 Řízení akumulátorů

Pro bezpečný provoz akumulátorů je zapotřebí používat ochranné a řídicí obvody. Řízení jednotlivých akumulátorů nebo celého battery-packu je klíčovým prvkem v mnoha aplikacích, jako jsou např. elektrická vozidla, běžná přenosná elektronika nebo hybridní solární systémy. Hlavním cílem je optimalizace výkonu, použití ochran a prodloužení životnosti akumulátorů.

3.4 Battery Management System

Battery Management System (BMS) je hlavním prvkem při řízení a monitorování akumulátorů. Mezi hlavní funkce řadíme sledování a regulaci napětí, proudu, teploty, stavu nabití a další parametry akumulátoru. Součástí BMS bývají zpravidla i ochranné obvody a obvody určené k balancování (napěťovému vyrovnání) jednotlivých článků.

Typické provedení BMS je realizováno jako samostatná deska plošných spojů, ke které jsou připojeny jednotlivé akumulátory. Obsahuje mikrokontroler, integrované obvody, různé senzory, tranzistory a další prvky. Díky mikrokontroleru může BMS komunikovat s dalšími zařízeními pomocí různých protokolů (např. RS485, CAN, UART, aj.) nebo bezdrátově pomocí Wi-Fi a Bluetooth [24].

Mezi hlavní funkce patří například [24]:

- Měření napětí jednotlivých článků
- Měření celkového napětí a proudu battery-packu
- Výpočet SoC (State of Charge – stav nabití akumulátoru)
- Výpočet SoH (State of Health – životnost akumulátoru)
- Komunikace s dalšími zařízeními
- Balancování článků

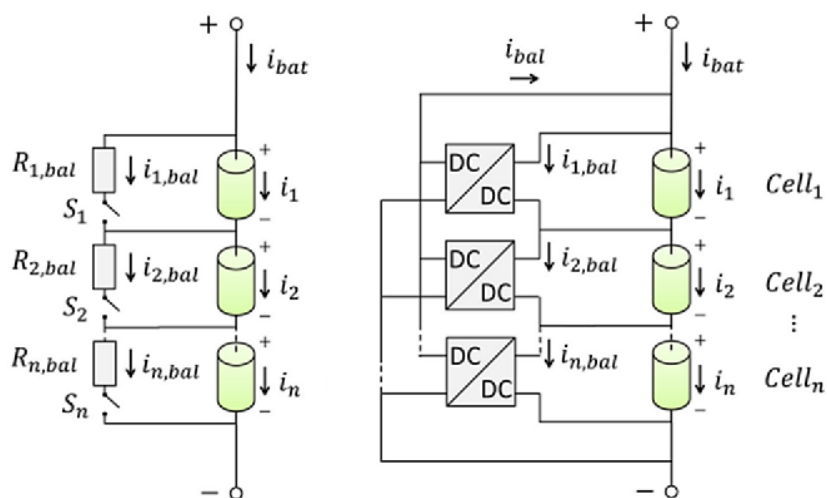
Zdroj [24] uvádí následující ochranné funkce:

- Ochrana proti nadměrnému vybití
- Ochrana proti přebití
- Ochrana proti nadproudům
- Ochrana proti zkratu
- Tepelná ochrana

3.5 Balancer článků

Balancer je typ obvodu, který umožňuje vyvažovat jednotlivé články battery-packu. Jedná se o důležitou část řízení akumulátorů. Jednotlivé články mohou mít menší či větší rozdíly v parametrech jako jsou např. celková využitelná kapacita nebo vnitřní odpor. S rostoucím opotřebením a stářím článků se rozdíly v parametrech zvětšují. Proto je tedy nutné při vybíjení (bottom balancing) nebo při nabíjení (top balancing) články navzájem vyrovnávat. Článek s nejhoršími parametry by jinak omezoval celou sestavu.

Balancery dělíme na dvě základní skupiny: pasivní a aktivní.



Obrázek 3.2 Pasivní balancer (vlevo) a aktivní balancer (vpravo) [25]

3.5.1 Pasivní balancování

Jedná se o nejčastěji používaný typ balancování. Princip činnosti je jednoduchý: jakmile dosáhne článek limitního nabíjecího napětí (typicky 4,2 V), dojde k sepnutí tranzistoru a další dodaná energie je mařena na výkonovém odporu ve formě tepla. Situace se opakuje pro ostatní články tak dlouho, dokud nedojde k úplnému nabití celého battery-packu. Pasivní přístup nejčastěji využívá metodu top balancing, neboli balancování při dosáhnutí horního limitního napětí [26].

Pasivní balancování je i přes výše uvedené nedostatky (maření energie ve formě tepla) nejpoužívanějším typem. Hlavním důvodem je jednoduchost provedení, a tudíž i nižší pořizovací cena.

3.5.2 Prediktivní pasivní balancování

Jedná se o modifikaci předchozího pasivního řešení. Hlavní rozdíl je v řízení počátku balancování. Systém používá uložená data o stavu a provozu jednotlivých článků. K balancování tudíž dochází dynamicky v průběhu nabíjecího procesu, nikoliv až na konci. Tato upravená metoda je často používána výrobcí elektrických vozů nebo hybridních fotovoltaických systémů.

3.5.3 Aktivní balancování

Při aktivním balancování je energie rovnoměrně „přelévána“ mezi jednotlivými články již během procesu nabíjení či vybíjení. Klíčovým prvkem aktivního balanceru je použití řízeného DC/DC měniče spolu s prvkem akumulujícím a následně uvolňujícím energii (např. cívka nebo kondenzátor) [26].

Hlavní výhodou aktivního systému je vysoká účinnost, jelikož dochází pouze k minimálním tepelným ztrátám. Nevýhodou může být vyšší náročnost a složitost obvodů a tím i vysoké pořizovací náklady.

3.6 Nabíjecí metody

Výběr správné nabíjecí metody je pro akumulátor důležité kritérium. Záleží hlavně na typu akumulátoru a na požadovaném času nabíjení. Mezi hlavní zástupce metod řadíme: nabíjení konstantním proudem (CC), nabíjení konstantním napětím (CV), jejich vzájemnou kombinaci (CCCV) nebo například víceúrovňové proudové nabíjení (MCC).

3.6.1 Konstantní proud (CC)

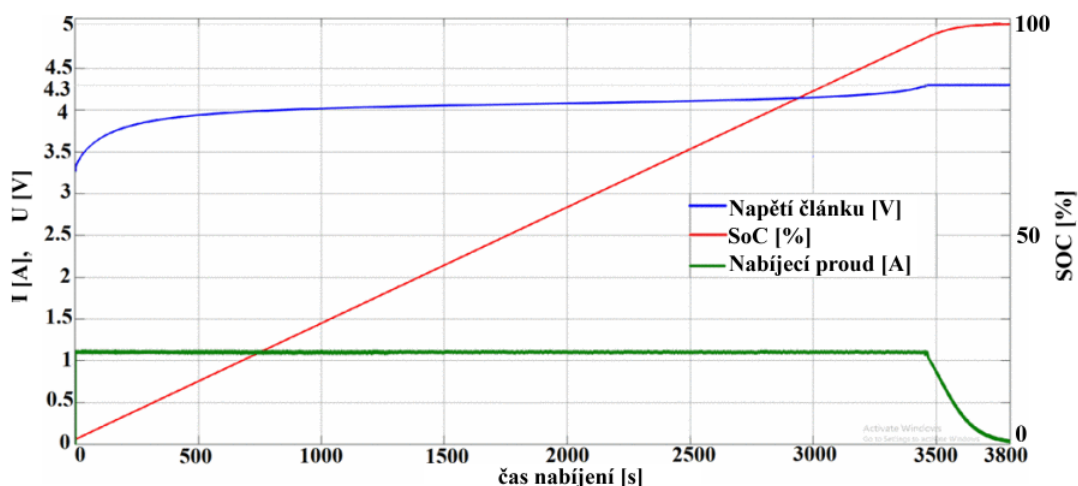
Nabíjení konstantním proudem (Constant Current – CC) je jednoduchá metoda, která využívá nabíjení menším konstantním proudem po celou dobu nabíjení. Nabíjení je ukončeno po dosažení předem definovaného stavu (např. mírný pokles napětí). Včasné ukončení nabíjení je důležité, jinak by mohlo dojít k přebíjení a přehřátí akumulátoru. Tato metoda je převážně používána pro akumulátory na bázi niklu Ni-Cd a Ni-MH [27].

3.6.2 Konstantní napětí (CV)

Při této metodě je akumulátor po celou dobu nabíjen konstantním napětím (Constant Voltage – CV). Na počátku nabíjení má akumulátor nižší napětí, tudíž do něj teče vyšší proud. S postupem času se velikost proudu snižuje. Díky konstantnímu napětí nemůže dojít k přebíjení nebo přehřátí. Tato metoda nabíjení je používána ve většině klasických motorových vozidel, které obsahují alternátor a akumulátor na bázi olova.

3.6.3 Konstantní proud následovaný konstantním napětím (CCCV)

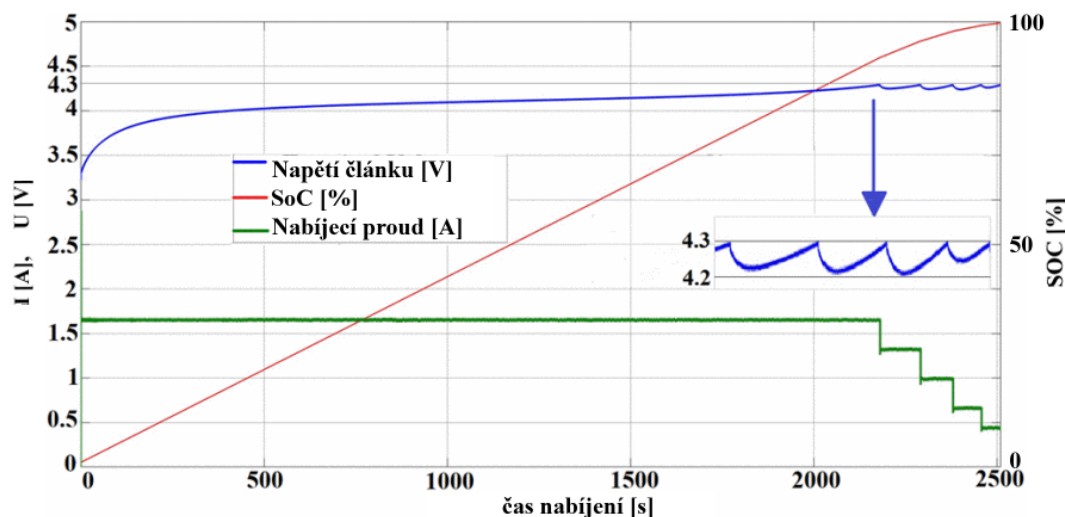
Metoda nabíjení konstantním proudem následovaná konstantním napětím (Constant Current followed by Constant Voltage – CCCV) je tvořena vzájemnou kombinací metod předešlých. Pro první část nabíjení je použita metoda CC. Jakmile dojde k dosažení limitního napětí článku, nabíjecí proces se přepne do módu CV a tím je akumulátor dobíjen do plné kapacity. Tímto přístupem nedochází k přebíjení akumulátoru. Ve fázi CC je však nutné zvolit takovou velikost proudu, která je optimální pro daný typ akumulátoru. Rychlé nabíjení vysokými proudy může mít negativní vliv na jeho životnost a počet cyklů. Nejčastěji se metoda CCCV používá pro nabíjení většiny druhů lithno-iontových a olověných akumulátorů [27].



Obrázek 3.3 Simulace průběhu nabíjení metodou CCCV ($1 C_{rate}$) [28]

3.6.4 Více-stupňové proudové nabíjení (MCC)

Metoda více-stupňového proudového nabíjení (Multi-level Constant Current – MCC) je jednou ze skupiny metod pro rychlé nabíjení. Obsahuje několik stupňů nabíjecích proudů, které se postupně snižují podle limitních hodnot napětí akumulátoru. Například zdroj [28] zmiňuje proudové rychlo-nabíjení pomocí 5 stupňů: $1,5 C_{rate}$, $1,2 C_{rate}$, $0,9 C_{rate}$, $0,6 C_{rate}$ a $0,4 C_{rate}$. Na tak vysoké proudy musí být akumulátor přizpůsoben, jinak by mohlo dojít k jeho poškození. Běžný bezpečný nabíjecí proud pro lithno-iontové akumulátory se pohybuje v rozmezí $0,5 - 1 C_{rate}$.

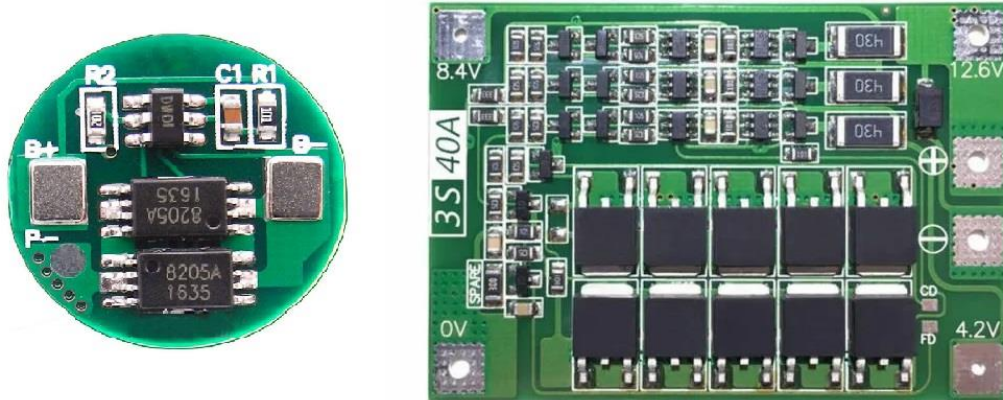


Obrázek 3.4 Simulace průběhu nabíjení pětistupňovou metodou MCC [28]

Autor [28] udává při použití metody MCC zkrácení doby nabíjení o 34 % oproti klasické metodě CCCV.

3.7 Ochranné obvody

Pro bezpečný provoz akumulátorů je použití ochranných obvodů velmi důležité. Hlavním úkolem ochran je zabránit kritickému stavu a tím i zničení či zahoření jednotlivých článků akumulátoru. Ochranný obvod může mít různé varianty provedení: např. samostatná ochrana umístěná přímo ve článku, externí ochranná deska plošných spojů nebo zabudování ochran přímo do BMS.



Obrázek 3.5 Různé možnosti realizace ochranných obvodů [29], [30]

3.7.1 Ochrana proti přepětí (přebití)

Ochrana proti přepětí (nebo přebití) je potřebná převážně při nabíjení akumulátoru. Pokud napětí překročí předem definovanou bezpečnou úroveň, ochrana zasáhne odpojením článku nebo rovnou celého battery-packu. Pokud by k odpojení nedošlo, hrozí tepelné namáhání článku nebo jeho vznícení. Práh bezpečného napětí je dán typem akumulátoru a jeho vnitřní konstrukcí. Obzvláště u lithno-iontových článků je třeba klást důraz na správné nastavení prahu napětí (cut-off voltage).

3.7.2 Ochrana proti nadměrnému vybití

Opačným problémem je nadměrné vybití akumulátoru. Ochrana tedy zajišťuje, aby napětí článku nekleslo pod bezpečnou úroveň. Pokud případ nastane, akumulátor je odpojen pro zamezení dalšího vybití. Přílišné vybití článků může způsobit ztrátu kapacity, částečný rozpad elektrod nebo celkové snížení životnosti. Práh vybití je nutné přizpůsobit provozním podmínkám, jako je například teplota článku nebo požadovaný vybíjecí proud [24].

Tabulka 3.2 Práh bezpečného napětí u lithno-iontových článků [31]

Technologie Li-ion	Limitní napětí nabíjení [V] (charge cut-off voltage)	Limitní napětí vybíjení [V] (discharge cut-off voltage)
LiFePO ₄	≤ 3,85 V	≥ 2,50 V
NMC	≤ 4,20 V	≥ 2,70 V
LCO	≤ 4,20 V	≥ 2,70 V

3.7.3 Ochrana proti nadproudům

Tento typ ochrany provede odpojení akumulátoru, pokud okamžitá hodnota odebíraného proudu překročí předem stanovený limit. Maximální povolená hodnota proudu je dána především typem akumulátoru a výrobní technologií. Při nastavení limitní hodnoty je vhodné uvažovat max. požadovaný proudový odběr nebo rozsah provozních teplot akumulátoru. Při velmi nízké teplotě je nutné vybíjecí proud omezovat, jinak by mohlo dojít k poškození článků.

3.7.4 Ochrana proti zkratu

Tato ochrana zasáhne v případě detekce zkratového proudu a akumulátor odpojí od zátěže. Při zkratu může dojít k velmi rychlému přehřátí, což vede k požáru nebo výbuchu článku. Ochrana proti zkratu může být provedena více způsoby nebo jejich vzájemnou kombinací. Jedním z nich je tepelná ochrana, která zasáhne při dosáhnutí limitní teploty a akumulátor odpojí. Dalším častým řešením je použití klasické pojistky nebo elektronického odpojení [24].

3.7.5 Tepelná ochrana

K tepelnému přehřátí akumulátoru může dojít při dlouhém zatížení vysokými proudy, nevhodném nabíjení či zkratu. Přehřátí může vést ke vznícení nebo výbuchu článku. Maximální povolená teplota je daná výrobcem a také záleží na výrobní technologii. Teplota, při které dojde k odpojení článků, se řádově pohybuje v rozsahu 60 – 80 °C [24].

Většina moderních článků již obsahuje tepelnou ochranu integrovanou v samotné konstrukci, především z důvodu bezpečnosti a prevenci požáru. Taková ochrana může být realizována PTC termistory nebo pojistkou.

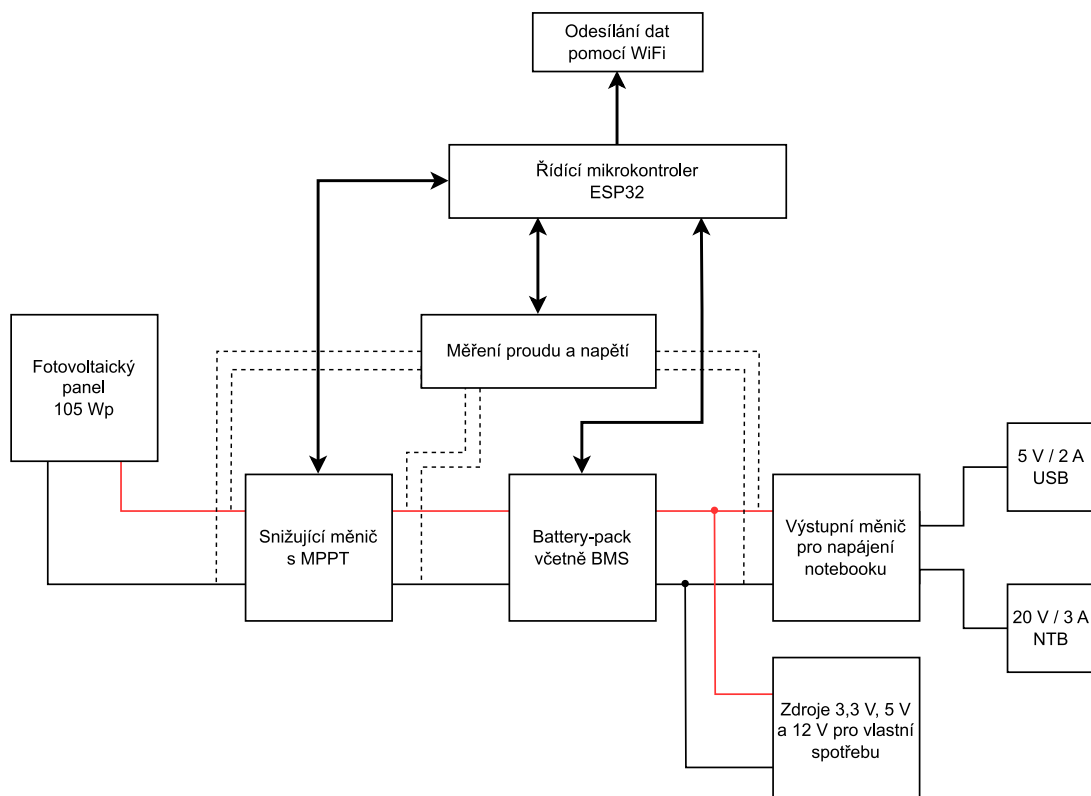
4. VLASTNÍ ŘEŠENÍ – HARDWARE

Tato kapitola je zaměřena na návrh a následnou realizaci obvodového řešení. Součástí řešení je výběr vhodného fotovoltaického panelu a akumulátoru nebo stanovení mezních parametrů zařízení. Následně jsou rozebrány jednotlivé funkční části zařízení, včetně obvodových schémat s popisem.

4.1 Koncepce

Cílem práce je návrh ostrovního elektronického systému, který je schopen nabíjet notebook či další externí zařízení. Systém musí obsahovat dostatečně výkonný fotovoltaický panel pro zajištění výroby i při méně příznivých povětrnostních podmínkách. Požadavek na kapacitu battery-packu je takový, aby byl schopen plně nabít průměrný akumulátor notebooku, a ještě zbyla kapacita pro vlastní provoz (například během noci). Řízení a správa celého systému je zajištěna pomocí mikrokontroleru. Dalším požadavkem je bezdrátové odesílání důležitých dat do dalších zařízení (např. výkony jednotlivých částí nebo zbývající kapacita battery-packu).

Koncepční schéma zařízení je zobrazeno na následujícím obrázku:



Obrázek 4.1 Koncepční schéma fotovoltaického systému

V následující tabulce jsou definovány mezní a požadované parametry zařízení, které je třeba dodržet z důvodu použitých komponent obvodového řešení.

Tabulka 4.1 Mezní a požadované parametry zařízení

Popis parametrů	Parametry	Hodnoty
Maximální vstupní napětí	U_{INMAX}	80 V
Maximální vstupní proud	I_{INMAX}	10 A
Maximální výstupní napětí výkonové části	U_{OUTMAX}	50 V
Maximální výstupní proud výkonové části	I_{OUTMAX}	15 A
Účinnost MPPT výkonové části	μ	> 85 %
Celková účinnost	μ	> 75 %
Kapacita akumulátoru	E	> 60 Wh
Výstupní výkon nabíječky notebooku	P_{OUTNTB}	> 60 W

4.2 Parametry FV panelu

Pro realizaci bakalářské práce byl zvolen křemíkový tenkovrstvý panel výrobce Kaneka s maximálním výkonem 105 W_p. Ačkoliv již tento modul neodpovídá současným trendům a výkonům, pro realizaci projektu naprosto dostačuje. Rozměry panelu jsou 1210x1008 mm, tudíž ho lze stále označit za přenosný. Při maximálním výkonu 105 W_p můžeme v našich geografických podmínkách očekávat průměrný výkon přes celý den kolem 60-70 W. Tato hodnota přibližně odpovídá maximálnímu výkonu, kterým lze bezpečně nabíjet battery-pack při nabíjení proudem 0,5 C. Zároveň bude systém schopen pracovat lépe při částečně zatažené obloze či nepříznivých podmínkách.

Veškeré důležité parametry jsou uvedeny v tabulce níže:

Tabulka 4.2 Parametry fotovoltaického modulu Kaneka HB105 [32]

Popis parametrů	Parametry	Hodnoty
Jmenovitý výkon	P_{max}	105 W _p
Napětí v bodě max. výkonu	U_{MPP}	53,5 V
Proud v bodě max. výkonu	I_{MPP}	1,96 A
Napětí naprázdno	U_{OC}	71 V
Zkratový proud	I_{SC}	2,4 A
Účinnost	μ	8,6 %
Teplotní součinitel pro I_{SC}	ΔI_{SC}	+0,10 %/K
Teplotní součinitel pro U_{OC}	ΔU_{OC}	-248 mV/K
Teplotní součinitel pro P_{max}	ΔP_{max}	-0,33 %/K

4.3 Výroba a parametry battery-packu

Pro systém byl vyroben battery-pack obsahující celkem 14 kusů Li-Ion článků velikosti 18650 v zapojení 7S2P. Kvůli relativně vysokému výkonu fotovoltaického panelu bylo nutné použít sérioparalelního zapojení, jinak by mohlo docházet k přebíjení a částečné degradaci článků. Provozní rozsah napětí celého battery-packu je 21 – 29,4 V, což odpovídá požadovanému napětí výstupního měniče 20 V. Technické parametry jsou uvedeny v tabulce níže.

Tabulka 4.3 Parametry článků Li-ion 18650

Popis parametrů	Parametry	Hodnoty
Maximální napětí článku	U_{MAX}	4,2 V
Nominální napětí článku	U_{TYP}	3,6 V
Maximální nabíjecí proud článku	I_{CHRG}	1,5 A
Maximální vybíjecí proud článku	I_{MAX}	10 A
Změřená kapacita článku	C	1600 mAh
Změřená energetická hustota		130 Wh/kg
Provozní napětí battery-packu	U	21 – 29,4 V
Celková kapacita battery-packu	E	80 Wh

Samotný battery-pack byl poskládán z již používaných článků velikosti 18650. Z celkově dostupných 30ks článků bylo za pomoci chytré nabíječky LiitoKala vybráno 14ks s nejlepšími parametry a nejvyšší hodnotou změřené kapacity. Tato nabíječka disponuje módem „test“, při kterém dojde ke kompletnímu cyklu baterie (nabíjení, vybíjení a znovu nabíjení).



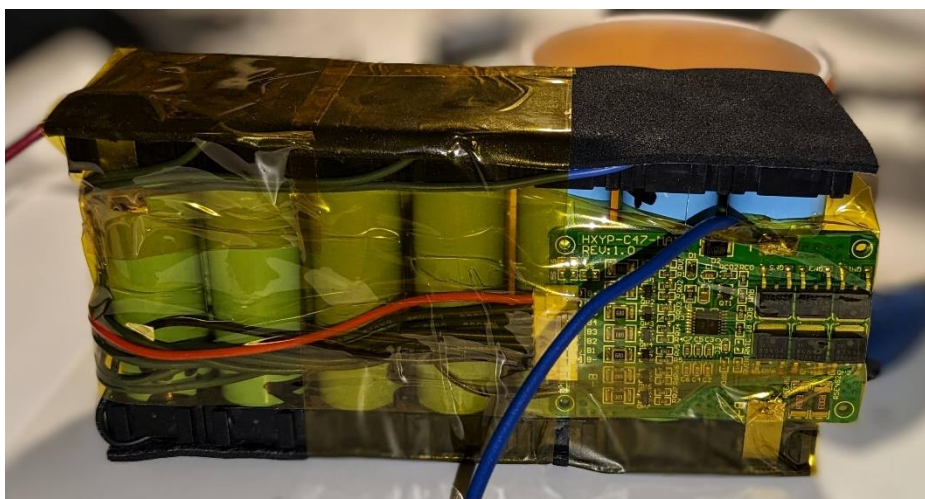
Obrázek 4.2 Testování jednotlivých článků chytrou nabíječkou

Následně byly články poskládány s ohledem na změřenou (reálnou) kapacitu. Spojení článků do sérioparalelní kombinace je zajištěno pomocí niklových plíšků a bodovací svářečky, které můžeme pozorovat na obrázku 4.3.



Obrázek 4.3 Vyroběný a nabíjený battery-pack 7S2P

Na obrázku 4.4 můžeme pozorovat kompletně sestavený battery-pack, který byl osazen vhodnou BMS a izolačním materiálem.



Obrázek 4.4 Kompletní battery-pack včetně BMS a izolace

4.4 Řídící část – mikrokontroler

Mikrokontroler je hlavním stavebním blokem celého zařízení, který zajišťuje mnoho důležitých funkcí. Mezi ně patří například zpracování měřených hodnot napětí a proudů, výpočet řídicího algoritmu MPPT, veškeré ochranné a bezpečnostní opatření nebo komunikace s periferiemi či externím zařízením.

Při výběru byly zohledněny parametry jako jsou např. výpočetní výkon, počet vstupů/výstupů (I/O) a jejich rozlišení nebo integrace Wi-Fi a Bluetooth přímo v čipu.

4.4.1 ESP32-DevKitC

Po zvážení všech parametrů a možností byl vybrán 32-bit mikrokontroler ESP32 společnosti Espressif, respektive vývojová deska ESP32-DevKitC. Tato platforma obsahuje výkonný dvoujádrový procesor o maximálním taktu až 240 MHz, 4 MB flash paměti, 520 kB RAM, 12-bit ADC a 34 I/O pinů pro připojení externích zařízení a komunikaci. Dále je v čipu integrován modul Bluetooth (V4.2 a BLE) a Wi-Fi modul (IEEE 802.11 b/g/n) [33].

Platforma ESP32 byla zvolena především kvůli dostatečně výkonnému procesoru, nízké spotřebě a integraci rozhraní Bluetooth a Wi-Fi. Procesy lze totiž rozdělit mezi 2 jednotlivá jádra, kde první jádro může být využito pro výpočty bodu maximálního výkonu a měření důležitých veličin a druhé jádro může obsluhovat bezdrátové odesílání dat do externích zařízení. Oba procesy tudíž mohou pracovat nezávisle na sobě, a tím zrychlit smyčku sledovacího algoritmu a vyhodnocení dat.

4.4.2 ESP32 vs ATmega328P

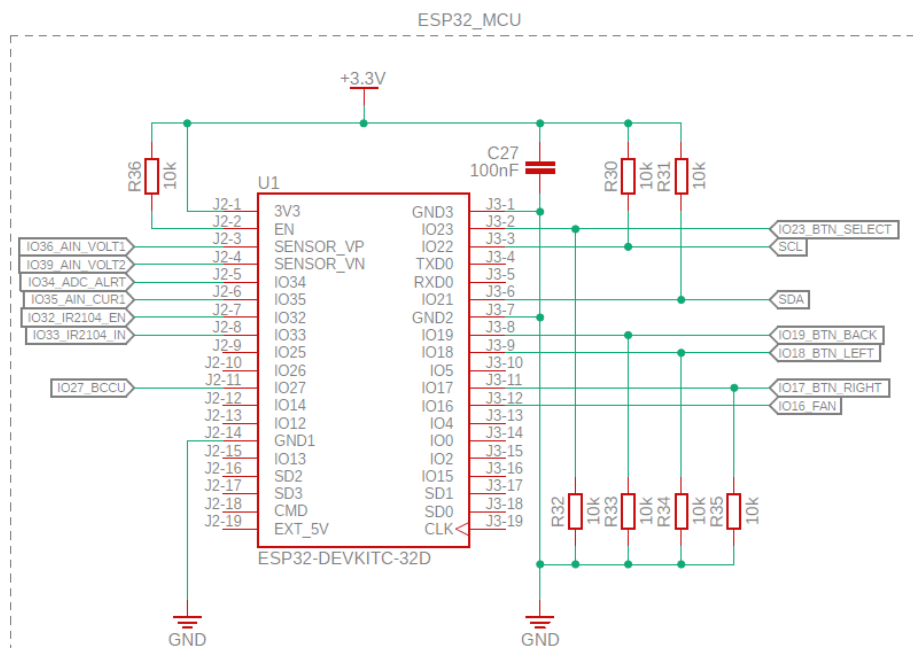
Jednou z alternativních možností bylo použití mikrokontroleru (vývojové desky) obsahující čip ATmega328P. Jedná se o rozšířenou a často používanou platformu značky Arduino, konkrétně Arduino UNO a NANO. Platforma obsahuje jednojádrový 8-bit mikrokontroler s maximální frekvencí 16 MHz, 32 kB paměti typu flash a 2 kB RAM. Dále čip obsahuje až 23 I/O vstupů a komunikaci pomocí UART, SPI nebo I2C.

Důvodů, proč nebyl zvolen mikrokontroler ATmega328P, je hned několik. Analogově-digitální převodník (ADC) je pouze 10bitový, tudíž může nabývat 1024 různých hodnot. Při vstupním napětí (výkonové části) 0 – 80 V dosahuje ADC rozlišení 78 mV, což pro přesné měření a implementaci MPPT algoritmu není dostačující. Celkový výpočetní výkon při frekvenci 16 MHz a velikost paměti také nejsou optimální pro velké množství výpočtů. Posledním a důležitým nedostatkem je absence integrovaného rozhraní Wi-Fi či Bluetooth, bylo by nutné používat další externí moduly.

Tabulka 4.4 Srovnání parametrů ESP32 a ATmega328P [34], [35]

Popis parametrů	ESP32	ATmega328P
Flash paměť	4 MB	32 kB
RAM	520 kB	2 kB
Max. pracovní frekvence	240 MHz	16 MHz
Počet jader	2	1
Pracovní napětí	3,3 V	5 V
Spotřeba proudu	80 – 90 mA	45 – 80 mA
Počet I/O pinů	36	až 23
Rozlišení ADC	12 bit	10 bit
Wi-Fi	Ano, 802.11 b/g/n	Ne

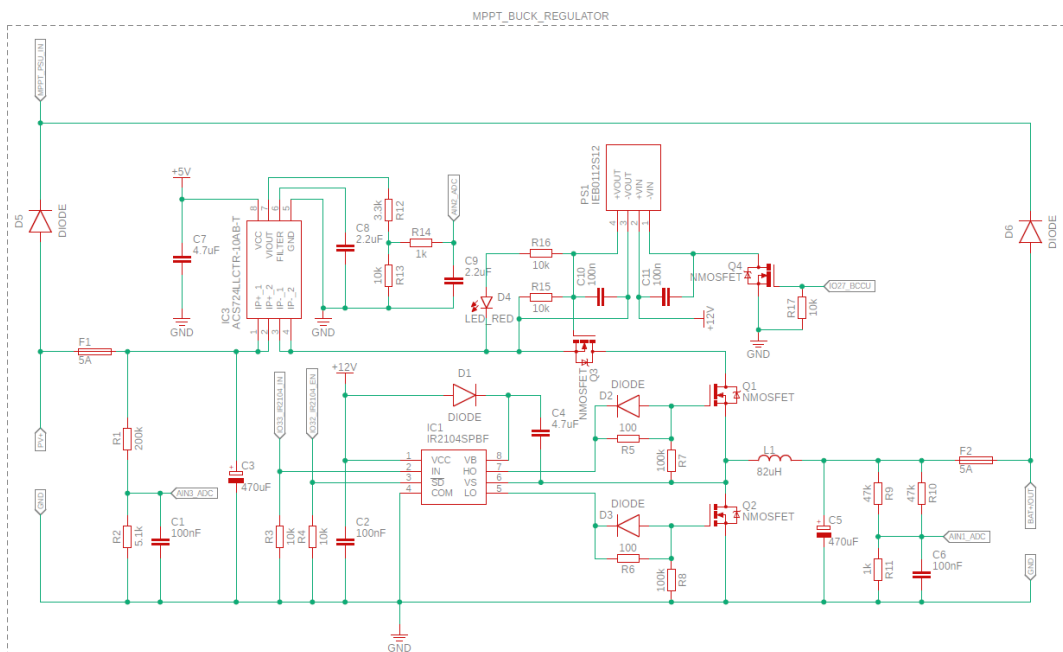
4.4.3 Obvodové schéma řídicí části



Obrázek 4.5 Obvodové schéma řídicí části

4.5 Výkonová část – Snižující měnič s MPPT

Výkonová část je koncipována jako synchronní snižující DC/DC měnič. Návrh topologie synchronního měniče včetně důležitých ochranných opatření byl inspirován dle zdroje [36]. Běžný asynchronní měnič dosahuje účinnosti v rozsahu 75–85 %. Nejvyšší vliv na výslednou účinnost má úbytek napětí na zpětné (blokové) diodě D (viz kapitola 2.2). Pokud je zpětná dioda nahrazena např. dalším MOSFET tranzistorem, klesne úbytek napětí (a tím i výsledné tepelné ztráty) na minimum. Je však zapotřebí dbát zvýšené opatrnosti při spínání těchto tranzistorů (Q1 a Q2), jinak by mohlo dojít ke zkratu. Dále je třeba klást důraz na co nejnižší odpor tranzistoru při sepnutém stavu, tzv. $R_{DS(ON)}$. Takový synchronní měnič může dosahovat účinnosti až 95 %.



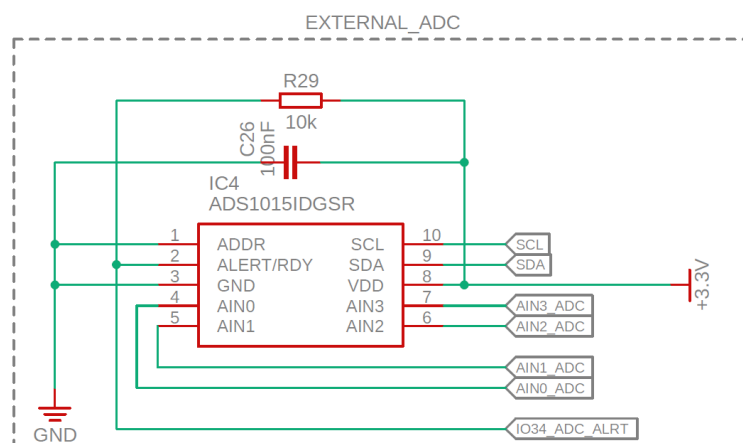
Obrázek 4.6 Obvodové schéma výkonové části

4.5.1 Měření napětí – ADS1015

Pro měření napětí byl vybrán obvod ADS1015 firmy Texas Instruments. Jedná se o 12bitový převodník analogového signálu na digitální (ADC), který obsahuje 4 analogové vstupy s programovatelným rozsahem a rychlostí, možnost nastavení adresy, komunikaci po sběrnici I2C nebo např. vnitřní referenci napětí.

Hlavní kritériem pro výběr byla zmíněná vnitřní referenční napětí a linearita převodníku v celém rozsahu měření. Pro správnou funkci MPPT algoritmu je zapotřebí poměrně přesných, a hlavně stabilních hodnot napětí a proudů. Mikrokontroler ESP32 obsahuje také integrovaný ADC převodník, avšak kvůli nízké přesnosti a nelinearitě při krajních hodnotách rozsahu měření nebyl pro tento účel využit.

Rozsah převodníku ADS1015 byl zvolen 0 - 2,048 V, čemuž odpovídají i vstupní R1 a R2 či výstupní R9, R10 a R11 děliče napětí, které můžeme pozorovat na obrázku 4.6.



Obrázek 4.7 Schéma obvodu ADS1015

4.5.2 Měření proudu – ACS724

Měření proudu zajišťuje integrovaný obvod ACS724 společnosti Allegro Microsystems. Jedná se o izolovaný proudový senzor fungující na principu hallova jevu. Obvod disponuje velmi nízkým vnitřním odporem $R = 1,2 \text{ m}\Omega$, obousměrným měřením proudu a rozsahem $\pm 10 \text{ A}$. Jedinou nevýhodou je absence vnitřní reference napětí, tudíž je zapotřebí zajistit stabilní napájení.

Napěťový dělič R12 a R13 upravuje výstupní rozsah napětí pro ADC. Kombinace R14 a C9 tvoří RC filtr pro lepší potlačení rušení či šumu (obrázek 4.6).

4.5.3 Budič MOSFET – IR2104

Pro správné spínání je zapotřebí použít budič MOSFET tranzistorů (Q1 a Q2), respektive budič s nábojovou pumpou. Budič musí zajistit dostatečné napětí pro Gate tranzistorů, aby došlo k úplnému otevření a saturaci. Topologicky se jedná o zapojení typu polomost (tzv. half-bridge).

Pro aplikaci byl vybrán obvod IR2104 výrobce International Rectifier, který je schopný spínat tranzistory až do napětí 600 V. Hlavním kritériem pro výběr ale byla integrovaná funkce prodlevy (deadtime) a spínání obou tranzistorů jedním signálem. Budič tedy pro funkci vyžaduje pouze jeden PWM vstupní signál (pin IN), což výrazně usnadňuje implementaci v kódu. Přivedením log. 0 na pin SD lze oba tranzistory vypnout [37].

4.5.4 Opatření proti zpětnému toku proudu

Jedná se o problém, který může nastat v případě, že napětí fotovoltaického modulu bude nižší než napětí akumulátoru. Takového stavu lze dosáhnout například při velmi malém osvětlení či během pohotovostního režimu v noci. Vlastní struktura MOSFET tranzistoru (Q1) tvoří diodu, přes kterou i při vypnutém stavu tranzistoru uniká malý proud. Tento

malý proud by však během nočních hodin způsoboval pomalé vybíjení akumulátoru, což je nežádoucí [38].

Řešením je použití dalšího MOSFET tranzistoru (Q3) v reverzním směru. Pro spínání je však nutné použít budič nebo izolovaný DC/DC měnič, jelikož se jedná o vysokonapěťovou část obvodu. V obvodovém řešení bylo využito izolovaného 12 V DC/DC měniče a spínání pomocí mikrokontroleru.

4.5.5 Výběr cívky a filtračních kondenzátorů

Z důvodu dimenzování DC/DC měniče pro vyšší výkony byla zvolena tlumivka (L1) značky Bourns o indukčnosti $L = 82 \mu\text{H}$ a saturačním proudem $I_{\text{SAT}} = 23,1 \text{ A}$. Systém by tak teoreticky měl být schopen pracovat až se třemi solárními moduly zapojenými paralelně, což odpovídá maximálnímu výkonu 315 W_p . Pro filtrační kondenzátory (C3 a C5) byla s větší rezervou zvolena hodnota $C = 470 \mu\text{F}$.

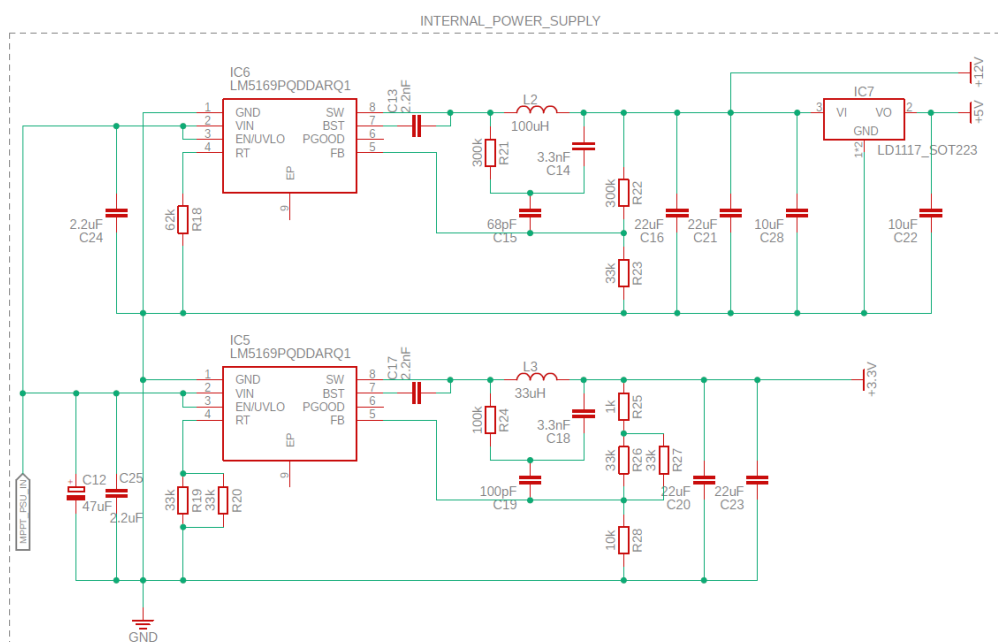
Pro výpočet hodnot byla použita následující kalkulačka [39]:

Tabulka 4.5 Výpočet hodnot cívky a filtračních kondenzátorů (upraveno z [39])

MPPT: KALKULAČKA NÁVRHU SYNCHRONNÍHO MĚNIČE			
Požadované parametry	Hodnota	Jednotka	Popis
U_{mpp}	53,5	V	Maximální napětí solárního panelu
I_{mpp}	5,88	A	Maximální proud solárního panelu
U_{batt}	25,2	V	Maximální napětí baterie
f_{sw}	39	kHz	Spínací frekvence tranzistoru
			Popis
U_{ripple}	0,05	V	Zvlnění napětí na výstupu
$\% I_{\text{ripple}}$	35	%	Procentuální zvlnění proudu
$\% \text{efficiency}$	96	%	Předpokládaná efektivita
Řešené parametry			Popis
P_{solar}	314,58	W	Maximální výkon solárních panelů
D	49,07	%	Střída PWM signálu za daných podmínek
ΔI	4,37	A	Maximální trvalý proud MOSFET tranzistorem
I_{pk}	14,67	A	Špičkový proud tlumivkou – peak current
L	81,49	μH	Požadovaná indukčnost cívky/tlumivky
C_{out}	280,07	μF	Požadovaná kapacita výstupního kondenzátoru

4.6 Zdroje pro vlastní spotřebu

V této části je rozebrán návrh a výběr hodnot součástek zdrojů napětí 12 V, 5 V a 3,3 V pro vlastní spotřebu zařízení. Pro větve 12 V a 3,3 V bylo použito efektivních snižujících DC/DC měničů a pro větev 5 V byl použit lineární regulátor.



Obrázek 4.8 Obvodové schéma interních zdrojů

4.6.1 Snižující měnič 12 V – LM5169

Pro napájení 12 V větve byl použit integrovaný obvod LM5169 společnosti Texas Instruments. Jedná se o synchronní snižující měnič napětí s maximálním zatížením $I_{\max} = 0,65$ A a pracovním rozsahem napětí $U = 6 - 120$ V. Čip obsahuje již integrované NMOSFET tranzistory, čímž v kombinaci se synchronním zapojením dosahuje vysoké účinnosti.

V následující části je rozebrán výpočet a následný výběr hodnot součástek dle dostupných vzorců a referenčního zapojení z datasheetu [40].

Velikost odporu R_T (R18) určuje výslednou spínací frekvenci měniče F_{SW}

$$R_T [k\Omega] = \frac{V_{OUT} \cdot 2500}{F_{SW} [kHz]} = \frac{12 \cdot 2500}{500} = 60 \text{ k}\Omega . \quad (4.1)$$

Zvolena byla nejbližší dostupná hodnota 62 k Ω , což odpovídá spínací frekvenci přibližně 484 kHz.

Indukčnost cívky L_2 je závislá na vstupním a výstupním napětí, spínací frekvenci a zvlnění proudu ΔI_L , které odpovídá přibližně 30 % maximálního proudu I_{\max}

$$L = \frac{V_{OUT}}{F_{SW} \cdot \Delta I_L} \cdot \left(1 - \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}\right) = \frac{12}{484000 \cdot 0,195} \cdot \left(1 - \frac{12}{60}\right) = 101,7 \text{ }\mu\text{H}. \quad (4.2)$$

Vybrána byla nejbližší dostupná hodnota 100 μH .

Odporový dělič R_{FBT} (R22) a R_{FBB} (R23) tvoří zpětnou vazbu pro regulaci napětí, kde V_{REF} je referenční napětí o hodnotě 1,2 V

$$R_{FBT} = R_{FBB} \cdot \left(\frac{V_{OUT}}{V_{REF}} - 1 \right) = 33000 \cdot \left(\frac{12}{1,2} - 1 \right) = 297 \text{ k}\Omega . \quad (4.3)$$

Zvolena byla nejbližší dostupná hodnota 300 k Ω .

Kondenzátor C_A (C14) a rezistor R_A (R21) tvoří RC filtr sloužící k efektivnímu potlačení zvlnění (rozkmitu) napětí

$$C_A \geq \frac{10}{F_{SW} \cdot R_{FBB} || R_{FBT}} = \frac{10}{500 \cdot 10^3 \cdot 33 \cdot 10^3 || 300 \cdot 10^3} \geq 672,73 \text{ pF} , \quad (4.4)$$

$$R_A \geq \frac{(V_{IN} - V_{OUT}) \cdot V_{OUT}}{0,02 \cdot V_{IN} \cdot F_{SW} \cdot C_A} = \frac{(60 - 12) \cdot 12}{0,02 \cdot 60 \cdot 500000 \cdot 3,3 \cdot 10^{-9}} \geq 290,91 \text{ k}\Omega . \quad (4.5)$$

Pro C_A (C14) byla zvolena hodnota 3,3 nF z důvodu zachování rozumné velikosti rezistoru R_A (R21), která činí v takovém případě 300 k Ω .

Kapacita vazebního kondenzátoru C_B (C15) je závislá na velikosti R_{FBT} a době ustálení regulační smyčky $T_R = 50 \mu\text{s}$ (typická hodnota)

$$C_B \geq \frac{T_R}{3 \cdot R_{FBT}} = \frac{50 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 300000} \geq 55,56 \text{ pF} . \quad (4.6)$$

Pro C_B (C15) byla zvolena hodnota 68 pF.

Velikost výstupní (filtrační) kapacity C_{OUT} (C16 a C21) je závislá na indukčnosti cívky, výstupním proudem, výstupním napětím a jejich zvlnění

$$C_{OUT} \geq \frac{L \cdot \left(I_{OUT} + \frac{\Delta I_L}{2} \right)}{3 \cdot \Delta V \cdot V_{OUT}} = \frac{100 \cdot 10^{-6} \cdot \left(0,65 + \frac{0,195}{2} \right)^2}{3 \cdot 0,05 \cdot 12} \geq 31,04 \mu\text{F} . \quad (4.7)$$

Pro filtrační kondenzátory C_{OUT} (C16 a C21) byla s dostatečnou rezervou vybrána hodnota 2 x 22 μF (paralelní zapojení).

4.6.2 Regulátor 5 V – LD1117

Napájení 5 V větve je zajištěno lineárním regulátorem LD1117, který byl zvolen primárně z důvodu zjednodušení obvodového řešení. Jediná součástka využívající 5 V referenci napětí je proudový senzor. Odběr proudu je tak malý, že nižší efektivitu regulátoru můžeme zanedbat.

4.6.3 Snižující měnič 3,3 V – LM5169

Jedná se o obvod LM5169, který byl již v předchozí kapitole podrobně rozebrán. Pro zjednodušení zůstanou zachovány pouze výpočty hodnot součástek [40].

$$R_T [k\Omega] = \frac{V_{OUT} \cdot 2500}{F_{SW} [kHz]} = \frac{3,3 \cdot 2500}{500} = 16,5 \text{ k}\Omega, \quad (4.8)$$

$$L = \frac{V_{OUT}}{F_{SW} \cdot \Delta I_L} \cdot \left(1 - \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}\right) = \frac{3,3}{500000 \cdot 0,195} \cdot \left(1 - \frac{3,3}{60}\right) = 31,98 \text{ }\mu\text{H}. \quad (4.9)$$

Pro cívku L_3 byla vybrána nejbližší hodnota 33 μH .

$$R_{F_{BT}} = R_{F_{BB}} \cdot \left(\frac{V_{OUT}}{V_{REF}} - 1\right) = 100000 \cdot \left(\frac{3,3}{1,2} - 1\right) = 175 \text{ k}\Omega, \quad (4.10)$$

$$C_A \geq \frac{10}{F_{SW} \cdot R_{F_{BB}} || R_{F_{BT}}} = \frac{10}{500 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^3 || 175 \cdot 10^3} \geq 314,29 \text{ pF}, \quad (4.11)$$

$$R_A \geq \frac{(V_{IN} - V_{OUT}) \cdot V_{OUT}}{0,02 \cdot V_{IN} \cdot F_{SW} \cdot C_A} = \frac{(60 - 3,3) \cdot 3,3}{0,02 \cdot 60 \cdot 500000 \cdot 3,3 \cdot 10^{-9}} \geq 94,5 \text{ k}\Omega, \quad (4.12)$$

Pro C_A (C18) a R_A (R24) byly zvoleny hodnoty 3,3 nF a 100 k Ω .

$$C_B \geq \frac{T_R}{3 \cdot R_{F_{BT}}} = \frac{50 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 175000} \geq 95,24 \text{ pF}, \quad (4.13)$$

Pro C_B (C19) byla vybrána hodnota 150 pF.

$$C_{OUT} \geq \frac{L \cdot \left(I_{OUT} + \frac{\Delta I_L}{2}\right)}{3 \cdot \Delta V \cdot V_{OUT}} = \frac{33 \cdot 10^{-6} \cdot \left(0,65 + \frac{0,195}{2}\right)^2}{3 \cdot 0,05 \cdot 3,3} \geq 37,25 \text{ }\mu\text{F}. \quad (4.14)$$

Pro filtrační kondenzátory C_{OUT} (C20 a C23) byla vybrána hodnota 2 x 22 μF (paralelní zapojení).

4.7 Návrh výstupního měniče

Výstupní část určená pro nabíjení notebooku je koncipována jako asynchronní bezrozptylový DC/DC měnič. Návrh topologie bezrozptylového měniče byl inspirován dle zdroje [41]. Jedná se o asynchronní měnič se společnou zemí, který je schopen napětí snižovat i zvyšovat v závislosti na potřebách systému. Jelikož pracovní rozsah napětí battery-packu odpovídá $U_{BAT} = 21 - 29,4 \text{ V}$ a požadované výstupní napětí $U_{OUT} = 20 \text{ V}$, bylo nutné použít danou topologii měniče.

Výstupní napětí měniče je určeno pomocí rezistoru R1 a potenciometru R5. Celkový odpor lze tedy měnit v rozsahu 30 – 40 k Ω .

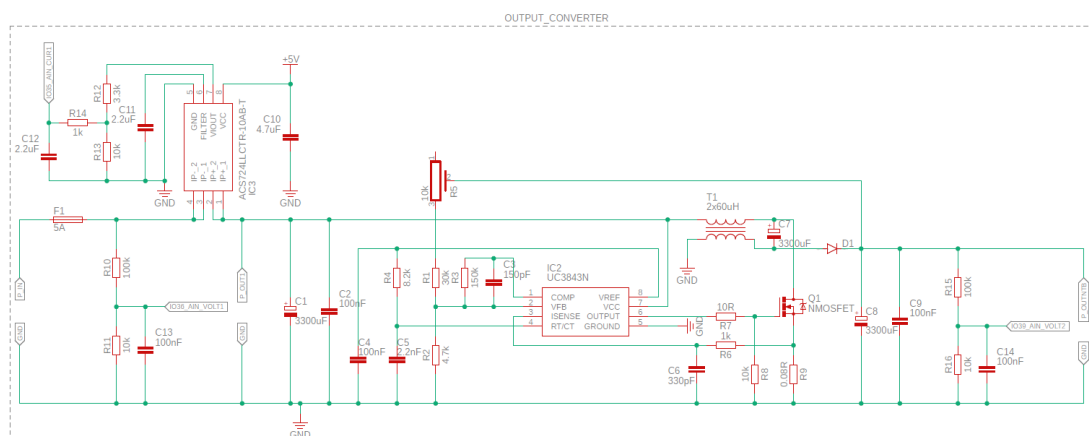
$$R_{1,5} = (U_{OUT} - 2,5) \cdot 1880, \quad (4.15)$$

Jednoduchou úpravou vzorce dostaneme

$$U_{výst} = \frac{R_{1,5}}{1880} + 2,5. \quad (4.16)$$

Ze vzorce plyne, že výstupní napětí lze pomocí potenciometru regulovat v rozsahu $U_{OUT} = 18,46 - 23,78 \text{ V}$. Možnost regulace výstupního napětí je v případě nabíjení

notebooku velmi důležitá, jelikož každý výrobce požaduje pro napájení jinou hodnotu napětí. Nejčastěji se jedná o hodnoty 19 V, 19,5 V nebo 20 V.



Obrázek 4.9 Obvodové schéma výstupního měniče pro nabíjení notebooku

Pro buzení N-MOSFET tranzistoru je použit integrovaný obvod UC3843 společnosti Texas Instruments [42]. Jedná se o řídicí obvod pro asynchronní měniče, který pracuje se spínací frekvencí až 500 kHz a napájecím napětím až 30 V. Spínací frekvenci f_{osc} lze vyjádřit vztahem

$$f_{osc} = \frac{1,72}{C_{CT} \cdot R_{RT}} = \frac{1,72}{2,2 \cdot 10^{-9} \cdot 8200} = 95,34 \text{ kHz} , \quad (4.17)$$

kde C_{CT} a R_{RT} odpovídá R4 a C5 ve schématu.

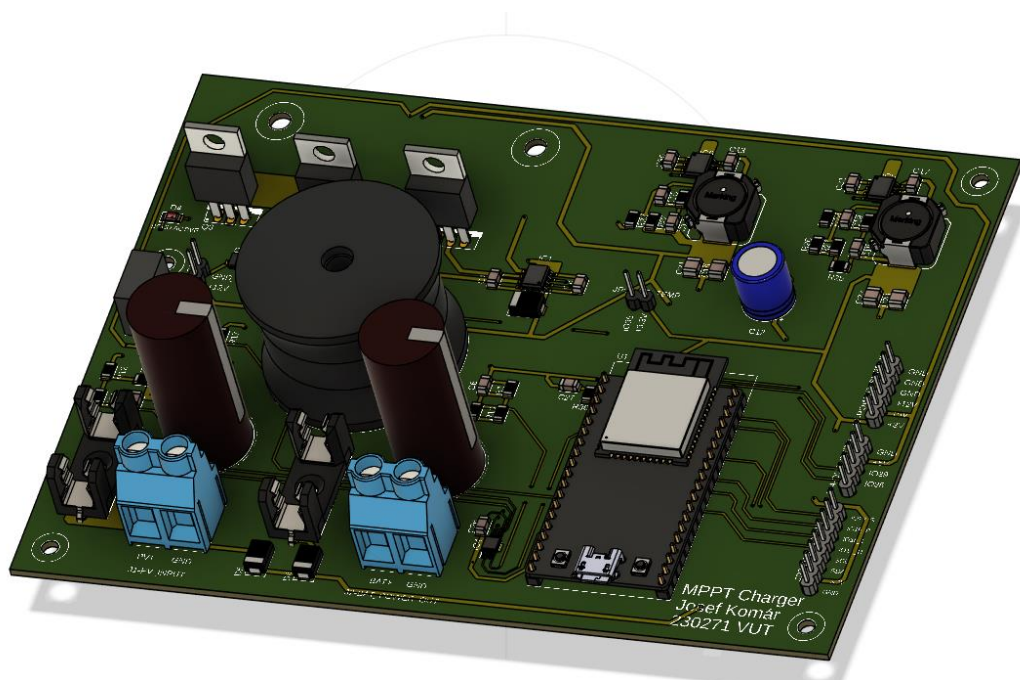
Měření proudu zajišťuje již dříve zmíněný proudový senzor ACS724. Rezistory R10 a R11 tvoří napěťový dělič pro měření vstupního napětí. Analogicky R15 a R16 slouží k měření výstupního napětí. Jelikož není zapotřebí takové přesnosti měření jako u výkonové části, je pro převod analogových hodnot použit převodník ADC1 mikrokontroleru ESP32. Mírnou nelinearitu převodníku v tomto případě lze zanedbat.

4.8 Návrh, výroba a osazení desky plošných spojů

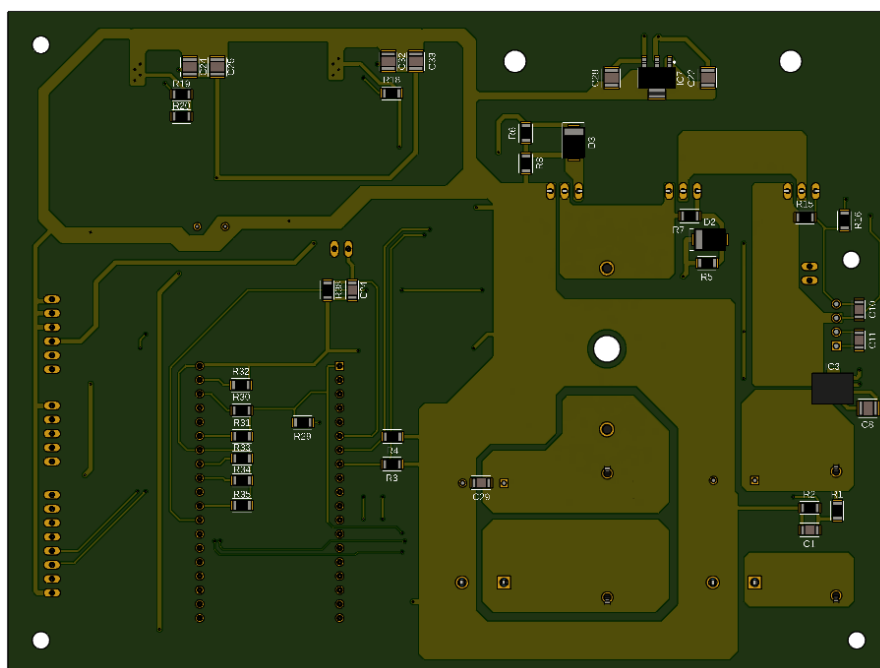
Návrh schémat a desky plošných spojů (DPS) byl proveden v programu Fusion 360 společnosti Autodesk, nástupce programů EAGLE [43]. Platforma umožňuje například 3D modelování desky plošných spojů, včetně potřebných elektronických součástek.

Nabíječ je koncipován jako dvouvrstvá DPS, kde spodní vrstva je využita převážně pro silovou část a horní vrstva pro napájení a signální cesty. Šírky cest byly zvoleny s dostatečnou výkonovou rezervou.

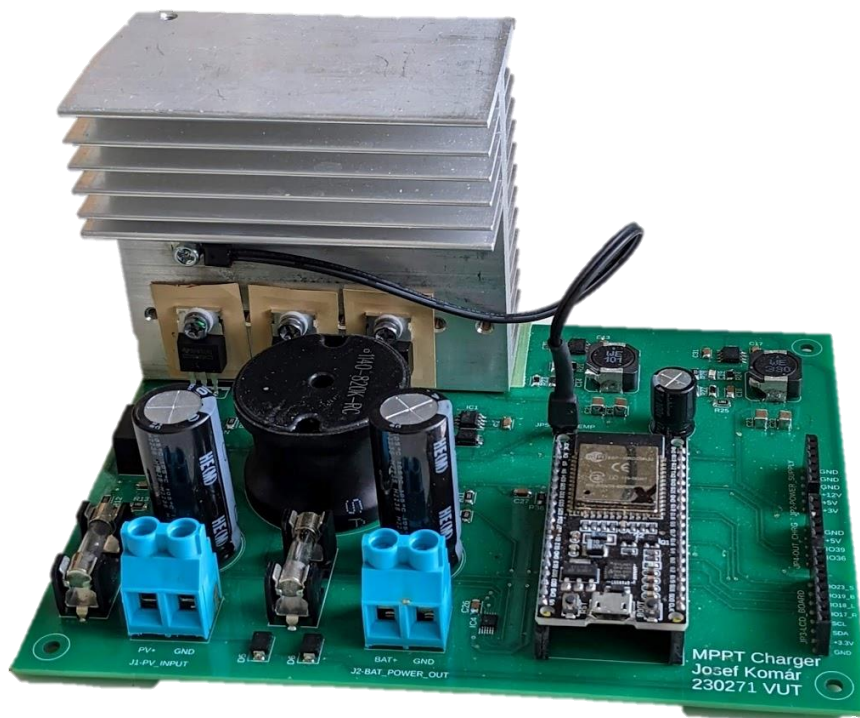
Pro výrobu DPS byl využit výrobce desek JLC-PCB [44], a to zejména z důvodu rychlosti výroby a náročnosti, vzhledem k počtu prokůvů a úzkých signálových cest. Vzhledem k výběru SMD součástek rozměrů minimálně 3216 (EU) bylo možné desku osadit pomocí mikropájky.



Obrázek 4.10 3D model desky plošných spojů (TOP)



Obrázek 4.11 3D model desky plošných spojů (BOTTOM)



Obrázek 4.12 Osazená deska plošných spojů včetně chladiče

4.9 Další použité komponenty

Kromě navržené a vyrobené MPPT nabíječky bylo pro finální kompletaci celého zařízení nutné využít i dalších dostupných obvodů, např. BMS pro zajištění balancování a důležitých ochran Li-ion článků 18650, snižující měnič USB-A pro napájení mobilních zařízení a senzor proudu AC712 pro měření proudu zátěží (notebook/USB).

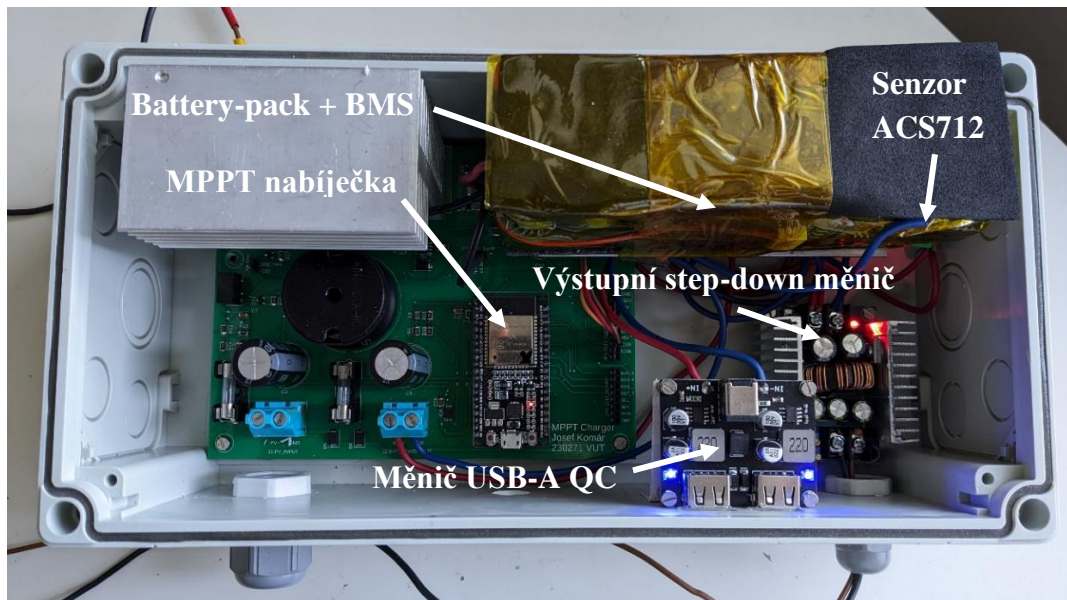
Navržený výstupní měnič bezrozptylové topologie nakonec nebyl v zařízení použit z několika důvodů. Jako problém se během návrhu ukázala absence regulace výstupního proudu, bez které by mohlo docházet k vybíjení battery-packu příliš vysokým proudem, což by mohlo vést k degradaci a poškození jednotlivých článků. Dalším negativem byla nutnost výroby transformátoru s dvojitým vinutím a prostorová náročnost celého návrhu. Jako náhrada pro napájení notebooku byl využit snižující (step-down) DC/DC měnič kompaktních rozměrů, který má pomocí dvou potenciometrů schopnost regulace výstupního napětí i výstupního proudu.

- **BMS 7S 20A**
 - Založeno na čipu CM1351-DAT
 - Pasivní balancer, ochrana proti přebití a podbití článku, ochrana proti zkratu, tepelná ochrana
 - Provozní rozsah napětí 4,25 – 2,70 V na článek
 - Trvalé proudové zatížení až 15 A

- **Výstupní step-down měnič pro napájení notebooku [45]**
 - Vstupní rozsah napětí 6 – 40 V
 - Regulace výstupního napětí v rozsahu 6 – 22 V (kde horní hranice je omezena nejnižším napětím battery-packu)
 - Regulace výstupního proudu 0 – 20 A (nastaveno na 3 A)
 - Výstupní výkon až 300 W
 - Výstupní zvlnění < 50 mV
- **Výstupní step-down měnič USB-A [46]**
 - Založeno na čipu IP6505 (Injoinic technology)
 - Vstupní rozsah napětí 6 – 32 V
 - Podpora rychlo-nabíjení QC3.0
 - Výstupní výkon až 24 W
- **Proudový senzor ACS712 20A [47]**
 - Analogový proudový senzor pracující na principu hallova jevu

4.10 Kompletace zařízení, cena

Pro kompletaci celého nabíječe byla použita elektroinstalační krabice, kterou můžeme vidět na obrázku 4.13. Montáž byla provedena vyvrtáním závitů M3 do plastové krabičky a následně použitím distančních sloupků a šroubků. Pro battery-pack a měnič pro napájení USB-A bylo nutné vytvořit „držáky“ z důvodu nedostatku místa v krabičce. Držáky jsou pro akumulátor vyrobeny z hliníkového L profilu, pro měnič postačil profil plastový.



Obrázek 4.13 Kompletní zařízení v elektroinstalační krabici



Obrázek 4.14 Kompletní zařízení s popisy na štítcích

V tabulce níže můžeme vidět přibližný výpočet celkové ceny zařízení. Jelikož fotovoltaický panel a elektroinstalační krabičku již autor práce vlastnil, byly cenové náklady mírně sníženy. Fotovoltaický panel a krabička by zařízení prodražily přibližně o 1500 Kč. Jedná se o ceny pouze za materiál, zařízení autor sestavil vlastnoručně.

Rozdíl ceny u objednaných součástek z obchodu Mouser je způsoben tím, že některých součástek (např. filtračních kondenzátorů, integrovaných obvodů, aj.) bylo preventivně objednáno více kusů do rezervy. Minimální počet pro výrobu DPS činil 5 kusů.

Tabulka 4.6 Výrobní cena zařízení

Položky	Cena – výrobní	Cena - autor
Součástky pro nabíječ - Mouser	1 400 Kč	1 800 Kč
Výroba DPS JLC-PCB 5ks + poštovné	180 Kč (1 ks)	900 Kč
BMS, 2x měnič, ACS712	450 Kč	450 Kč
ESP32 a příslušenství	300 Kč	300 Kč
Krabička, kabely, konektory MC3, průchodky	400 Kč	vlastní
FV panel Kaneka 105 W _p	1 000 Kč	vlastní
Články Li-Ion 18650 14x	1 050 Kč	300 Kč (použité)
Celková přibližná cena:	4 780 Kč	3 750 Kč

5. FIRMWARE A BEZDRÁTOVÉ ODESÍLÁNÍ DAT

Tato kapitola se zabývá návrhem firmware pro mikrokontroler ESP32 a realizací bezdrátového odesílání dat. Pro správnou funkci sledování maximálního bodu výkonu MPPT je zapotřebí implementovat vhodný algoritmus.

5.1 Návrh firmware

Firmware byl navrhnout pomocí programovacího rozhraní Arduino IDE [48]. Návrh kódu byl inspirován dle zdroje [49] a je rozdělen celkově do 7 částí (souborů). První a hlavní soubor obsahuje knihovny a definice veškerých vstupů a proměnných. Druhá část je věnována čtení a zpracování dat ze senzorů napětí, proudu a teploty. Třetí část se zabývá ochranným opatřením proti zpětnému toku proudu v noci. Čtvrtá část obsahuje nabíjecí procesy společně s aplikovaným MPPT algoritmem. Pátá část se zabývá ovládním ventilátoru a zápisem/čtením z vnitřní paměti. Šestá část zajišťuje sériový výpis dat pro kontrolu provozu a hodnot proměnných a v sedmé části je realizováno bezdrátové odesílání dat přes Wi-Fi pro platformu Blynk.

Pro spínání tranzistorů (respektive budiče IR2104) byl použit PWM výstup o rozlišení 11-bit a frekvenci 39 kHz. Hodnota PWM signálu tedy nabývá hodnot 0 až 2047. Programová smyčka jedné MPPT regulace trvá přibližně 30 ms, tudíž regulace pracuje rychlostí cca 33krát za sekundu. Regulační smyčka při zastínění FV panelu reaguje téměř okamžitě, bez jakékoliv prodlevy. Pro hodnoty měření napětí, proudu a teploty bylo nutné implementovat průměrování hodnot kvůli jejich stabilitě.

Použité knihovny pro firmware zařízení: „EEPROM.h, Wire.h, SPI.h, Wifi.h“ [48] pro obsluhu paměti, sériového monitoringu a připojení Wi-Fi, „BlynkSimpleEsp32.h“ pro bezdrátové odesílání dat na platformu Blynk [50] a „Adafruit_ADS1X15.h“ pro vyčítání hodnot A/D převodníku.

Zdrojový kód firmware je dostupný v příloze v datovém formátu „.ino“.

5.2 Bezdrátové odesílání dat – Wi-Fi

Pro bezdrátové odesílání dat pomocí Wi-Fi byla zvolena softwarová platforma Blynk [51]. Jedná se o intuitivní a moderní IoT platformu, která disponuje přehledným monitoringem požadovaných hodnot. Blynk obsahuje webové rozhraní i mobilní aplikaci pro systémy Android nebo IOS. Z odesílaných dat lze vytvářet grafy, zobrazovat okamžité hodnoty nebo tvořit grafické objekty. Pro účely externího zpracování dat je možné exportovat data v tabulkovém formátu .csv.

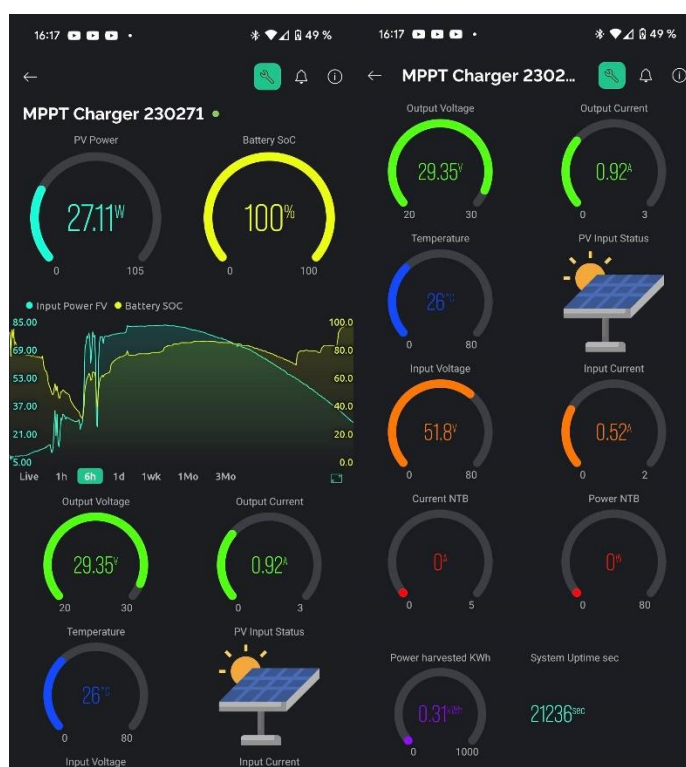
Mikrokontroler ESP32 v pravidelných intervalech (cca 2 s) odesílá veškerá důležitá data pomocí Wi-Fi na cloud systému Blynk. Díky cloudovému řešení si potřebné informace o stavu akumulátoru, aktuálním výkonu, okamžitých hodnotách napětí a proudu či teploty můžeme zobrazit odkudkoliv, zařízení není vázané pouze na místní

sít'. V kódu byla pro implementaci odesílání dat použita knihovna „BlynkSimpleESP32.h“ [50].

Navržené grafické zobrazení hodnot pro webovou i mobilní verzi můžeme pozorovat na obrázcích níže:



Obrázek 5.1 Vytvořené webové rozhraní platformy Blynk



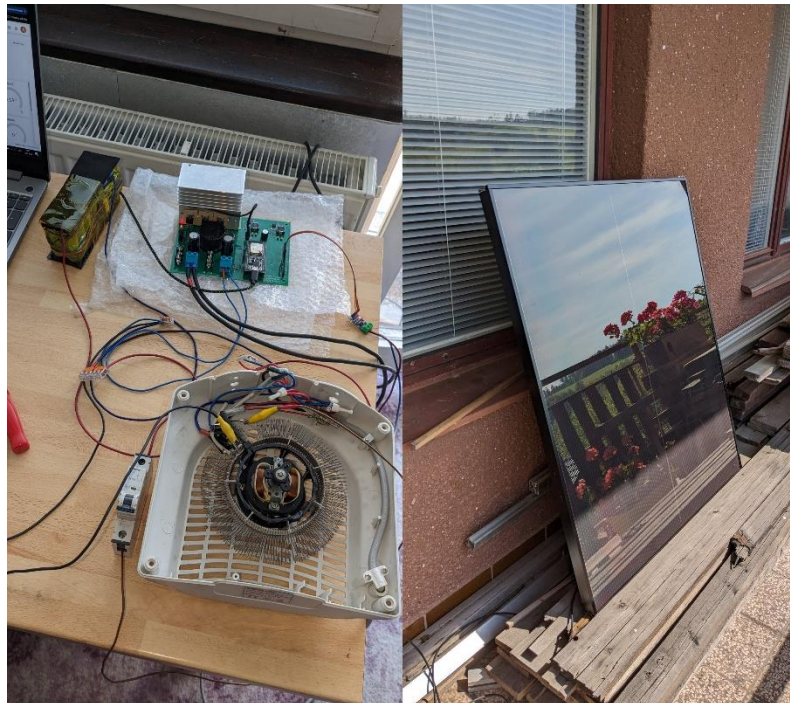
Obrázek 5.2 Vytvořené mobilní rozhraní platformy Blynk v systému Android

6. PRAKTICKÉ MĚŘENÍ NAVRŽENÉHO ZAŘÍZENÍ

Testovací měření pro získání dat bylo provedeno v neděli 12.5.2024 při téměř perfektním osvětlení bez oblačnosti. Potřebná data byla získána exportem ve formátu .csv z platformy Blynk.

Měření bylo započato přibližně kolem 10:00, kdy byl k zařízení připojen FV panel, což způsobilo skok hodnot napětí v grafech. Na pravé části obrázku 6.1 můžeme pozorovat FV panel opřený o fasádu s velkým zastíněním, které bylo způsobeno především stínem balkonu a domu. Za takových podmínek FV panel vyráběl 15 – 30 W. Přibližně v 11:30 byl fotovoltaický panel přemístěn tak, aby byla jeho plocha co nejvíce kolmá ke slunci a zároveň aby nedocházelo k zastínění. Panel byl tedy orientován na jih se sklonem přibližně 0 – 5°. Při nových podmínkách bylo dosaženo výkonu až 85 W. Na levé části obrázku 6.1 lze pozorovat testovací pracoviště pro praktické měření MPPT nabíječe. Jako provizorní laboratorní zátěž bylo využito topné těleso s celkovým odporem přibližně 30 Ω . Podle počtu připojených závitů bylo možné regulovat odpor tělesa a tím i výsledný výkon zátěže.

Současně bylo také provedeno kontrolní měření přesnosti napětí a proudů, které jsou odesílány mikrokontrolerem ESP32. Pro měření byl využit TRMS multimetr značky Fluke. Měřené hodnoty odpovídají skutečným hodnotám, naměřené odchylky byly menší než 0,5 %.

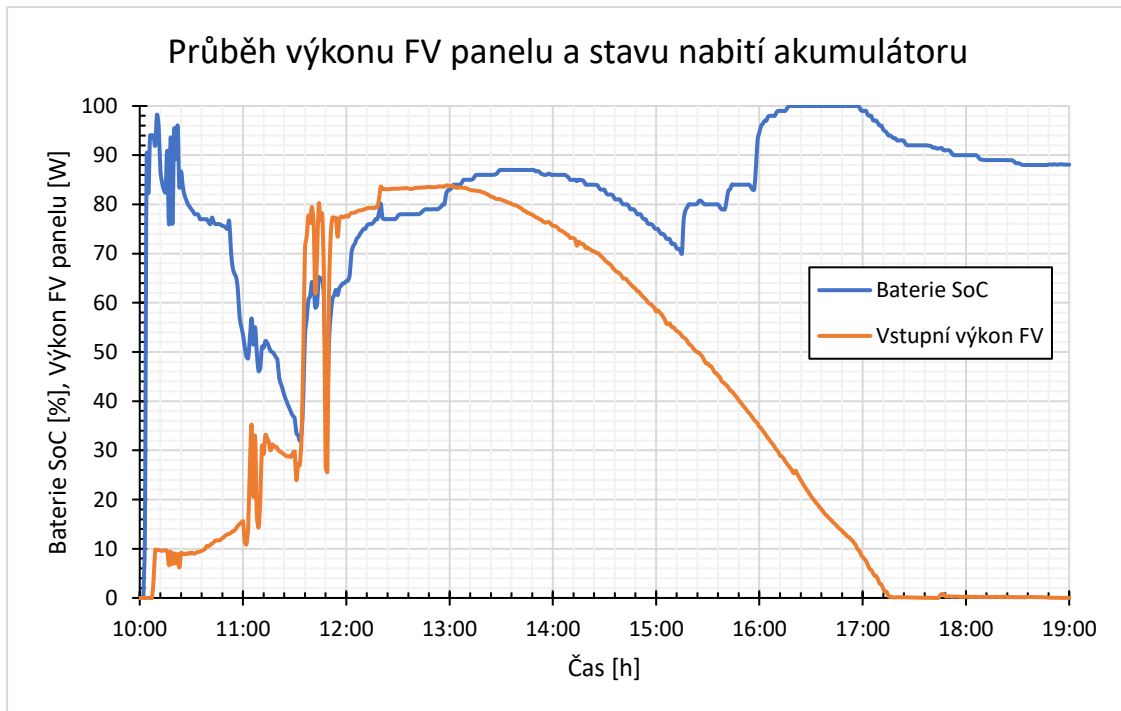


Obrázek 6.1 Praktické měření 12.5.2024 („laboratorní“ zátěž, FV panel)

6.1 Průběh výkonu FV panelu a stavu nabití akumulátoru

Na obrázku 6.2 můžeme pozorovat průběh výkonu tenkovrstvého FV panelu a stavu nabití (SOC) akumulátoru. Po přemístění panelu v 11:30 došlo k výraznému zvýšení vstupního výkonu. Maximální dodaný výkon kolem poledne se blížil k hodnotě 85 W, což odpovídá osvětlu přibližně 800 W/m². Udávaný špičkový výkon FV panelu je 105 W_p při standardních testovacích podmínkách STC - 1000 W/m². Rozdíly mohly být způsobeny například mírným zastíněním nebo neideálním sklonem FV panelu vůči slunci. Ačkoliv byla orientace FV panelu na jih, v odpoledních hodinách (15:00 až 17:00) se projevilo zastínění balkonem a fasádou domu. Za optimálních podmínek (např. na střeše, bez stínu) by panel byl schopný dodávat výkon alespoň o hodinu déle.

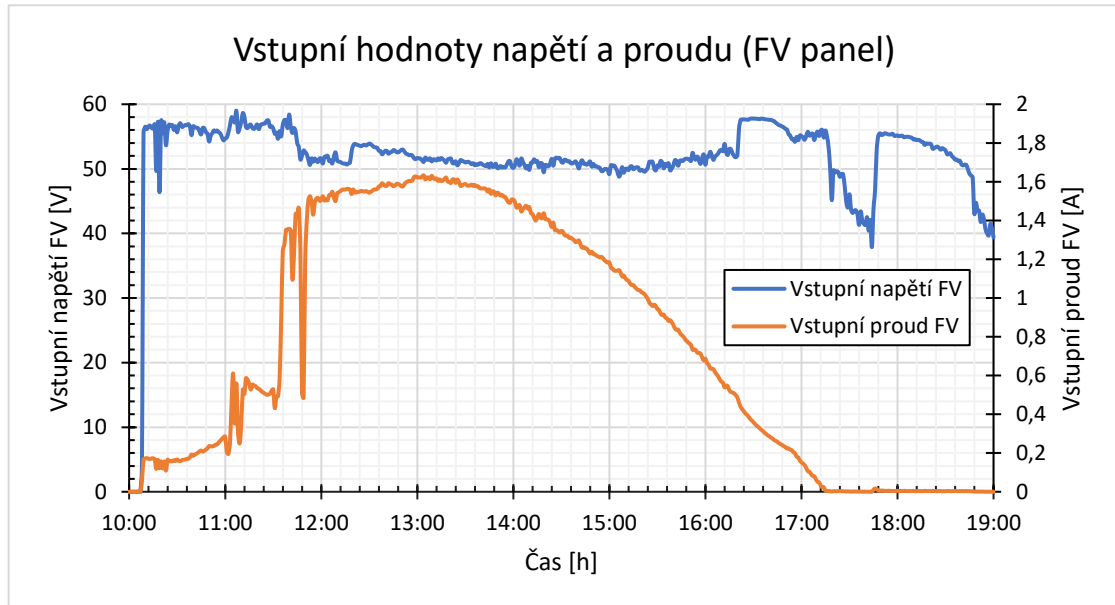
Hodnoty SOC akumulátoru se vyvíjely v závislosti na připojené laboratorní zátěži a jejím výkonu, který byl postupem času regulován. Mírné skoky (např. v čase 15:10 a 15:50) jsou způsobeny nárazovým odlehčením zátěže, jelikož je výpočet SOC závislý na napětí battery-packu.



Obrázek 6.2 Průběh výkonu FV panelu a stavu nabití akumulátoru

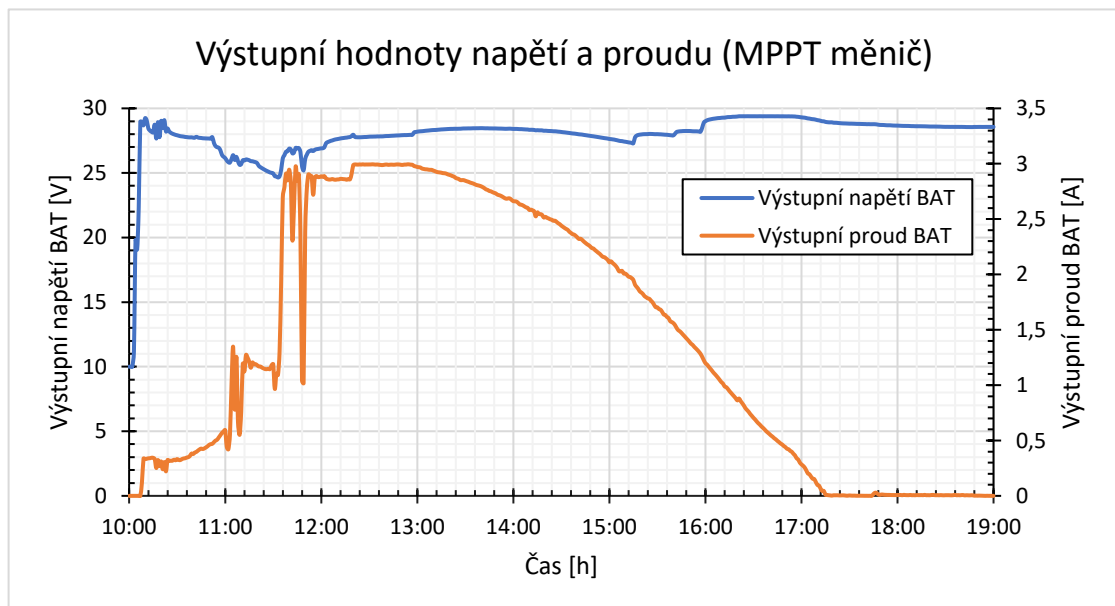
6.2 Vstupní a výstupní hodnoty napětí a proudů

Na obrázku 6.3 můžeme pozorovat napětí a proud tenkovrstvého FV panelu značky Kaneka. Relativně vysoké napětí panelu je způsobeno především technologií výroby, tudíž vysokým počtem FV článků.



Obrázek 6.3 Vstupní hodnoty napětí a proudu (FV panel)

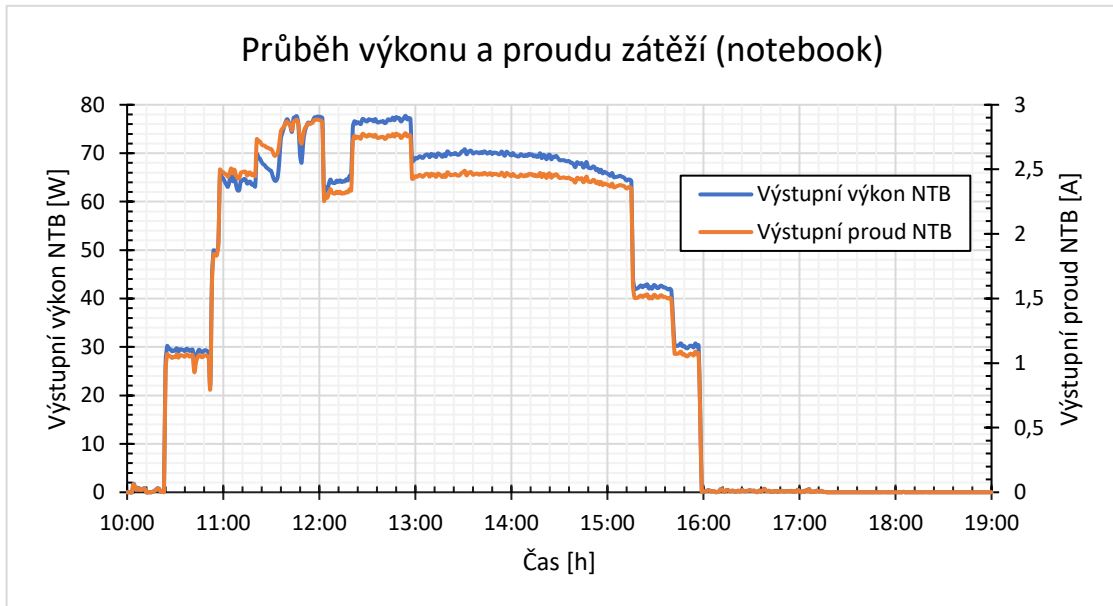
Na obrázku 6.4 můžeme pozorovat, že průběhy proudů jsou v obou případech opticky stejné. Čím se však liší, je velikost dodávaného proudu. Jedná se o hlavní vlastnost DC-DC měniče, který při konverzi na přibližně dvakrát nižší napětí ($60\text{ V} \rightarrow 30\text{ V}$) dodá dvojnásobně velký proud ($1,5\text{ A} \rightarrow 3,0\text{ A}$).



Obrázek 6.4 Výstupní hodnoty napětí a proudu (MPPT měnič)

6.3 Průběh výkonu a proudu laboratorní zátěží

Na obrázku 6.5 lze pozorovat průběh výkonu výstupu pro notebook. Laboratorní zátěž byla místo notebooku použita z důvodu stálého odběru energie a možnosti regulace výstupního výkonu. Bylo totiž nutné během měření upravovat velikost zátěže v závislosti na okamžitém výkonu FV panelu, jinak by došlo k úplnému nabití akumulátoru → omezení výkonu. Výkonové skoky v grafu jsou způsobeny průběžnými změnami odporu laboratorní zátěže.

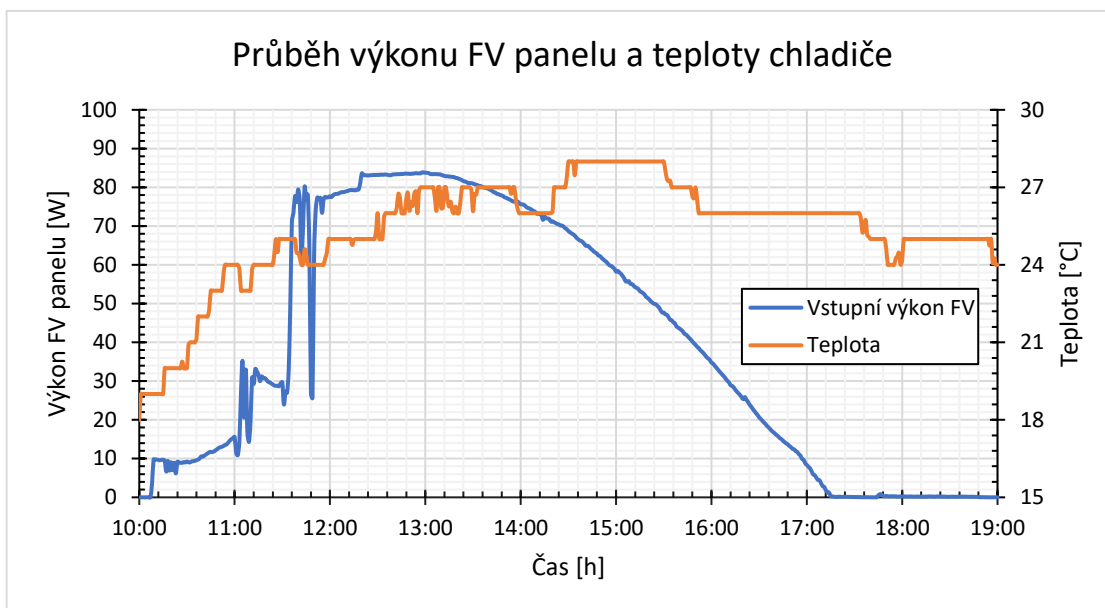


Obrázek 6.5 Průběh výkonu a proudu zátěží (notebook)

6.4 Průběh teploty chladiče

Na obr. 6.6 můžeme vidět vývoj teploty chladiče v závislosti na dodaném výkonu. Při zatížení jedním FV panelem téměř plným výkonem došlo k oteplení o přibližně 5 – 6 °C vůči okolní teplotě (cca 22 °C). Jedním faktorem jsou velmi nízké ztráty synchronního měniče, druhým je předimenzovaný hliníkový chladič. Chladič použité velikosti by s přehledem uchládil výstupní výkon měniče 500 W a více, což je nad rámec současného navrženého maximálního výkonu až 315 W.

Pro případ vysokých teplot lze zařízení osadit 12 V ventilátorem, který je spínaný na základě teploty měřené termistorem na chladiči.

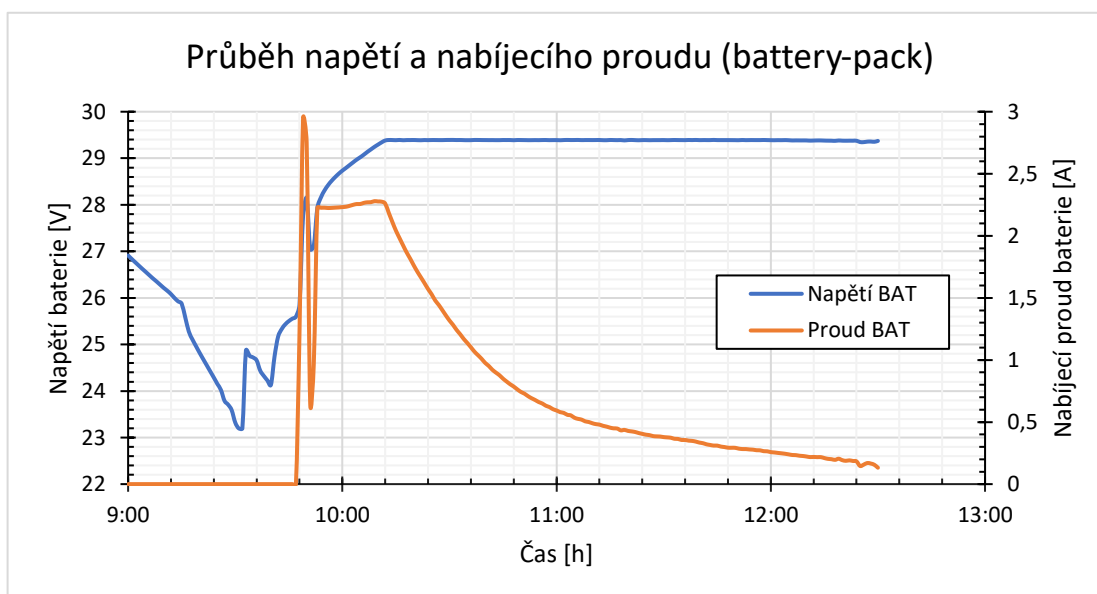


Obrázek 6.6 Průběh výkonu FV panelu a teploty chladiče

6.5 Nabíjení akumulátoru metodou CC/CV

Na obrázku 6.7 můžeme pozorovat nabíjení akumulátoru bez dodatečné zátěže/notebooku. Jakmile dosáhne akumulátor předem zvoleného maximálního napětí, dojde k omezení výkonu MPPT nabíječe a proud se začne exponenciálně snižovat. Jedná se tedy o metodu nabíjení CC/CV.

Provozní rozsah napětí battery-packu je v tomto případě 22,4 – 29,4 V. Zařízení je schopno plného nabití interního akumulátoru (bez připojeného notebooku/USB) za přibližně 1,5 až 2 hodiny.



Obrázek 6.7 Ukázka nabíjení akumulátoru metodou CC/CV

7. ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo navrhnout soběstačný fotovoltaický systém určený primárně pro napájení přenosného počítače. Důraz byl kladen zejména na výslednou efektivitu celého systému, které je dosaženo využitím synchronních měničů a implementací algoritmu MPPT v mikrokontroleru ESP32.

V teoretické části práce byly rozebrány základní typy fotovoltaických článků, jejich důležité parametry a vlastnosti. Dále bylo zmíněno řízení fotovoltaické křivky pomocí MPPT a PWM regulátoru, kde jsou vysvětleny technické rozdíly mezi jednotlivými metodami a jejich výsledná efektivita. Současně byly popsány i základní topologie DC/DC měničů, které jsou jedním z klíčových prvků při návrhu MPPT regulátoru. Také byl vysvětlen princip několika běžně používaných MPPT algoritmů. V poslední části teorie byly rozebrány jednotlivé principy a hlavní funkce správy akumulátorů pomocí BMS. Součástí bylo vysvětlení rozdílů mezi aktivním a pasivním balancováním článků, popis základních nabíjecích metod akumulátorů a možnosti ochranných obvodů.

Dále se práce zabývala návrhem schémat a desky plošných spojů, následnou výrobou a osazením součástkami. Pro kompletaci celého zařízení byla použita elektroinstalační krabice, do které byly na distanční sloupky připevněny všechny potřebné komponenty. V následující části byl představen návrh firmware mikrokontroleru a bezdrátové odesílání dat pomocí Wi-Fi. Důležitým přínosem práce byla implementace MPPT algoritmu přímo v mikrokontroleru ESP32. Pro ukládání dat a následný monitoring byla využita platforma Blynk. Zařízení odesílá veškeré důležité provozní hodnoty, jako jsou např. napětí, proud a výkon FV panelu, napětí a proud na výstupu MPPT měniče, výstupní proud zátěže – notebook, teplota chladiče či vyrobená energie ve Wh. V závěru práce bylo provedeno praktické měření, kterým byla potvrzena funkčnost a stabilita.

Pro praktickou realizaci zařízení byl vybrán tenkovrstvý fotovoltaický panel o výkonu 105 W_p , především kvůli dosažení dostatečné výroby elektrické energie při snížených hodnotách osvětlení a méně příznivých podmínkách. Battery-pack byl sestaven ze 14 kusů lithno-iontových článků velikosti 18650 a jeho celková změřená kapacita činí 80 Wh. Pro měření kapacity a testování jednotlivých článků byla využita chytrá nabíječka Liitokala. Důležité ochrany včetně pasivního balancování článků byly zajištěny pomocí vhodné BMS.

Výsledkem bakalářské práce vzniknul fotovoltaický nabíječ notebooku, který podporuje na vstupu libovolný FV panel s parametry až 80 V / 10 A. Limitní parametry akumulátoru jsou stanoveny na 50 V / 15 A. Pro správnou funkci je však potřeba dodržet podmínku, aby napětí fotovoltaického panelu bylo vyšší než napětí akumulátoru. Zařízení bylo otestováno pro vstupní výkon 105 W, jelikož použitý battery-pack neumožnil test s vyšším výkonem. Pro nabíjení notebooku lze zvolit výstupní napětí v rozsahu 18 – 22 V při proudu omezeném na 3 A, což odpovídá výkonu přibližně 60 W. Výstupní

proud je omezen na hodnotu přibližně $1 C_{rate}$ za účelem snížení degradace článků současného battery-packu. V případě využití jiného akumulátoru vyšší kapacity lze výstupní výkon (pro notebook) navýšit na více než 100 W. Zařízení je také vybaveno dvěma USB výstupy s podporou rychlého nabíjení a výstupním výkonem až 18 W. Vyrobené zařízení tedy ve všech směrech převyšuje parametry stanovené v zadání bakalářské práce. Celková výrobní cena zařízení (včetně fotovoltaického panelu, battery-packu atd.) vychází na přibližně 4 800 Kč. Navržený fotovoltaický nabíječ notebooku tak tvoří kompletní funkční celek, který může najít vhodné uplatnění například v místech bez přístupu elektrického vedení nebo v obytných vozech.

Nápadem pro budoucí vylepšení by mohla být regulace napětí výstupního měniče pro notebook přístupná venku na krabici. V současnosti je potřeba pro změnu výstupního napětí demontovat víko a potenciometr ručně nastavit na požadovanou hodnotu dle výrobce notebooku. Dalším vylepšením by mohlo být dobíjení externím síťovým zdrojem, zejména pro případ zimního období s nízkou výrobou el. energie FV panelu.

LITERATURA

- [1] MASTNÝ, Petr; DRÁPELA, Jiří; MIŠÁK, Stanislav; MACHÁČEK, Jan; PTÁČEK, Michal et al. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [2] STREDNÍ PRUMYSLOVÁ ŠKOLA STROJNÍ A STAVEBNÍ, TÁBOR, KOMENSKÉHO 1670. *Solární energie*. Online. 2013. Dostupné z: http://zelenymost.cz/files/solarni_energie.pdf. [cit. 2023-10-13].
- [3] *Fyzikální principy - Energetika zblízka - Svět energie.cz*. Online. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/obnovitelne-zdroje-energie/sluncni-elektrarny-podrobne/fotovoltaicke-clanky-a-panely/fyzikalni-principy>. [cit. 2023-10-29].
- [4] *Fotovoltaické systémy - Učební texty k semináři*. Online. Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/offline/SYSTEM/FILES/BROZURA_04_1104.PDF. [cit. 2023-10-30].
- [5] *Nejpoužívanější pojmy ve fotovoltaike*. Online. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/11772-nejpouzivanejsi-pojmy-ve-fotovoltaice>. [cit. 2023-10-30].
- [6] HASELHUHN, Ralf. *Fotovoltaika: budovy jako zdroj proudu: budovy jako zdroj proudu*. Ostrava: HEL, 2011. ISBN 978-80-86167-33-6.
- [7] *Best Research-Cell Efficiency Chart*. Online. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>. [cit. 2023-10-31].
- [8] *POLYCRYSTALLINE VS MONOCRYSTALLINE SOLAR PANELS*. Online. Dostupné z: <https://www.solarquotes.com.au/panels/photovoltaic/monocrystalline-vs-polycrystalline/>. [cit. 2023-10-31].
- [9] *INNOVATION: THIN FILM SOLAR CELLS AT MX2016 1*. Online. In: . Dostupné z: <https://materialdistrict.com/article/innovation-thin-film-solar-cells-at-mx2016/innovation-thin-film-solar-cells-at-mx2016-1/>. [cit. 2023-10-31].
- [10] *How solar is recycled - Sunbank Solar (obrázek)*. Online. In: . Dostupné z: <https://mysunbank.com.au/solar-recycling/>. [cit. 2023-10-31].
- [11] *Jak vybrat správný regulátor*. Online. Dostupné z: <https://www.i4wifi.cz/cs/faq/324>. [cit. 2023-10-15].
- [12] *Solar charge controller*. Online. In: . Dostupné z: <http://cz.jensyssolar.com/Content/upload/2018289553/201805300904271970798.jpg>. [cit. 2023-10-15].
- [13] *What are the Different Types of Solar Charge Controllers? PWM vs MPPT*. Online. Dostupné z: <https://www.morningstarcorp.com/faq/what-are-the-different-types-of-solar-charge-controllers/>. [cit. 2023-10-15].
- [14] KEYHANI, Ali. *Design of smart power grid renewable energy systems*. 1. Hoboken, N.J.: Wiley, c2011. ISBN 978-0-470-62761-7.

- [15] *Impulzní zdroje a měniče II. - Přehled topologií impulzních měničů (bez galvanického oddělení)*. Online. Dostupné z: <https://danyk.cz/menice.html>. [cit. 2023-10-26].
- [16] *Comparison of Different MPPT Algorithms with a Proposed One Using a Power Estimator for Grid Connected PV Systems*. Online. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/journals/ijp/2016/1728398/>. [cit. 2023-10-28].
- [17] ELTAWIL, Mohamed A. a ZHAO, Zhengming. MPPT techniques for photovoltaic applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013, roč. 25, s. 793-813. ISSN 1364-0321. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.022>.
- [18] *What is a BMS protection board of lithium battery?* Online. TRITEK. Dostupné z: <https://tritekbattery.com/bms-protection-settings-of-the-lithium-battery/>. [cit. 2023-11-12].
- [19] BU-204: How do Lithium Batteries Work? [online]. [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-204-how-do-lithium-batteries-work>
- [20] BU-205: Types of Lithium-ion [online]. [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>
- [21] BU-214: Summary Table of Lead-based Batteries [online]. [cit. 2024-05-09]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-214-summary-table-of-lead-based-batteries>
- [22] BU-215: Summary Table of Nickel-based Batteries [online]. [cit. 2024-05-09]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-215-summary-table-of-nickel-based-batteries>
- [23] BU-216: Summary Table of Lithium-based Batteries [online]. [cit. 2024-05-09]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-216-summary-table-of-lithium-based-batteries>
- [24] *What is a BMS protection board of lithium battery?* [online]. TRITEK. [cit. 2023-11-12]. Dostupné z: <https://tritekbattery.com/bms-protection-settings-of-the-lithium-battery/>
- [25] *Practical Methods in Li-ion Batteries: for Simplified Modeling, Battery Electric Vehicle Design, Battery Management System Testing and Balancing System Control*. Online. In: . Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Practical-Methods-in-Li-ion-Batteries%3A-for-Battery-Barreras/efd0f48c9a32c58d955684732fa951e5286000e4/figure/6>. [cit. 2023-11-13].
- [26] *BU-803a: Cell Matching and Balancing*. Online. BATTERY UNIVERSITY. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-803a-cell-matching-and-balancing>. [cit. 2023-11-13].
- [27] *Battery Management Systems–Part 3: Battery Charging Methods*. Online. Dostupné z: <https://www.engineering.com/story/battery-management-systemspart-3-battery-charging-methods>. [cit. 2023-11-13].

- [28] GAGLANI, M.; RAI, R. a DAS, S. Implementation Of Multilevel Battery Charging Scheme For Lithium-ion Batteries. In: *2019 National Power Electronics Conference (NPEC)*. 2019, s. 1-6. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/NPEC47332.2019.9034748>.
- [29] *18650 lithium-battery protection circuit board*. Online. In: . Dostupné z: <https://www.lithiumbatterypcb.com/wp-content/uploads/2017/05/HTB1D5y3QXXXXXXXXfXVXXq6xXFXXA.jpg>. [cit. 2023-11-14].
- [30] *3S 40A Li-ion Lithium Battery 18650 Charger PCB BMS Protection Board*. Online. In: . Dostupné z: <https://www.rytronics.in/product/3s-40a-li-ion-lithium-battery-18650-charger-pcb-bms-protection-board/>. [cit. 2023-11-14].
- [31] TRITEK. *Lithium-ion battery protection board and BMS knowledge comprehensive explanation – Tritex Battery R&D Director*. Online. Dostupné z: <https://tritekbattery.com/lithium-ion-battery-protection-board-and-bms/>. [cit. 2023-11-14].
- [32] *Datasheet - KANEKA HB100 / HB105 / HB110*. Online. Dostupné z: https://gbc-solino.cz/wp-content/uploads/2014/05/KANEKA_HB105_GBCM_CZ.pdf. [cit. 2023-11-05].
- [33] *ESP32-DevKitC V4 Getting Started Guide*. Online. Dostupné z: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/hw-reference/esp32/get-started-devkitc.html>. [cit. 2023-12-11].
- [34] *ESP32 vs Arduino Speed Comparison*. Online. Dostupné z: <https://www.makerguides.com/esp32-vs-arduino-speed-comparison/>. [cit. 2023-12-02].
- [35] *RP2040 VS ATMEGA328 VS ESP32 VS STM32: Comparison some parameters of Microcontrollers*. Online. Dostupné z: <https://www.utmel.com/components/rp2040-vs-atmega328-vs-esp32-vs-stm32-comparison-some-parameters-of-microcontrollers?id=1471>. [cit. 2023-12-02].
- [36] ASCAS. *1kW Arduino MPPT Solar Charge Controller (ESP32 + WiFi)*. Online. AUTODESK INSTRUCTABLES. Dostupné z: <https://www.instructables.com/DIY-1kW-MPPT-Solar-Charge-Controller/>. [cit. 2023-12-02].
- [37] *Datasheet IR2104(S) & (PbF)*. Online. Dostupné z: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IR2104-DS-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d462533600a4015355c7c1c31671. [cit. 2023-12-05].
- [38] *6 Causes of MOS Transistor Leakage Current*. Online. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/6-causes-of-mos-transistor-leakage-current/>. [cit. 2023-12-05].
- [39] *TechBuilder - MPPT CALCULATOR*. Online. Dostupné z: <https://docs.google.com/spreadsheets/d/1Tr62Oey9FM3moctw14YCeZw43nJfITeZ/edit#gid=1276505232>. [cit. 2023-12-05].

- [40] *LM5169 data sheet, product information and support* / TI.com. Online. Dostupné z: <https://www.ti.com/product/LM5169#features>. [cit. 2023-12-08].
- [41] *Univerzální DC/DC měnič*. Online. Dostupné z: https://danyk.cz/univ_m.html. [cit. 2023-12-18].
- [42] TEXAS INSTRUMENTS. *UCx84x Current-Mode PWM Controllers datasheet (Rev. G)*. Online. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/uc3843.pdf?ts=1702898180287&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FUC3843. [cit. 2023-12-18].
- [43] AUTODESK. Autodesk Fusion: Více než CAD, je to budoucnost navrhování a výroby. [online]. [cit. 2024-05-09]. Dostupné z: <https://www.autodesk.cz/products/fusion-360/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>
- [44] JLC PCB [online]. [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://jlcpcb.com/>
- [45] Step-down měnič 1.2-36V, 20A, 300W, CC/CV [online]. [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/step-down-menic-1-2-36v--20a--300w--cc-cv/>
- [46] IP6505 datasheet [online]. [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <http://www.injoinic.com/wwwroot/uploads/files/20200220/f11cf889f6261e26daf52164367c836.pdf>
- [47] ACS712 datasheet [online]. [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/0712.pdf>
- [48] Arduino IDE [online]. [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/software>
- [49] Arduino ESP32 MPPT Solar Charge Controller firmware [online]. [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: <https://github.com/AngeloCasi/FUGU-ARDUINO-MPPT-FIRMWARE>
- [50] Blynk library [online]. [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://github.com/blynkkk/blynk-library/releases/tag/v1.3.2>
- [51] Blynk IoT Software platform [online]. [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://blynk.io/blynk-iot-low-code-software-platform>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

1 C/C _{rate}	Nabíjení proudem o hodnotě maximální kapacity baterie
ADC	Převodník analogového signálu na digitální
AM	Definovaná vzduchová hmota (Air Mass)
BLE	Bluetooth Low Energy
BMS	Systém řízení baterie (Battery Management System)
CAN	Komunikační protokol/sběrnice (Controller Area Network)
CC	Konstantní proud
CCCV	Nabíjení konstantním proudem následované konst. napětím
CdTe	Telurid kademnatý
CIGS	Copper indium gallium selenide
CV	Konstantní napětí
DPS	Deska plošných spojů
EVA	Ethylvinylacetát
FV	Fotovoltaický
I/O	Vstupy/výstupy
I2C	Komunikační sběrnice (Inter-Integrated Circuit)
IoT	Internet věcí (Internet of Things)
LCO	Druh Li-ion - LiCoO ₂ – Lithium-kobalt-oxid
LFP	Druh Li-ion - LiFePO ₄
MCC	Vícestupňové proudové nabíjení (Multi Current Charge)
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
MPP	Bod maximálního výkonu
MPPT	Sledování maximálního bodu výkonu
NCA	Druh Li-ion - LiNiCoAlO ₂
NMC	Druh Li-ion - LiNiMnCoO ₂
P&O	Perturb & Observe („vychyl a pozoruj“)
PTC	Pozitivní teplotní závislost (u termistorů)
PWM	Pulzně šířková modulace
RS485	Komunikační protokol
SMD	Součástka pro povrchovou montáž (Surface Mount Device)
SoC	Stav nabití akumulátoru (State of Charge)
SoH	Životnost akumulátoru (State of Health)
SPI	Komunikační rozhraní (Serial Peripheral Interface)
STC	Standardní testovací podmínky
TCO	Transparentní vodivý oxid
UART	Komunikační protokol/sběrnice (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter)
Wi-Fi	Wireless Fidelity

Symboly:

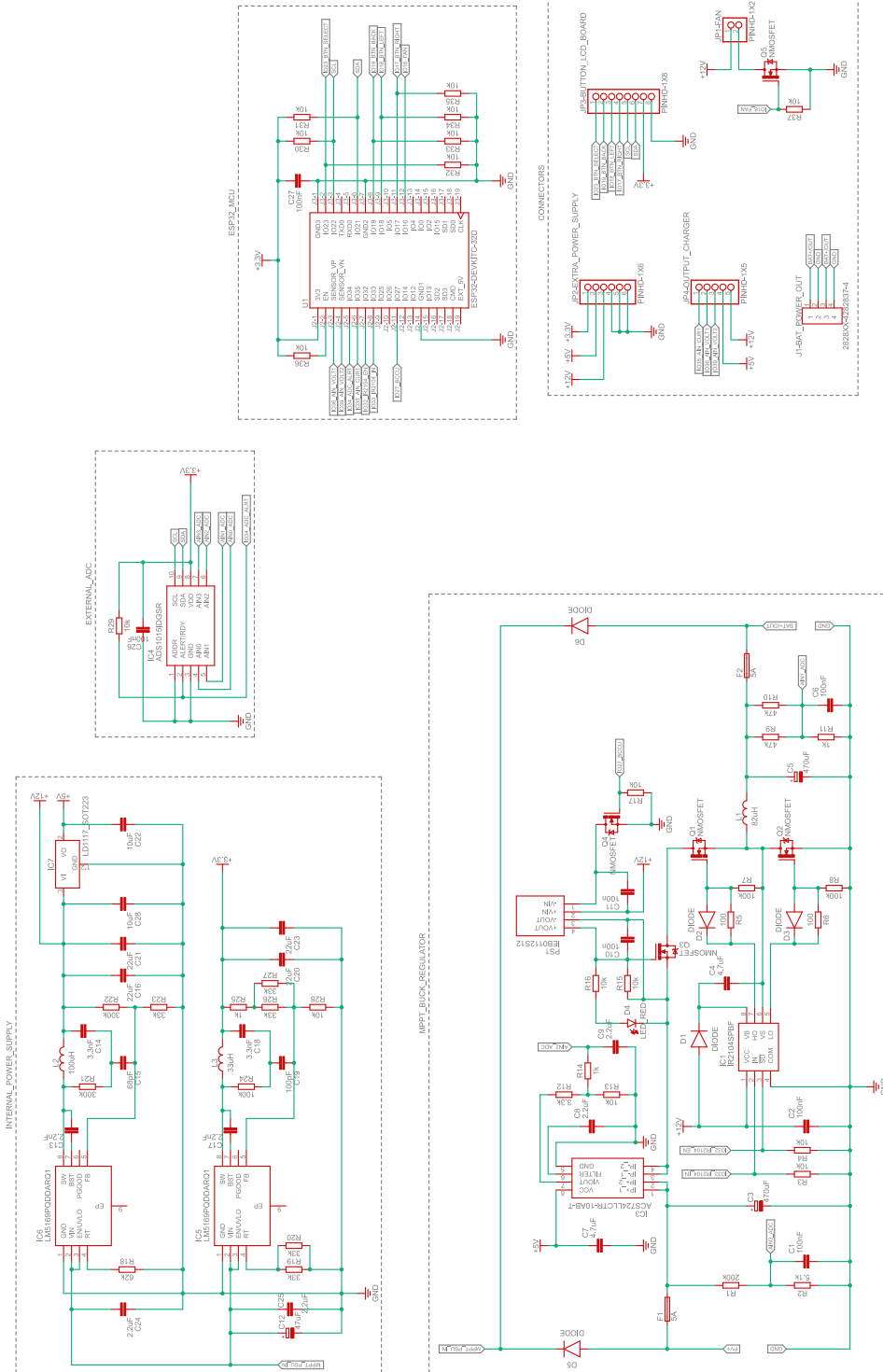
$\%I_{ripple}$	procentuální zvlnění proudu	(%)
ΔI_L	zvlnění proudu cívkou	(A)
C_{out}	kapacita výstupního kondenzátoru	(F)
D	střída PWM signálu	(%)
f_{sw}	spínací frekvence tranzistoru	(Hz)
I_{MPP}	proud v bodě maximálního výkonu	(A)
I_{pk}	špičkový proud tlumivkou	(A)
I_{SAT}	saturační proud cívkou	(A)
I_{SC}	proud nakrátko	(A)
P_{MPP}	výkon v bodě maximálního výkonu	(W)
$R_{DS(ON)}$	odpor tranzistoru mezi DS v sepnutém stavu	(Ω)
R_{FBB}	odpor děliče napětí	(Ω)
R_{FBT}	odpor děliče napětí	(Ω)
R_p	svodový odpor	(Ω)
R_s	sériový odpor	(Ω)
R_T	odpor určující spínací frekvenci měniče	(Ω)
T_R	doba ustálení regulační smyčky	(s)
U_{MPP}	napětí v bodě maximálního výkonu	(V)
U_{OC}	napětí naprázdno	(V)
U_{ripple}	zvlnění napětí na výstupu	(V)
W_p	špičkový výkon FV panelu při STC	(W)

SEZNAM PŘÍLOH

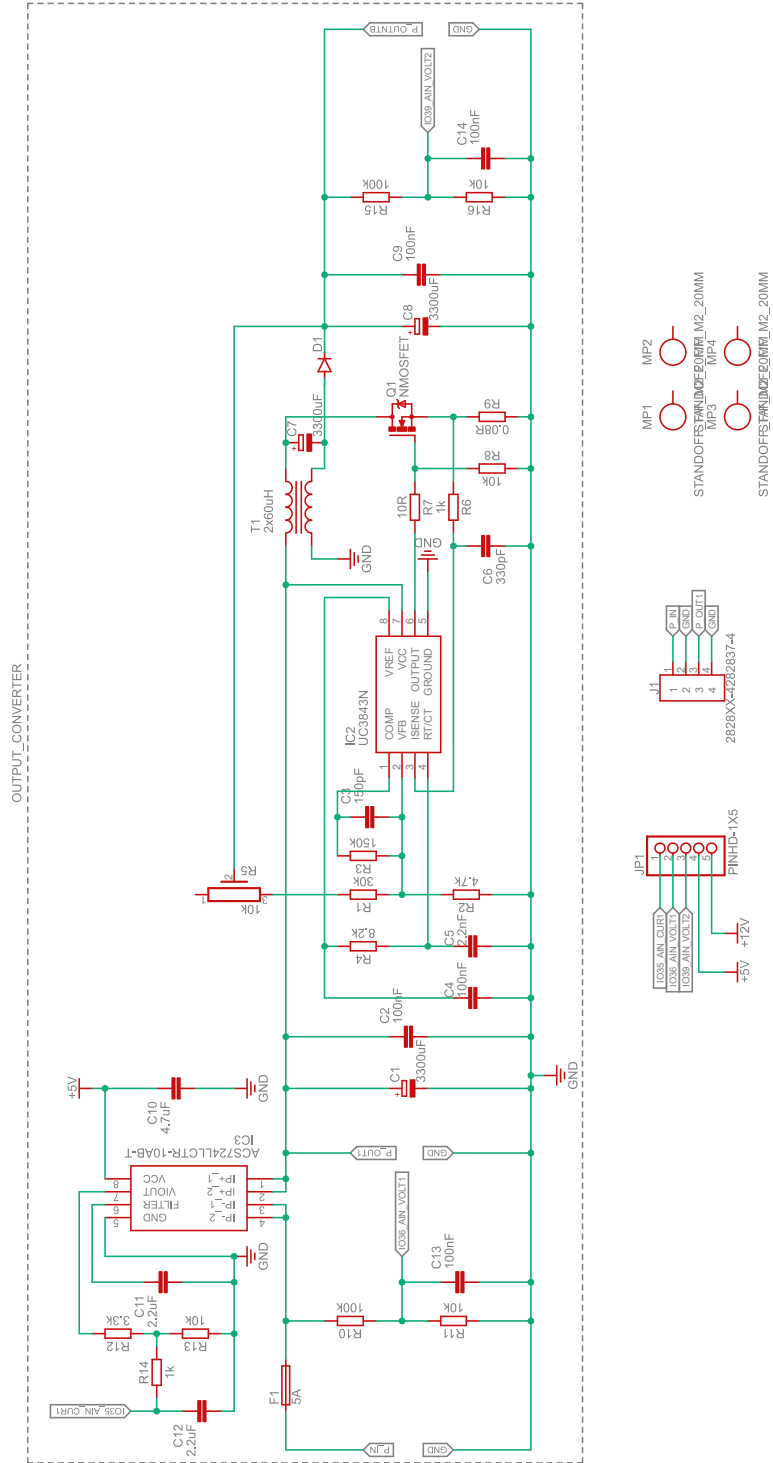
PŘÍLOHA A - OBVODOVÁ SCHÉMATA VE VEKTOROVÉM FORMÁTU	66
PŘÍLOHA B - NÁVRH DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ	68
PŘÍLOHA C - FIRMWARE PRO ESP32 JE PŘILOŽEN V SOUBORU .ZIP	70

Příloha A - Obvodová schémata ve vektorovém formátu

A.1 Řídící a výkonová část

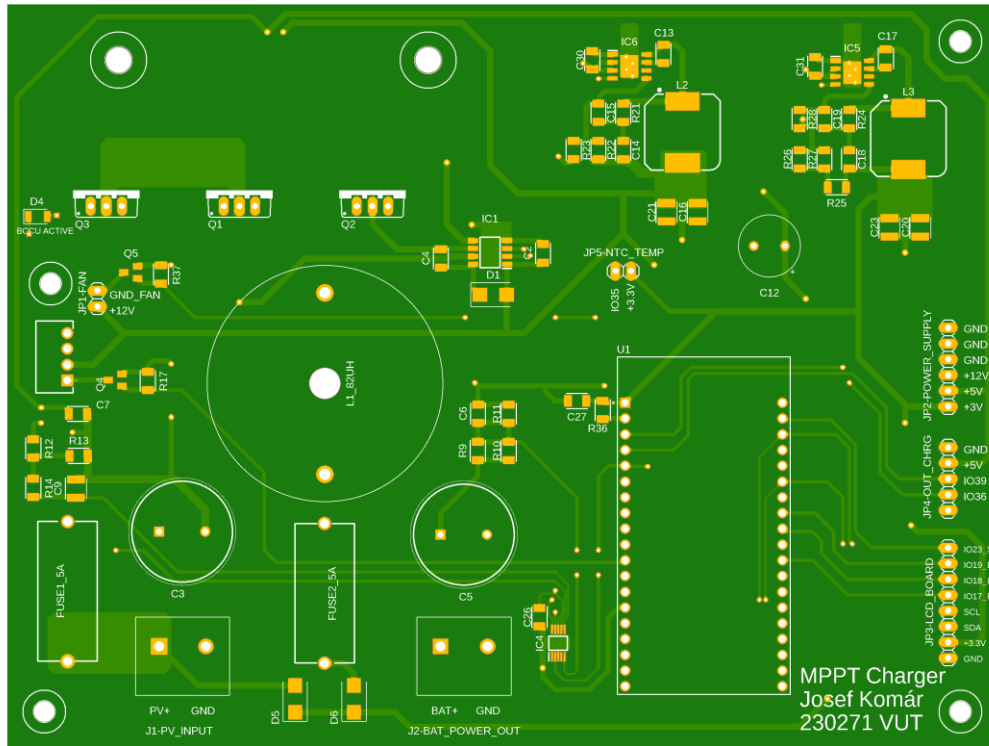


A.2 Výstupní část

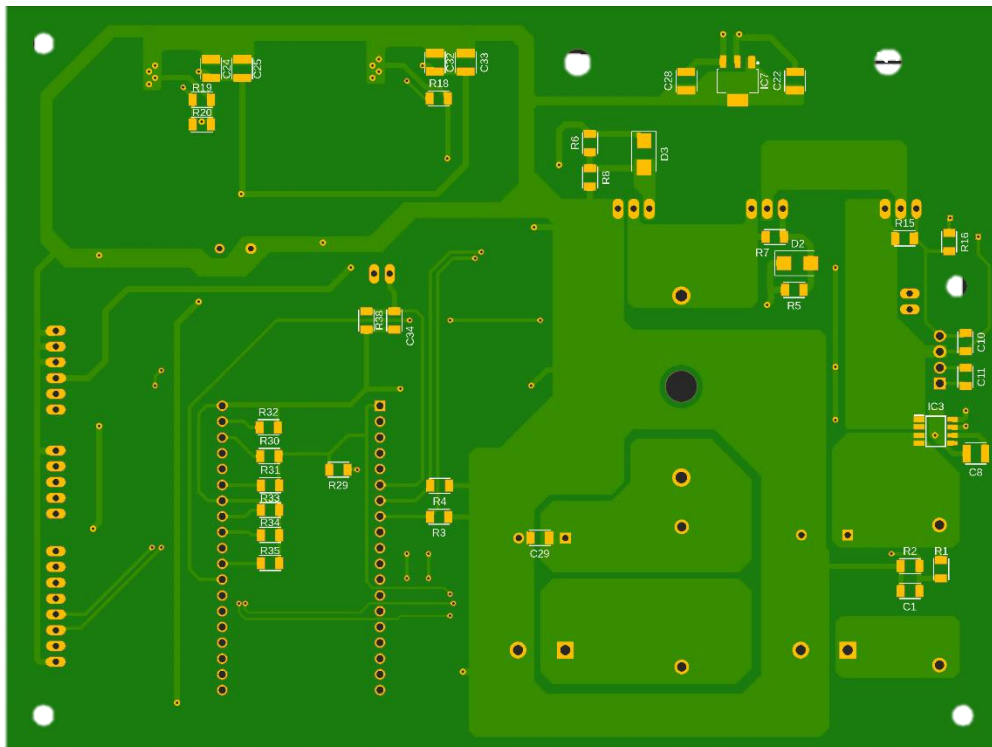


Příloha B - Návrh desky plošných spojů

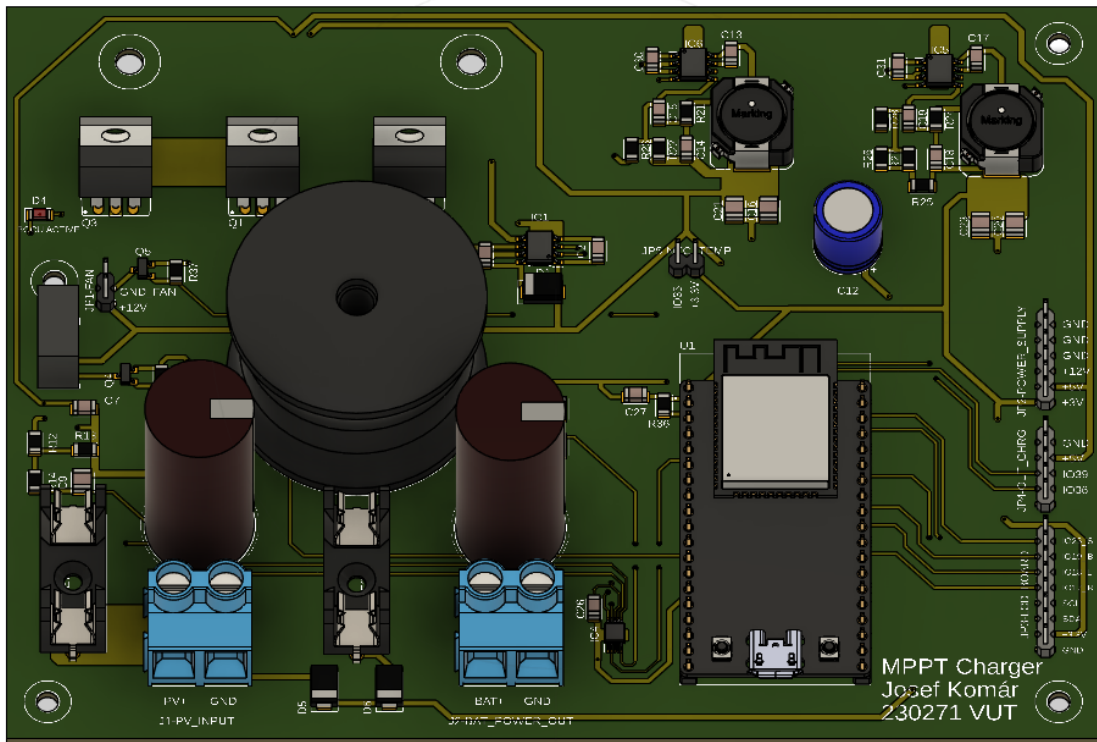
B.1 Pohled na DPS (horní strana)



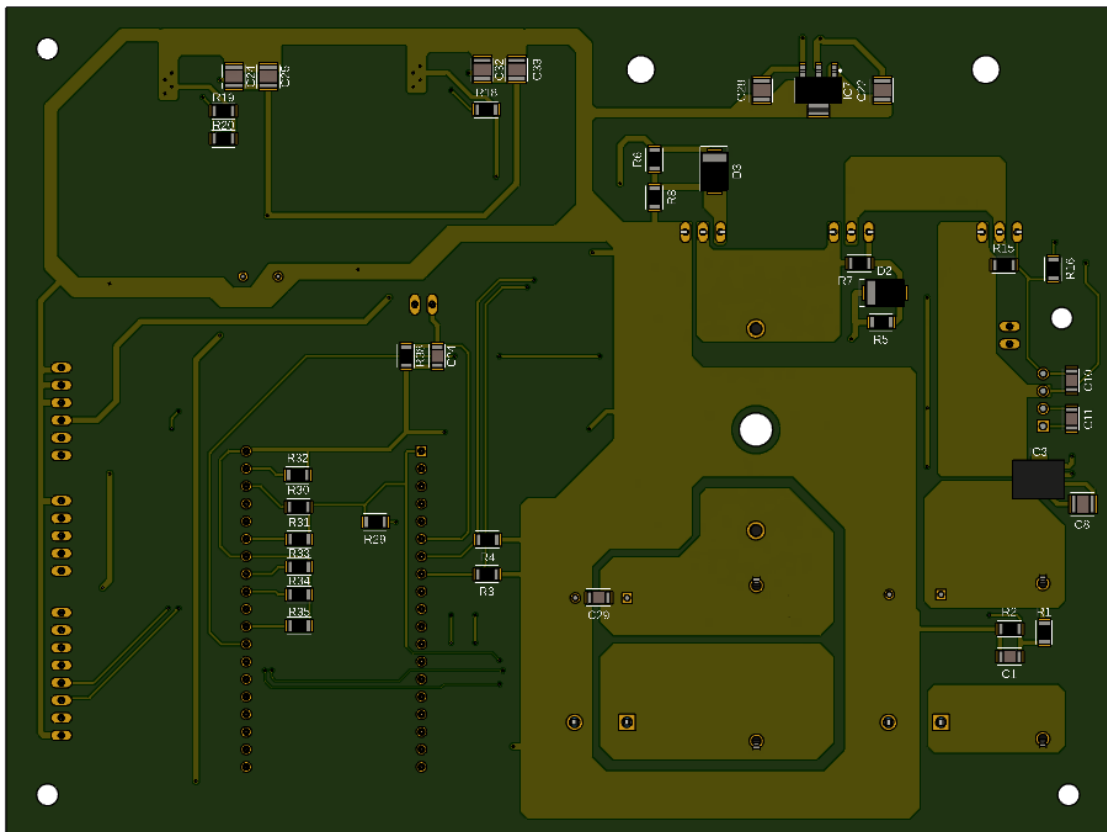
B.2 Pohled na DPS (spodní strana)



B.3 3D model včetně součástek (horní)



B.4 3D model včetně součástek (spodní)



**Příloha C - Firmware pro ESP32 je přiložen
v souboru .zip**