



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 AKUMULÁTORU SE SLEDOVÁNÍM SLUNCE

PHOTOVOLTAIC BATTERY CHARGER WITH SUN TRACKING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Knob

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Kufa, Ph.D.

BRNO 2023

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: Martin Knob

ID: 221054

Ročník: 3

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Fotovoltaický nabíječ akumulátoru se sledováním slunce

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte technologie a typy fotovoltaických panelů. Prozkoumejte možnosti řízení fotovoltaické křivky panelu pomocí MPPT (Maximum Power Point Tracking). Popište různé vhodné nabíjecí a ochranné obvody akumulátoru. Navrhněte princip zařízení, které bude natáčet fotovoltaické panely za sluncem. Sestrojte samotnou konstrukci, která bude naklánět panel. Navrhněte obvodové schéma zařízení s důrazem na nízkou vlastní spotřebu energie. Systém musí být schopen non-stop provozu bez externího zdroje napájení. Navrhněte desky plošných spojů.

Provedte výrobu, osadte a oživte dané zařízení. Ověřte správnou funkčnost zařízení. Naprogramujte firmware zařízení tak, aby bylo schopno bezdrátově odesílat data nebo je lokálně ukládat. Změřte klidový odběr elektrické energie. Provedte vizualizaci změřených dat. Vámi navržené a sestavené zařízení porovnejte s účinností panelu bez natáčení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] TCHAKOUNTE, Hyacinthe, et al.. Performance Comparison of an Automatic Smart Sun Tracking System Versus a Manual Sun Tracking. In: 2020 8th International Conference on Smart Grid (icSmartGrid) [online]. IEEE, 2020, s. 127-132 [cit. 2022-05-21]. Dostupné z: doi:10.1109/icSmartGrid49881.2020.9144829
- [2] PANG, Lixin, et al. Analysis of Photovoltaic Charging System Based on MPPT. In: 2008 IEEE Pacific-Asia Workshop on Computational Intelligence and Industrial Application [online]. IEEE, 2008, s. 498-501 [cit. 2022-05-21]. Dostupné z: doi:10.1109/PACIIA.2008.357

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 29.5.2023

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 fotovoltaického nabíječe akumulátoru. Nabíječ dokáže sledovat Slunce a naklánět panel v azimutu i elevaci. Zařízení obsahuje MPPT regulátor kvůli optimalizaci energie ze Slunce vyrobenou za pomoci fotovoltaického článku. Tato fotovoltaická nabíječka je určena pro nabíjení Li-ion baterií a obsahuje vhodné nabíjecí a ochranné obvody. Nabíječ je energeticky soběstačný, což znamená, že nepotřebuje další zdroj energie. Dalším účelem tohoto zařízení je měření elektrických veličin. Zařízení odesílá měřená data bezdrátově pomocí Wifi.

Klíčová slova

fotovoltaický panel, sledovač, MPPT regulátor, akumulátor, nabíječ, CCCV, mikrokontroler, konstrukce

Abstract

This thesis describes the design of photovoltaic battery charger. The charger can tracking the Sun and tilt the panel in azimuth and elevation. The device includes an MPPT regulator to optimise the energy produced by the photovoltaic cell from the Sun. This photovoltaic charger is designed to charge Li-Ion batteries and includes appropriate charging and protection circuits. The charger is energy self-sufficient, which means that it does not need an additional power source. Another purpose of this device is to measure electrical quantities. The device sends the measured data wirelessly via Wifi.

Keywords

Photovoltaic panel, tracker, MPPT regulator, accumulator, charger, CCCV, microcontroller, construction

Bibliografická citace

KNOB, Martin. Fotovoltaický nabíječ akumulátoru se sledováním slunce [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/151699>. 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>Martin Knob</i>
VUT ID studenta:	<i>221054</i>
Typ práce:	<i>Bakalářská práce</i>
Akademický rok:	<i>2022/23</i>
Téma závěrečné práce:	<i>Fotovoltaický nabíječ akumulátoru se sledováním slunce</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: 29. května 2023

podpis autora

Poděkování

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

V Brně dne: 29. května 2023

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	13
SEZNAM TABULEK.....	14
ÚVOD.....	15
1. ENERGIE SLUNEČNÍHO ZÁŘENÍ.....	16
1.1 VYUŽITÍ SOLÁRNÍ ENERGIE	16
1.2 SLUNEČNÍ ZÁŘENÍ V ČESKÉ REPUBLICE	17
2. FOTOVOLTAICKÉ ČLÁNKY A PANELY.....	18
2.1 FOTOELEKTRICKÝ JEV.....	18
2.2 FOTOVOLTAICKÝ ČLÁNEK.....	19
2.2.1 Historie fotovoltaického článku.....	19
2.2.2 Princip fotovoltaického článku.....	19
2.2.3 Generace fotovoltaických článků.....	21
2.2.4 Nejpoužívanější typy fotovoltaických článků.....	22
2.3 FOTOVOLTAICKÝ PANEĽ.....	24
3. DRUHY KONSTRUKCÍ PRO FOTOVOLTAICKÉ PANEĽ.....	25
3.1 KONSTRUKCE SE SLEDOVÁNÍM SLUNCE.....	25
3.1.1 Jednoosé sledovače.....	25
3.1.2 Dvouosé sledovače.....	26
3.1.3 Statická konstrukce	26
4. MPPT.....	27
4.1 METODY MPPT.....	27
4.1.1 Constant Voltage (CV).....	27
4.1.2 Perturb and Observe Methods (P&O).....	28
4.1.3 Incremental Conductance (IC).....	28
4.1.4 Fractional Open-Circuit Voltage	29
4.1.5 Fractional Short-Circuit Current	29
5. AKUMULÁTORY.....	30
5.1 OLOVĚNÉ AKUMULÁTORY.....	30
5.2 AKUMULÁTORY NA BÁZI NIKLU NI.....	31
5.2.1 Ni-Cd akumulátory.....	31
5.2.2 Ni-MH akumulátor.....	31
5.3 AKUMULÁTORY NA BÁZI LITHIA (LI)	32
5.3.1 Akumulátor Li-ion.....	32
5.3.2 Akumulátor Li-Pol	32
5.3.3 Akumulátor LiFePO ₄	33
6. NABÍJECÍ A OCHRANNÉ OBVODY AKUMULÁTORU	34
6.1 NABÍJECÍ METODY AKUMULÁTORU.....	34
6.1.1 Nabíjení konstantním proudem.....	34
6.1.2 Nabíjení konstantním napětím	35
6.1.3 Nabíjení konstantním výkonem.....	35

6.1.4	<i>Nabíjení konstantním proudem následováno konstantním napětím (CCCV).....</i>	36
6.2	UKONČENÍ NABÍJENÍ	37
6.2.1	<i>Časové ukončení nabíjení.....</i>	37
6.2.2	<i>Proudové ukončení nabíjení.....</i>	37
6.2.3	<i>Napětové ukončení nabíjení.....</i>	38
6.2.4	<i>Teplotní ukončení nabíjení.....</i>	39
6.3	OCHRANNÉ OBVODY AKUMULÁTORŮ	40
6.3.1	<i>Ochrana proti zkratovému proudu</i>	40
6.3.2	<i>Ochrana proti nadměrnému vybití.....</i>	40
6.3.3	<i>Nadproudová ochrana</i>	40
6.3.4	<i>Tepelná ochrana</i>	40
6.3.5	<i>Ochrana proti přebíjení.....</i>	41
6.3.6	<i>Přepětová ochrana</i>	41
7.	REALIZACE ZAŘÍZENÍ	42
7.1	FOTOVOLTAICKÝ PANEL	42
7.2	BATERIE	42
7.3	MIKROKONTROLER	43
7.3.1	<i>Arduino UNO a NANO.....</i>	<i>44</i>
7.3.2	<i>ESP32-PICO-KIT1</i>	<i>44</i>
7.4	SNÍMÁNÍ POLOHY SLUNCE.....	44
7.5	ELEKTROMOTOR A JEHO ŘÍZENÍ.....	46
7.6	DALŠÍ POUŽITÉ KOMPONENTY	48
7.6.1	<i>Senzor napětí a proudu INA3221</i>	<i>48</i>
7.6.2	<i>Hodiny reálného času DS1307.....</i>	<i>48</i>
7.6.3	<i>DC/DC měnič MT3608</i>	<i>48</i>
7.6.4	<i>DC/DC měnič 774-013.....</i>	<i>49</i>
7.7	MPPT REGULÁTOR A NABÍJECÍ OBVOD.....	49
7.7.1	<i>Návrh MPPT regulátoru a nabíjecího obvodu s LT3652HV</i>	<i>49</i>
7.8	KONSTRUKCE TRACKERU	52
7.9	FOTOVOLTAICKÝ NABÍJEČ AKUMULÁTORU SE SLEDOVÁNÍM SLUNCE	54
7.9.1	<i>Ošetření pro úsporu energie.....</i>	<i>58</i>
7.9.2	<i>Odesílání a ukládání dat</i>	<i>58</i>
7.9.3	<i>Počáteční hledání polohy Slunce.....</i>	<i>59</i>
8.	NAMĚŘENÁ DATA.....	60
8.1	SPOTŘEBA ENERGIE	60
8.2	NABÍTÍ BATERIE.....	62
8.3	MPPT REGULÁTOR A NABÍJECÍ OBVOD	62
8.4	MĚŘENÍ SE SLEDOVÁNÍM SLUNCE	63
8.5	MĚŘENÍ BEZ NAKLÁNĚNÍ PANELU (STATICKÁ KONSTRUKCE).....	64
8.6	POROVNÁNÍ STATICKÉ KONSTRUKCE A KONSTRUKCE SE SLEDOVÁNÍM	65
	ZÁVĚR.....	67
	LITERATURA	68
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	73
	SEZNAM PŘÍLOH.....	76

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Rozdělení využití slunečního záření [3]	16
1.2	Dopadající záření v ČR [6].....	17
2.1	Vnější fotoelektrický jev [9]	18
2.2	Fotovoltaický článek na bázi selenu Charlese Fritse z roku 1883 [11]	19
2.3	Fotovoltaický článek [12]	20
2.4	Fotovoltaický článek [13]	20
2.5	Fotovoltaická fólie [14].....	21
2.6	Vícevrstvý fotovoltaický článek [16]	22
2.7	Typy fotovoltaických panelů [18]	23
2.8	Solární modul a jeho schéma s ukázkou vrstev [19]	24
2.9	Oboustranné zasklení [19].....	24
2.10	Zalítí do průhledné hmoty, nebo nelaminované folie [19].....	24
2.11	Zadní strana z netransparentního materiálu [19].....	24
3.1	Pasivní sledovač Slunce [23].....	25
3.2	aktivní dvouosý sledovač slunce [24]	26
4.1	Blokový diagram FV elektrárny s MPPT [26]	27
5.1	Olověný článek při vybíjení [19].....	30
5.2	Porovnání hustoty energie Ni-Cd a Ni-MH článků [19].....	31
5.3	Li-ion článek [19]	32
6.1	Průběh nabíjení konstantním proudem [35]	34
6.2	Průběh nabíjení konstantním napětím [35]	35
6.3	Porovnání průběhu nabíjení metody s konstantním napětím a konstantním výkonem [36]	36
6.4	Průběh nabíjení metodou CCCV [37].....	36
6.5	Metoda proudového ukončení u Ni-Cd akumulátorů[39].....	37
6.6	Metoda d^2V/dt^2 ukončení u Ni-Cd akumulátorů [43]	39
7.1	Vybraný FV panel od firmy Eclipsera	42
7.2	Zapojení odporového děliče s fotorezistory [55].....	45
7.3	Závislost velikosti odporu na osvětlení [56]	45
7.4	Průměrování fotorezistorů [55]	46
7.5	Držák fotorezistoru	46
7.6	Schéma zapojení H-můstku [58]	47
7.7	Obvodové schéma MPPT regulátoru a nabíjecího obvodu s LT3652HV	50
7.8	Deska plošných spojů MPPT regulátoru a nabíjecího obvodu s LT3652HV	51
7.9	Návrh konstrukce.....	52
7.10	Vyrobená konstrukce	52
7.11	Držák horního DC motoru (pro pohyb v elevaci)	53
7.12	Držák spodního DC motoru (pro pohyb v azimutu).....	53
7.13	Nosná konstrukce	54
7.14	Schéma zapojení sledovače Slunce	55
7.15	Blokové schéma FV nabíječe akumulátoru se sledováním slunce	56
7.16	Reálné zapojení celého zařízení	57
7.17	Ukázka prostředí ThingSpeak [67].....	59
8.1	Závislost výkonu na čase (porovnání výkonu nabíječky a celkové spotřeby, konstrukce se sledováním 22.5.2023).....	60

8.2	Závislost výkonu na čase (porovnání výkonu nabíječky a celkové spotřeby s dopočítáním vypínání modulů, konstrukce se sledováním 22.5.2023)	61
8.3	Závislost napětí napájecí a nabíjené baterie na čase (konstrukce se sledováním 27.5.2023)	61
8.4	Napětí a proud dodávaný do baterie v závislosti na čase (konstrukce se sledováním 22.5.2023)	62
8.5	Výkon a účinnost MPPT a nabíjecího obvodu v závislosti na čase (konstrukce se sledováním 27.5.2023)	63
8.6	Napětí na výstupu FV panelu v závislosti na čase (konstrukce se sledováním 27.5.2023)	63
8.7	Napětí a proud dodávaný do baterie v závislosti na čase (konstrukce se sledováním 27.5.2023)	64
8.8	Napětí a proud dodávaný do baterie v závislosti na čase (statická konstrukce 26.5.2023)	65
8.9	Výkon vyrobený FV panelem na statické konstrukci a na konstrukci se sledováním v závislosti na čase.....	66

SEZNAM TABULEK

2.1	Porovnání různých typů panelů [16].....	23
5.1	Porovnání různých typů akumulátorů [34]	33
7.1	Porovnání ESP32 a ATmega328P [51]	43
7.2	Možnosti stavů pinů CHRG a FAULT [65].....	51
7.3	Porovnání spotřeby s uspaním a bez uspaní.....	58

ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací fotovoltaického nabíječe akumulátoru se sledováním Slunce. Kvůli efektivitě výroby energie zařízení natačí v azimutu i elevaci tak, aby panel byl stále kolmo ke Slunci. Pro správný návrh zařízení byly v této práci prostudovány technologie a typy fotovoltaických panelů, možnosti řízení fotovoltaické křivky panelu pomocí MPPT, vhodné nabíjecí a ochranné obvody akumulátoru a typy akumulátorů. Toto zařízení nabíjí akumulátor a je energeticky soběstačné, což znamená, že není připojeno k externímu zdroji napájení. Fotovoltaický nabíječ nabíjí Li-ion baterii, pro kterou byla navržena vhodná nabíječka využívající metodu nabíjení CCCV, což je metoda, která nejdříve nabíjí konstantním proudem, následovano nabíjením konstantním napětím. Pro zvýšení efektivity výroby elektrické energie ze Slunce má toto zařízení MPPT regulátor, což je regulátor, který hlídá maximální bod výkonu FV panelu. Snímání polohy Slunce je zde realizováno napěťovými děliči s fotorezistory, kde jejich hodnoty porovnává mikrokontroler ESP32. Tento mikrokontroler se dále stará o vyhodnocení polohy Slunce, nakloněním panelu kolmo ke Slunci, měření elektrických veličin na několika místech tohoto zařízení a odesílání dat bezdrátově pomocí Wifi. Další částí, kterou se tato práce zabývá je samotná konstrukce, na které je panel umístěn. Tato konstrukce musí být robustní a umožňovat pohyb ve dvou osách tak, aby zajistila stálou kolmost FV panelu ke Slunci. Pohyb této konstrukce je realizován dvěma DC motory s převodovkou, které jsou řízeny přes H-můstek mikrokontrolerem ESP32.

1. ENERGIE SLUNEČNÍHO ZÁŘENÍ

Jedná se o obnovitelný zdroj energie, který je ve formě elektromagnetického vlnění. Sluneční záření ovlivňuje několik důležitých přírodních jevů, jako je fotosyntéza, vítr, déšť a mnohé další, díky čemuž může na zemi existovat život. Slunce je staré zhruba 5 až 10 miliard let a skládá se z největší části z prvků atomárního vodíku a helia. Uvnitř Slunce se vytváří díky těmto prvkům jaderná fúze přeměnou lehčích jader vodíku na těžší jádra helia. Tato energie je uvolněna ve formě fotonu, kde postupně od středu Slunce po jeho povrch zvětšuje svoji vlnovou délku. Intenzita dopadajícího záření na povrch Země je ovlivněna atmosférou, která filtruje nejvíce ultrafialové záření, ale také dopad Slunečního záření závisí na znečištění ovzduší, úhlu dopadu záření, oblačnosti a na několika dalších faktorech. Zemským povrchem je pohlcena zhruba polovina dopadeného záření, které se změní v teplo, které je následně vyzářeno ve formě infračerveného záření. [1] [2]

1.1 Využití solární energie

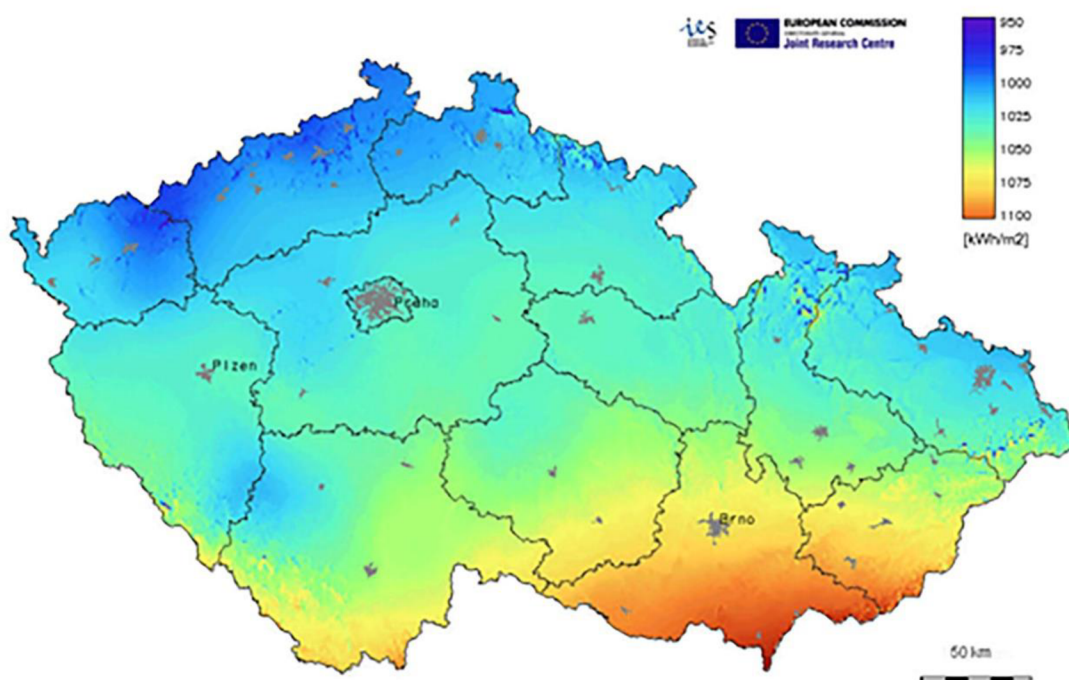
Energii ze Slunce dopadající na zem můžeme využít dvěma způsoby, tak že ji využijeme aktivně, nebo pasivně. Pasivním použitím je myšleno využití solární energie tzv. solární architekturou, což je využití akumulčních stěn, vhodnou orientací, konstrukcí s minimem ochlazovaných stěn, tepelná izolace a jiné využití konstrukce pro maximální udržení energie ve stavbě. Hlavní výhodou tohoto použití je, že nemá provozní náklady a nepotřebuje vnější zdroj energie. Aktivní využití přenáší energii přidavným technickým zařízením a to tak, že se přemění na elektrickou energii díky fotovoltaickému jevu, nebo přeměnou na teplo transformací přímého, nebo rozptýleného solárního záření. Rozdělení využití slunečního záření je znázorněno na obr. 1.1. [2], [3]



Obrázek 1.1 Rozdělení využití slunečního záření [3]

1.2 Sluneční záření v České republice

Česká republika se nachází v mírném podnebném pásu a střídá se zde roční období. Solární svit lze zde odhadnout na 1600 hodin pro horské oblasti až 2000 hodin pro jižní Moravu za rok. Průměrná intenzita slunečního záření je přibližně za rok 950 až 1340 kWh/m². Z této dopadající energie dokážeme využít jenom část, záleží na účinnosti fotovoltaického panelu, znečištění v určitých místech, ale také velmi na lokalitě, což můžeme vidět na obr. 1.2, který znázorňuje dopadající záření v České republice. Zde lze vidět, že nejlépe je na tom jižní Morava. Záření dopadá na povrch Země po celý rok, i přes zataženou oblohu, jen se jedná o rozptýlené záření. S přímým zářením se setkáváme spíše v letních měsících. [4], [5]



Obrázek 1.2 Dopadající záření v ČR [6]

2. FOTOVOLTAICKÉ ČLÁNKY A PANELY

2.1 Fotoelektrický jev

Fotoelektrický jev byl objeven již v 19. století, za jehož objevení je považován německý fyzik Heinrich Rudolf Hertz, pro kterého byl tento jev vedlejším efektem při prokazování Maxwellových elektromagnetických vln, ale podstatu fotoelektrického jevu popsal až v roce 1905 Albert Einstein. Při tomto jevu dojde v materiálu k absorpci fotonu a následně ke generaci fotoelektronu, což je v podstatě obyčejný elektron. Název fotoelektron se používá z toho důvodu, aby bylo zřejmé, že se jedná o elektron vytvořený absorpcí fotonu. [7], [8], [9]

Fotoelektrický jev popisuje rovnice

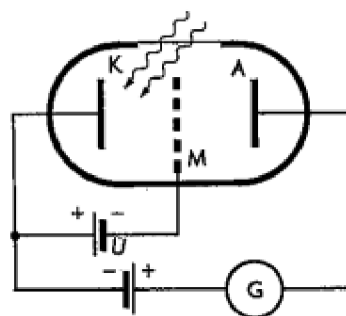
$$h\nu = W_v + E_k, \quad (2.1)$$

kde $h\nu$ je energie dopadajícího záření, W_v je výstupní práce nutná pro uvolnění elektronu a E_k představuje kinetickou energii výstupního elektronu. [8]

U fotoelektrického jevu se jedná o jev vnitřní anebo vnější. Pokud se jedná o fotoelektrický jev vnitřní, potom jsou fotoelektrony (elektrony) uvolňovány uvnitř materiálu, zatímco u vnějšího fotoelektrického jevu dochází k uvolňování fotoelektronů na povrchu materiálu. K uvolňování elektronů dochází, pokud je dodržena podmínka, že vlnová délka záření je menší než mezní hodnota vlnové délky, což lze zapsat vztahem

$$\lambda < \lambda_0, \quad (2.2)$$

kde λ je vlnová délka dopadajícího záření a λ_0 znázorňuje mezní vlnovou délku. Pokud nebude tato podmínka splněna, tak nedochází ke generaci fotoelektronů a fotoelektrický jev nenastává. [7], [8], [9]



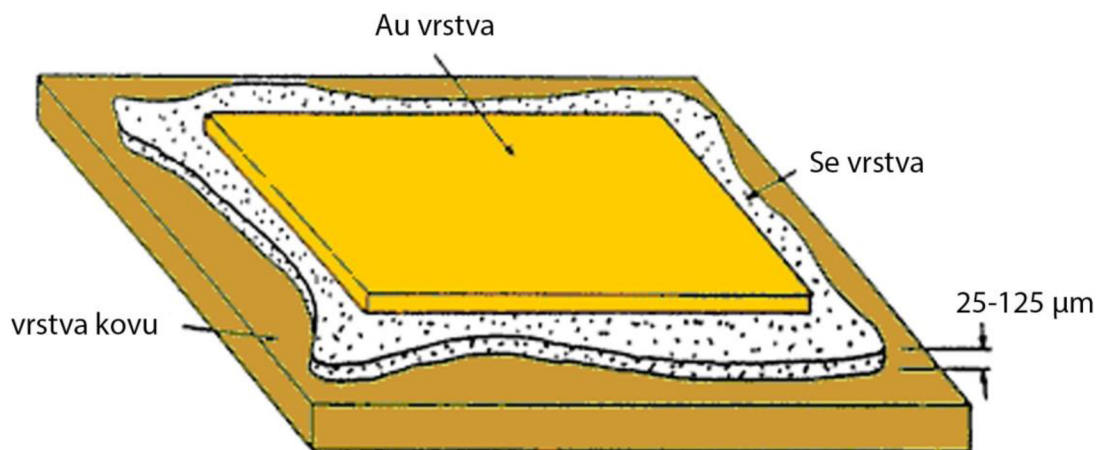
Obrázek 2.1 Vnější fotoelektrický jev [9]

Na obr. 2.1 můžeme vidět princip vnějšího fotoelektrického jevu, kde záření dopadá na desku z kovu, následně se z katody K uvolní elektrony, které pokračují k anodě A, na základě čehož můžeme na galvanometru G měřit napětí. Mřížka M zde slouží k brždění uvolněných elektronů, což uděláme tak, že na ni přivedeme záporné napětí. [7], [8], [9]

2.2 Fotovoltaický článek

2.2.1 Historie fotovoltaického článku

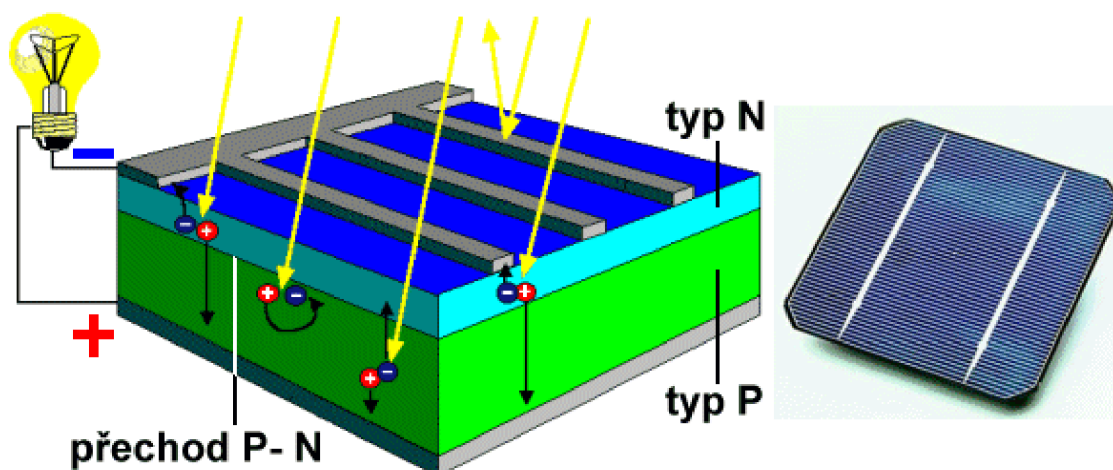
Fotovoltaický článek by neexistoval bez objevu fotoelektrického jevu, který popsal Albert Einstein v roce 1905. Tuto hypotézu potvrdil Robert Andrews Millikan v roce 1916, jehož prvotním cílem bylo tuto hypotézu vyvrátit, což se ale nestalo. Na PN přechodu byl fotoelektrický jev poprvé pozorován mezi selenem a platinou v roce 1876. Další fotovoltaický článek také na materiálech na bázi selenu byl vyroben Charlesem Frittsem o 7 let později s účinností menší než 1 %. Tento fotovoltaický článek je znázorněn na obr.2.2. Až v roce 1940 byl využit křemík, jehož objev si nechal Russell Shoemaker Ohl patentovat. Účinnost tohoto článku se pohybovala okolo 1 %. První fotovoltaický článek, který by se dal už reálně využít a měl účinnost 6 % byl vyroben v roce 1954 a o čtyři roky později se fotovoltaické články začaly využívat v kosmických družicích. Křemík se stále i v dnešní době používá jako primární materiál pro výrobu fotovoltaického článku. Postupem let je výroba fotovoltaických článků energeticky méně náročná a proto se stávají velmi dostupnými a populárními. [10], [11]



Obrázek 2.2 Fotovoltaický článek na bázi selenu Charlese Fritse z roku 1883 [11]

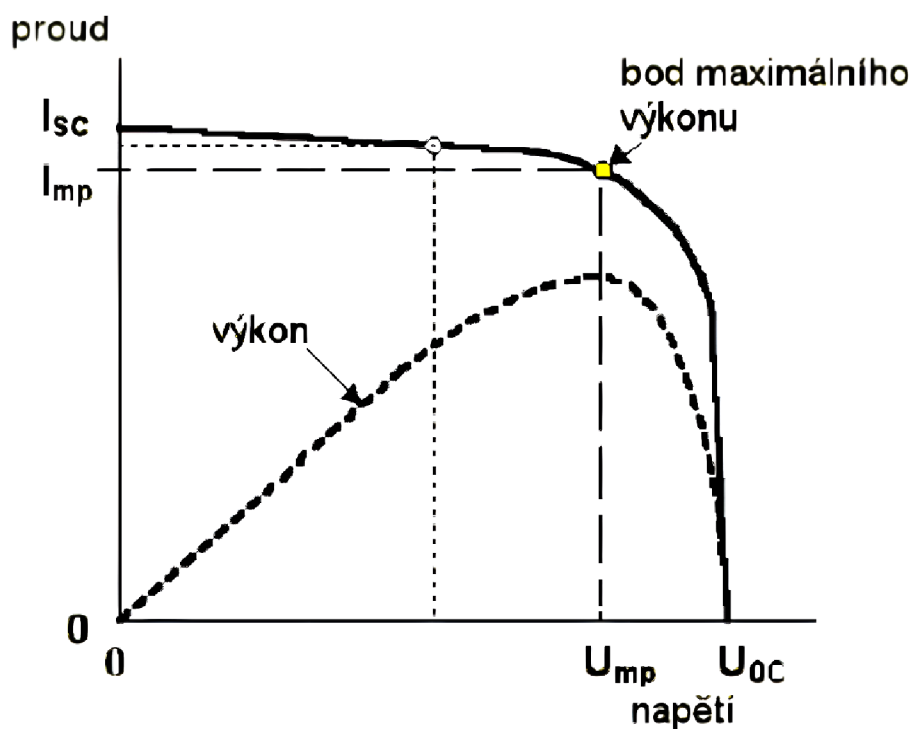
2.2.2 Princip fotovoltaického článku

Fotovoltaický článek je tvořen tenkou křemíkovou destičkou, která je typu P a na ní je nanesena tenká vrstva polovodiče typu N. Tyto vrstvy jsou odděleny PN přechodem, na kterém se po osvětlení článku generuje elektrické napětí, pokud je energie absorbovaného fotonu větší, než je šířka zakázaného pásu. Důvodem je, že v polovodiči vznikne vnitřní fotoelektrický jev a začnou se z krystalické mřížky uvolňovat záporné elektrony. Generované napětí u křemíkových fotovoltaických článků je okolo 0,5 V, proto se většinou samostatné články nepoužívají a zapojují se do fotovoltaických panelů. [12] [13]



Obrázek 2.3 Fotovoltaický článek [12]

Na Obr. 2.4 můžeme vidět voltampérovou charakteristiku fotovoltaického článku, kde hodnota I_{sc} vyjadřuje maximální možný proud (zkratový proud), který zvládne článek dodat za určitého osvětlení. Hodnota U_{oc} je napětí naprázdno, což znamená maximální hodnotu napětí, kterou je článek schopný dodávat, když k němu není připojena zátěž. Parametry U_{mp} a I_{mp} značí hodnoty napětí a proudu, při kterých má článek maximální výkon. [13]



Obrázek 2.4 Fotovoltaický článek [13]

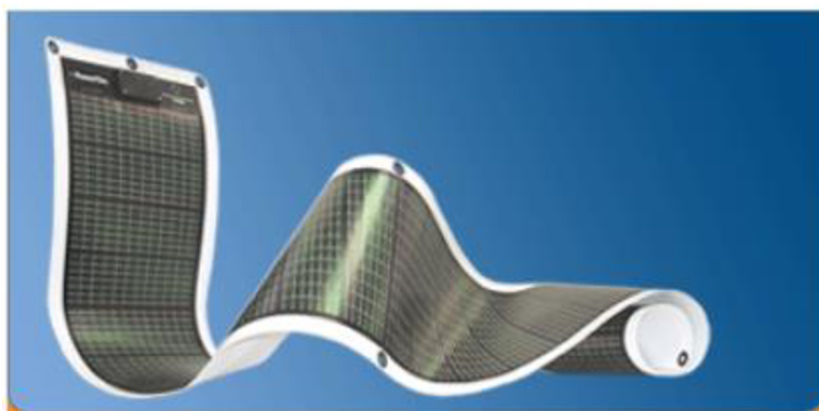
2.2.3 Generace fotovoltaických článků

První generace:

Jedná se o fotovoltaické články z krystalického křemíku s velkoplošným PN přechodem. U této generace se používá poměrně velké množství křemíku a vysoká náročnost při výrobě. Z toho důvodu jsou drahé, ale mají vysokou účinnost, odolnost a stabilitu při výrobě elektrické energie. I v dnešní době je to jeden z nejpoužívanějších článků při elektroinstalaci. [14]

Druhá generace:

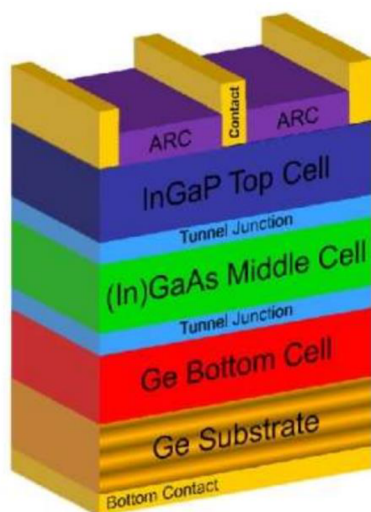
Jedná se o tenkovrstvé FV články a je zde použito až stokrát menší množství křemíku. Cílem této generace bylo zlevnění článku, tím, že se použije méně křemíku, ale zase jsou zde zapotřebí náročné vakuové technologie, které jsou drahé. Jedná se nejčastěji o články z polykrystalického, monokrystalického a amorfního křemíku. Jednou z hlavních výhod tenkovrstvých článků je ohebnost a flexibilita. Fotovoltaickou fólii můžeme vidět na obr.2.5. Tato generace není tolik odolná jako první a rychleji degraduje s časem. Další zásadní nevýhodou tohoto článku je menší účinnost. [14], [15], [16]



Obrázek 2.5 Fotovoltaická fólie [14]

Třetí generace:

Jsou to nejmodernější FV články, které se v podstatě ještě vyvíjejí. U této generace se snažíme maximalizovat využití energie a používají se zde nové materiály. Jedná se o FV články z více tenkých vrstev, více přechodové články, organické články a další. Strukturu vícevrstvého fotovoltaického článku můžeme vidět na obr.2.6. [14] [16]



Obrázek 2.6 Vícevrstvý fotovoltaický článek [16]

2.2.4 Nejpoužívanější typy fotovoltaických článků

Monokrystalický článek:

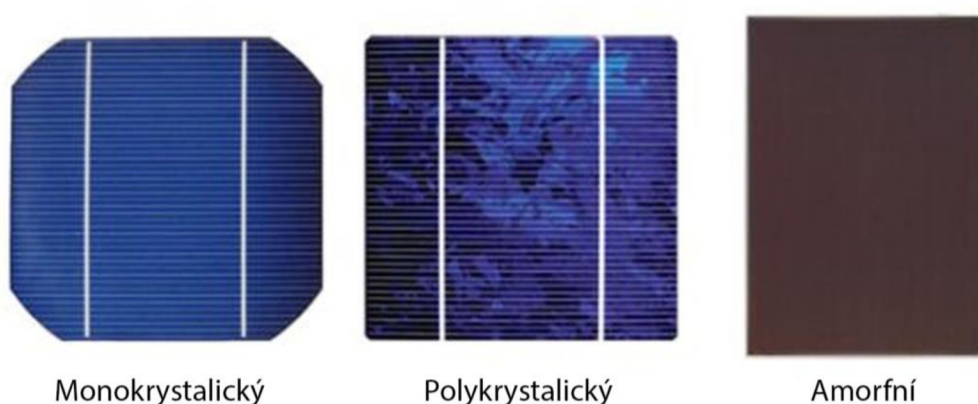
Tento typ článku se vyrábí tažením válcového monokrystalu křemíku typu P z taveniny dlouhé několik metrů nařezané na tenké destičky, které jsou široké 0,2 mm až 0,3 mm. Tato tenká destička se nazývá wafer. Na tuto destičku je nanesen fosfor, který přidá vodivostní plochu typu N a vytvoří se PN přechod. Díky tomu, že je tento typ článku z jediného kusu křemíku, tak má vysokou účinnost kolem 16 % až 18 %, v laboratorních podmínkách až 24 %. Což platí jen za určitých podmínek, jako je ideální osvětlení a úhel, proto pro tento typ článku je nejvhodnější přímý svit na panel, tudíž se nehodí všude. Má dlouhou životnost, ale je nákladný na výrobu. I když v dnešní době díky pokroku ve výrobě už oproti polykrystalickému panelu není v ceně takový rozdíl. Tento typ článku může mít kruhovou podobu, nebo kvazihranatou, která je nákladnější, protože má více odpadu (vyřezává se z kruhové podoby). [14] [16] [17]

Polykrystalický článek:

Polykrystalické články se na rozdíl od monokrystalických nevyrábí tažením, ale křemík se vlévá do formy, proto mohou mít čtvercový tvar. Je to méně náročná metoda s menším množstvím odpadu. Je zde srostlé větší množství křemíkových krystalů, kde díky této struktuře zachytí i světlo pod větším úhlem než monokrystalický, proto je jeho výkon během dne lépe rozložen v čase. Stejně jako monokrystalický článek je dotován fosforem. Tento článek má účinnost 12 % až 16 % a v laboratorních podmínkách se dostane na hodnotu účinnosti 18 %. [14], [16], [17]

Amorfni člunek:

Je to tenkovrstvý křemíkový fotovoltaický člunek, který nemá krystalickou strukturu, má volné uskupení atomů a volné vazby, proto má nižší účinnost okolo 5 % až 7 % a v laboratorních podmínkách 12 %. Výroba se provádí rozkladem vhodných sloučenin křemíku ve vodíkové atmosféře. Tenká vrstva je nanosená na sklo, nebo plast a tento člunek může dosahovat větších rozměrů a může být pružný (pokud je nanosen na pružný materiál). K výrobě se spotřebuje zřejmě méně materiálu, než u předchozích dvou typů a tím se stává amorfni člunek levnější na výrobu. Výhodou je nízká hmotnost, flexibilita a nepotřebuje přímý sluneční svit, protože amorfni vrstva velmi dobře reaguje na rozptýlené světlo. Na obr. 2.7 můžeme vidět různé typy FV panelů. V tabulce 2.1 je porovnání různých typů FV panelů. [14], [16], [17]



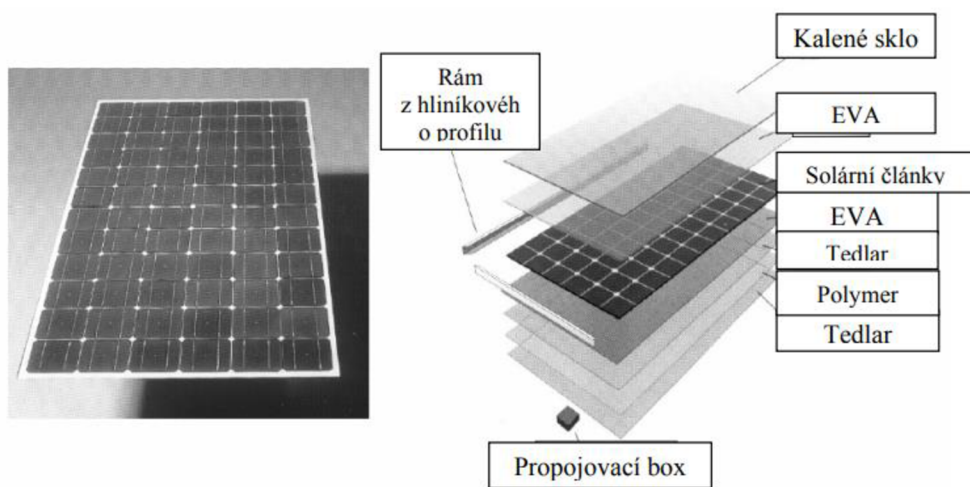
Obrázek 2.7 Typy fotovoltaických panelů [18]

Tabulka 2.1 Porovnání různých typů panelů [16]

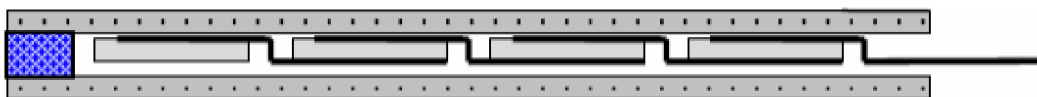
Typ materiálu	Běžná účinnost [%]	Laboratorní účinnost [%]	Životnost [rok]	Podíl na trhu [%]
Monokrystalický křemík	16–18	24	25-30	42
Polykrystalický křemík	12-16	18	10-25	42
Amorfni křemík	5-7	12	10	12
Telurid kadmia (CdTe)	8-10	16	-	<1
Galium arsenid (GaAs)	20	30	20	<1
CIS články	12	19	-	<1
CIGS články	10	18	-	<1

2.3 Fotovoltaický panel

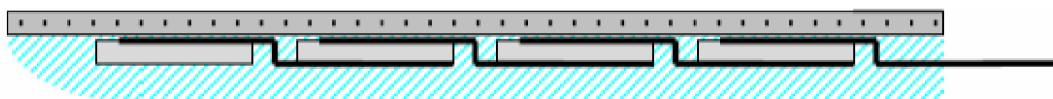
Samostatný solární článek je křehký tenký a může se velmi snadno poškodit. Navíc kontakty na jeho povrchu bez ochrany působením vnějších vlivů by podlely korozi. Jeden článek má napětí kolem 0,5 V s výkonem do 1,4 W, což je pro použití málo, proto se tyto články spojují do fotovoltaických panelů (modulů). Tyto moduly mají také funkci ochrany jednotlivých FV článků. Příklad vrstev modulu lze vidět na obr. 2.8, kde EVA je etylvinylacetátová fólie. Vždy nemusí být použity všechny vrstvy, různé panely se mohou lišit. Krycí vrstva musí být velmi propustná a odolná, aby byl článek ochráněn před působením vnějších jevů. Na obr.2.8 můžeme vidět rozložení jednotlivých vrstev FV panelu. Různé provedení ochrany FV panelů před vnějšími vlivy můžeme vidět na obrázcích 2.8, 2.9 a 2.10. [19], [20]



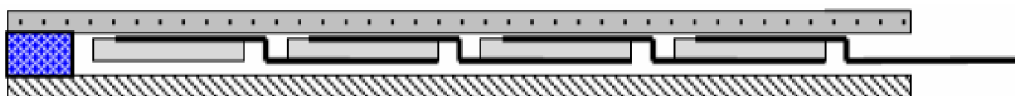
Obrázek 2.8 Solární modul a jeho schéma s ukázkou vrstev [19]



Obrázek 2.9 Oboustranné zasklení [19]



Obrázek 2.10 Zalití do průhledné hmoty, nebo nelaminované folie [19]

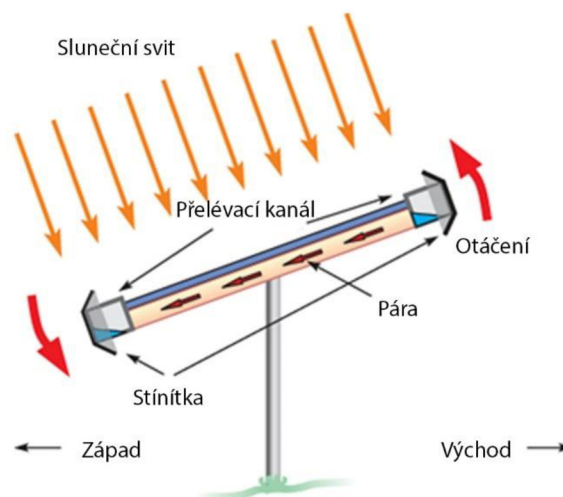


Obrázek 2.11 Zadní strana z netransparentního materiálu [19]

3. DRUHY KONSTRUKCÍ PRO FOTOVOLTAICKÉ PANELY

3.1 Konstrukce se sledováním Slunce

Jedná se o tzv. tracker a jsou to konstrukčně náročnější systémy, které po celý den sledují dráhu Slunce, aby využily maximálně sluneční záření. Jsou finančně nákladnější, náročnější na údržbu a mají menší životnost než statické konstrukce. Využívají se dva základní typy sledovačů, a to pasivní, nebo aktivní. Pasivní sledovače využívají ke svému otáčení kapalinu stlačeného plynu s nízkým bodem varu, která podle se podle toho, jak moc je zahřátá přelévá kanály, a to způsobuje naklání panelu. Toto použití není příliš přesné, proto není vhodné pro všechny typy FV panelů a jsou jednoosé. Ukázkou principu pasivního sledovače Slunce můžeme vidět na obr.3.1. Aktivní tracker používá ke sledování potřebné měření polohy Slunce a k jeho pohybu jsou použity motory. [21], [22]



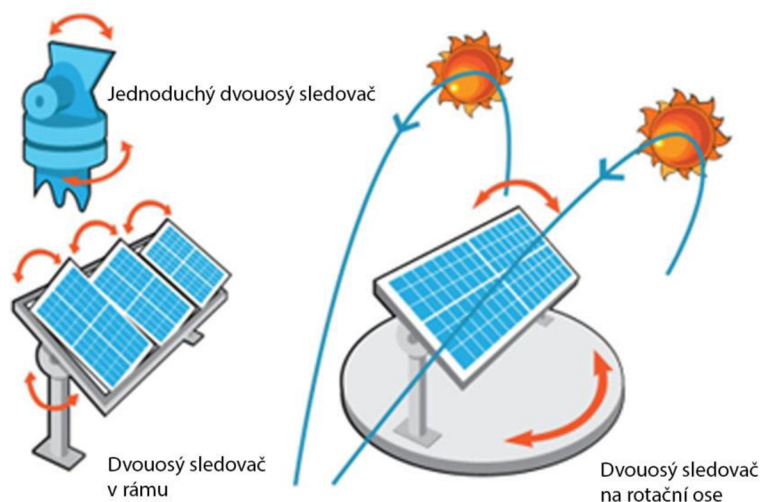
Obrázek 3.1 Pasivní sledovač Slunce [23]

3.1.1 Jednoosé sledovače

Aktivní jednoosé trackery se otáčejí jen kolem jedné osy a mohou být horizontální, nebo vertikální. Jejich náklady jsou nižší, než u dvouosového a mají delší životnost. Další jeho výhodou je vyšší spolehlivost a rychlejší finanční návratnost. Tyto sledovače generují o 15-16 % více ročního výkonu než statická konstrukce. Jednoosý sledovač může být instalován s určitým sklonem, ale potom jsou náročnější požadavky na konstrukci, protože je více namáhána. [21], [22]

3.1.2 Dvouosé sledovače

Aktivní dvouosé sledovače se otáčejí horizontálně i vertikálně zároveň, což umožňuje výkon FV panelu mnohem více využít. Jedná se o poměrně složitá zařízení, které má dvě pohonné jednotky kvůli natočení v azimutu i elevaci. Pohonem nejčastěji bývají v těchto zařízeních elektromotory. Ukázkou možnosti řešení dvouosého sledovače můžeme vidět na obr.3.2. Řízení systému je o něco složitější z důvodu pohybu do všech směrů. Z tohoto důvodu jsou nákladnější a náchylnější na poruchy, což je způsobeno i dalšími mechanickými částmi, jako jsou převodovky, a již zmíněné motory a další. Generují o 45-50 % vyšší roční výkon než statické konstrukce. [21], [22]



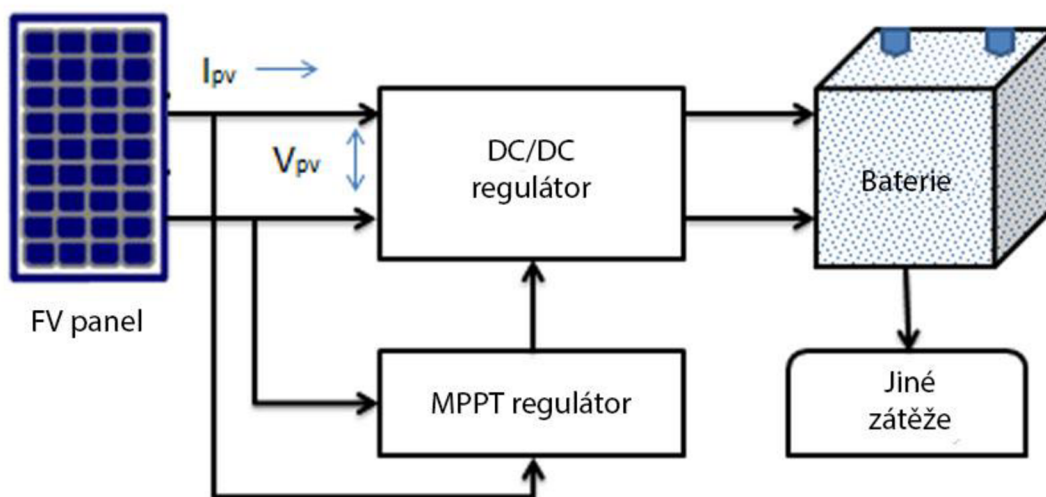
Obrázek 3.2 aktivní dvouosý sledovač slunce [24]

3.1.3 Statická konstrukce

Jsou to konstrukce, které nepotřebují další přídavné mechanismy. Tyto konstrukce se liší podle užití, jestli jsou určeny pro střechy, nebo pro volná prostranství. V našich podmínkách se FV panely na statických konstrukcích orientují na jih a jejich optimální sklon je 33° a musí mít mezi sebou potřebné rozestupy, aby se navzájem nestínily. Dále se také musí volit vhodné místo, aby nebyly stíněny např. stromy, okolními budovami a dalšími faktory. Jejich nespornou výhodou je nenáročnost a nepotřebují zvláštní údržbu. Nevýhodou je nevyužití veškerého dostupného záření, protože Slunce se během dne pohybuje a FV panely pod úhlem nefungují tak dobře, jako když jde na ně přímé záření. [20]

4. MPPT

Zkratka MPPT pochází z anglického Maximum Power Point Tracking, což znamená sledování maximálního bodu výkonu. Je to regulátor, který hlídá optimální napětí a proud vyrobený FV článkem, aby zaručil maximální dodávaný výkon. Tento bod maximálního výkonu se mění v závislosti na slunečním svitu a teplotě. Úkolem MPPT regulátoru je bod maximálního výkonu hlídat a zaručit tak optimální výrobu elektrické energie i za horších podmínek. Účinnost těchto regulátorů je okolo 93 % - 97 % a účinnost FV panelů zvýší o 10 % - 15 % v letním období a o 20 % - 45 % v zimě, kdy tyto regulátory pracují lépe. MPPT regulátory se dnes vyskytují jak analogové, tak řízené mikroprocesorem. Zapojení FV elektrárny za použití MPPT regulátoru můžeme vidět na obrázku 4.1. [25]



Obrázek 4.1 Blokový diagram FV elektrárny s MPPT [26]

4.1 Metody MPPT

4.1.1 Constant Voltage (CV)

Metoda Constant Voltage využívá referenčního napětí, nejčastěji U_{MPP} , kde tato hodnota vychází z voltampérové charakteristiky FV panelu. Při tomto napětí má FV panel maximální výkon. Na základě tohoto napětí metoda Constant Voltage reguluje výstup FV panelu. Tato metoda nezohledňuje teplotní změny. CV je poměrně nepřesná, protože nehledá maximální bod výkonu, ale napětí, při kterém by měl být maximální výkon. Jenže bod maximálního výkonu se může částečně lišit, např. v závislosti na teplotě. Za určitých podmínek může být metoda Constant Voltage přesnější, než metoda Incremental Conductance (IC) nebo Perturb & Observe (P&O). [27]

4.1.2 Perturb and Observe Methods (P&O)

Výhodou této metody je, že nepotřebuje znát parametry FV panelu, okolní teplotu, ani měření slunečního záření. Metodě P&O stačí jen měření napětí a proudu FV panelu. Princip Perturb and Observe spočívá v tom, že metoda neustále periodicky mění napětí FV panelu (zvyšuje, nebo snižuje) pokaždé o stejný krok a pozoruje, jestli se výkon FV panelu zvedl, nebo ne. Pokud se výkon zvýšil, tak znovu změní napětí o definovaný krok stejným směrem, dokud nedojde k poklesu. Tímto způsobem potom udržuje výkon kolem maximálního bodu. Nevýhodou je, že tato metoda neurčí přesně maximální výkon, ale osciluje kolem bodu maximálního výkonu, což vede ke ztrátám. Proto musíme správně volit krok napětí. Pokud budeme mít nastavený velký napěťový krok, potom bude rychlejší odezva na měnící se intenzitu, ale bude menší výkon, protože se zvýší rozkmit kolem maximálního bodu. Tato metoda je jedna z nejrozšířenějších díky své jednoduchosti. Můžeme se setkat i s jejími modifikacemi, jako je třibodový P&O, nebo optimalizovaný P&O. [27], [28]

4.1.3 Incremental Conductance (IC)

Metodu Incremental Conductance můžeme přeložit jako metodu přírůstkové vodivosti. Pro IC v bodě maximálního výkonu platí rovnice (4.1).

$$\frac{dI_{FV}}{dU_{FV}} + \frac{I_{FV}}{U_{FV}} = 0, \quad (4.1)$$

Kde I_{FV} je proud fotovoltaického panelu a U_{FV} je jeho napětí. Za předpokladu, že nebude dodržena rovnost a rovnice se změní na vztah (4.2), potom se aktuální bod nachází na pravé straně od maximálního bodu výkonu. Pokud bude dodržen vztah (4.3), tak aktuální bod je nalevo od bodu maximálního výkonu. [27]

$$\frac{dI_{FV}}{dU_{FV}} + \frac{I_{FV}}{U_{FV}} < 0, \quad (4.2)$$

$$\frac{dI_{FV}}{dU_{FV}} + \frac{I_{FV}}{U_{FV}} > 0, \quad (4.3)$$

Metoda Incremental Conductance funguje tedy na principu porovnávání okamžité (I_{FV}/U_{FV}) a přírůstkové vodivosti (dI_{FV}/dU_{FV}). Hledání maximálního bodu metoda IC realizuje pomocí snižování nebo zvyšování napětí FV panelu a porovnávání vodivostí, dokud nenajde tento bod maximálního výkonu. Bod zůstane nastaven a IC dále porovnává vodivosti, do chvíle, než nastane rozdíl vodivostí, potom hledá nový bod maximálního výkonu. Podle velikosti kroku snížení, nebo zvýšení napětí se mění rychlost hledání bodu maximálního výkonu. Krok se nesmí nastavit příliš velký, což by mohlo vést k rezonanci, ale nesmí být zase příliš malý, protože potom by systém byl pomalý. Výhodou IC je, že najde přesně bod maximálního výkonu a udržuje tento bod. Dokáže také velmi rychle reagovat na změnu podmínek. Nevýhodou je však komplikovanost a tím i cenová náročnost. [27], [28], [29]

4.1.4 Fractional Open-Circuit Voltage

Jedná se o poměrně jednoduchou metodu, pro kterou potřebujeme měřit jen napětí naprázdno U_{OC} . Napětí naprázdno se změří tak, že na malou chvíli se panel odpojí od zátěže. Další parametr, který pro tuto metodu musíme znát je tzv. konstanta proporcionality k_{OC} , která závisí na použitém FV panelu a pohybuje se okolo 0,71 až 0,78. Vynásobením napětím na prázdno a konstantou proporcionality získáme napětí U_{MPP} , při kterém by měl mít FV panel největší výkon. Jedná se o vztah (4.4). Výhodou této metody je jednoduchost a není zde potřeba ovládání mikrokontrolerem. Nevýhodou je nepřesnost a částečná ztráta výkonu kvůli odpojování zátěže. U metody Fractional Open-Circuit nenajdeme přesně bod maximálního výkonu, ale jen jeho přibližný odhad. Další nevýhodou je, že tato metoda funguje špatně při částečném zastínění FV panelu, protože při zastínění vznikají lokální maxima napětí na jednotlivých FV článcích, což znamená, že se napětí na různých článcích liší. [30]

$$U_{MPP} \approx k_{OC} \cdot U_{OC} , \quad (4.4)$$

4.1.5 Fractional Short-Circuit Current

Tato metoda je obdobná jako Fractional Open-Circuit Voltage, jen se zde měří proud nakrátko I_{SC} . Měření zkratového proudu probíhá tak, že je do obvodu přidán spínač, který zkratuje FV panel a změří se pomocí proudové sondy proud nakrátko. Další parametr, který musíme znát je konstanta proporcionality k_{SC} , která závisí na použitém FV panelu. Obvykle nabývá hodnot 0,78 až 0,92. Dosazením těchto hodnot do vzorce (4.5) získáme proud I_{MPP} , při kterém má FV panel maximální výkon. Tato metoda se moc často nepoužívá, protože měření proudu na krátko je komplikovanější a vyžaduje další součástky. Navíc nenajde přímo maximální bod výkonu, ale jen přibližný. [30]

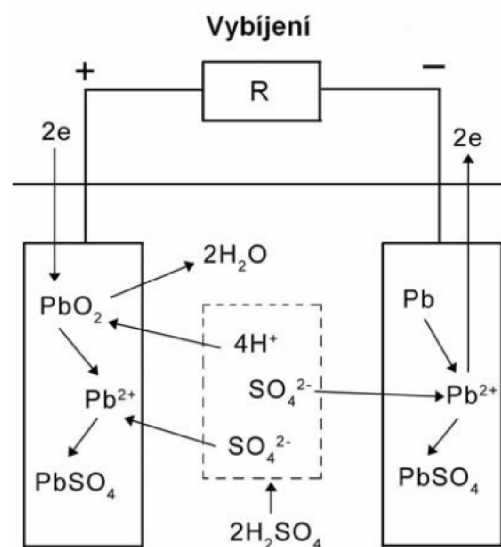
$$I_{MPP} \approx k_{SC} \cdot I_{SC} , \quad (4.5)$$

5. AKUMULÁTORY

Jedná se o zařízení, které dokáže akumulovat energii. Nejčastěji se jedná o energii elektrickou. Akumulátor pro akumulaci elektrické energie je sestaven z jednoho, nebo více sekundárních galvanických článku. V sekundárním článku probíhá chemická reakce mezi elektrodami a elektrolytem. Elektrody jsou v článku dvě (anoda a katoda). Elektrolyt je roztok, který vede elektrický proud a může mít kapalnou anebo tuhou podobu. Akumulátory lze opětovně nabít a jsou zdrojem stejnosměrného proudu. Materiály pro elektrody a kombinace chemických látek pro elektrolyt určují vlastnosti akumulátoru, čímž je myšlena životnost a kapacita. Různé typy akumulátorů jsou rozebrány níže. [31]

5.1 Olověné akumulátory

Tento typ akumulátoru využívá anody a katody vyrobené z olova Pb a jako elektrolyt je zde použita zředěná kyselina sírová H_2SO_4 . Olovo je poměrně levný a dostupný materiál, proto jsou tyto baterie levné a hodně používané. Jednotlivý olověný článek má napětí okolo 2 V. Jejich další předností je dlouhá životnost až tisíce cyklů. Nevýhodou olověných akumulátorů je z důvodu použitého materiálu vysoká hmotnost. Olověný článek za stavu vybíjení můžeme vidět na obr.5.1. Používají se nejčastěji pro start automobilu, jako záložní zdroje, nebo pro akumulaci energie z domácích FV systémů. Olověné akumulátory se dělí na staniční, trakční a startovací. Startovací olověné akumulátory se využívají, jak už název vypovídá pro start spalovacích motorů. Staniční se využívají jako záložní zdroj při výpadku elektrické energie ze sítě a trakční se používají k pohonu např. elektromobilů. [19]



Obrázek 5.1 Olověný článek při vybíjení [19]

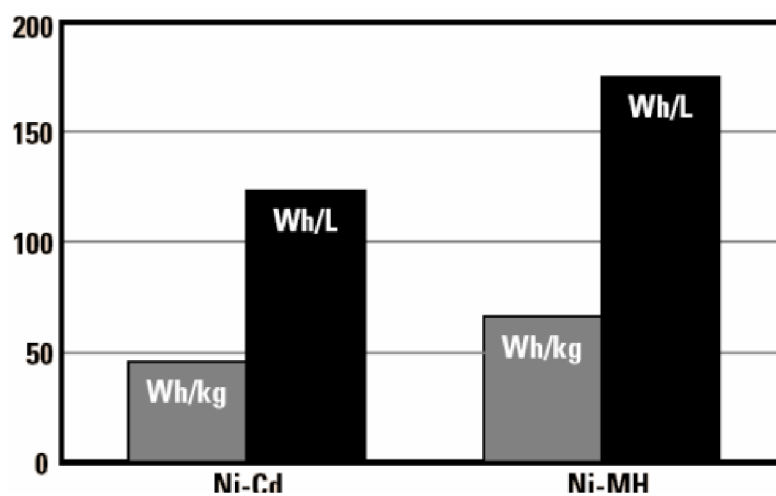
5.2 Akumulátory na bázi niklu Ni

5.2.1 Ni-Cd akumulátory

Jedná se o Nikl-kadmiový článek. U tohoto akumulátoru je kladná elektroda tvořena z oxihydroxidu niklu a záporná elektroda houbovým kadmíem Cd. Elektrolytem je v tomto případě roztok hydroxidu draselného, který se značí KOH. Hlavní výhodou je dlouhá životnost, mohou fungovat za nízkých teplot a jednou z největších výhod je, že jim nevadí přebíjení. Nevýhodou je vysoká pořizovací cena a kadmium je toxický prvek. Akumulátory Ni-Cd se vyrábějí větrané, nebo uzavřené. Podle jejich konstrukce a aplikace volíme typ nabíjení. Můžeme je nabíjet konstantním napětím, což se volí většinou pro větrané akumulátory. Konstantní napětí se musí nastavit na velikost napětí, které odpovídá nabitě baterii. Další typ nabíjení je konstantním proudem, kde se tento způsob volí pro uzavřené články. Poslední metodou nabíjení Ni-Cd je nabíjení při teplotně kompenzovaném napětí, což je velmi složitý způsob a používá se převážně pro baterie v letectví. [19]

5.2.2 Ni-MH akumulátor

Jsou to nikl-metalhydrid akumulátory. Kladná elektroda je z oxihydroxidu niklu a záporná se skládá z různé slitiny kovů, nejčastěji se v dnešní době používá slitina ZrCrNi (zirkonu, chromu a niklu), Mg_2Ni (hořčík a nikl), nebo $LaNi_{5-x}Sn_x$ (lanthan, nikl a cín). Jmenovité napětí článku tohoto akumulátoru se pohybuje okolo 1,2 V a má znatelně vyšší kapacitu, než článek Ni-Cd, který funguje na podobném principu. Porovnání hustoty energie Ni-Cd a Ni-MH článků můžeme vidět na obr.5.2. Jejich výhodou je dlouhá životnost a vysoký proud, který je způsoben nízkým vnitřním odporem. Nevýhodou je, že špatně pracují za nízkých teplot a při vysokých teplotách dochází k poměrně velkému samovybíjení. [19]

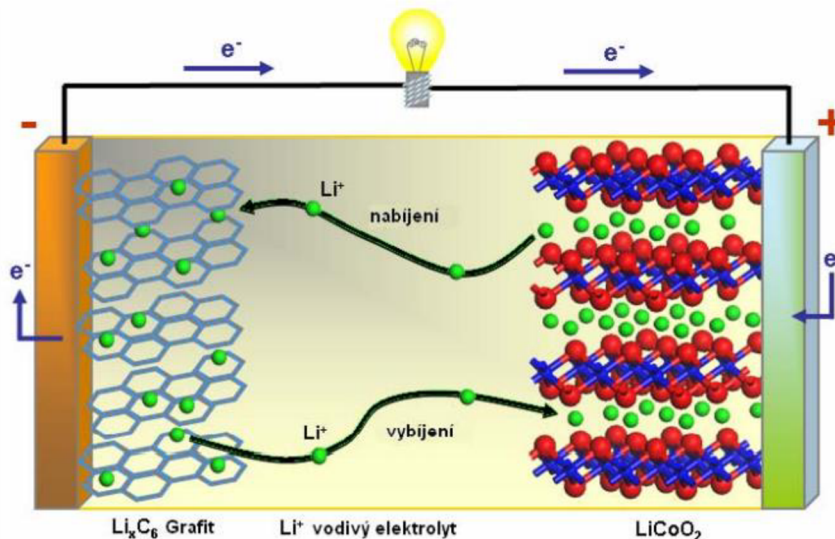


Obrázek 5.2 Porovnání hustoty energie Ni-Cd a Ni-MH článků [19]

5.3 Akumulátory na bázi lithia (Li)

5.3.1 Akumulátor Li-ion

Články těchto akumulátorů obsahují lithium v podobě iontů, proto se dají považovat za bezpečné. Záporná elektroda je zde tvořena nejčastěji grafitem. Jmenovité napětí jednoho článku je okolo 3,6 V a při vybíjení je pokles napětí téměř lineární, což se může hodit pro sledování úrovně vybití článku. Mají velkou hustotu energie. Li-ion článek můžeme vidět na obr.5.3. Další výhodou je, že mají nízký vnitřní odpor, proto dokáží uvolnit velké napětí. Netrpí příliš velkým samovolným vybíjením oproti Ni-Cd a Ni-MH. Nemají paměťový efekt, což znamená, že je můžeme nabíjet akumulátor kdykoli, bez ohledu na předchozí úroveň nabití, což se může hodit u mnoha aplikací. Nevýhodou je vysoká cena akumulátoru. [19]



Obrázek 5.3 Li-ion článek [19]

5.3.2 Akumulátor Li-Pol

Jedná se o Lithium-polymerové akumulátory. Tento akumulátor je v podstatě nástupce Li-ion baterií s hlavním rozdílem v elektrolytu. Li-Pol mají na rozdíl od Li-ion elektrolyt v tuhém stavu, zatímco Lithium iontové mají elektrolyt kapalný. Kladná elektroda je zde tvořena lithiem Li a záporná se většinou vyrábí z kobaltu Co. Nabíjení je u těchto akumulátorů stejné, jako u Li-ion. Mají větší hustotu energie a jsou rozměrově menší. Jejich využití je například v telefonech, kde je výhodou, že nemusí mít pevný obal (nemusí být lisovány), proto se dají vyrobit v různých tvarech. Nemají paměťový efekt a pomalu se samovybíjejí. Nevýhodou je vysoká cena. [32]

5.3.3 Akumulátor LiFePO₄

Jedná se o Lithium-železo-fosfátovou baterii. Je to také nástupce Li-ion akumulátorů. U tohoto akumulátoru je kladná elektroda z Lithium-železo-fosfátu a záporná je tvořena z grafitu. LiFePO₄ má nízký vnitřní odpor, tudíž dokáže generovat vysoký proud. Další jeho výhodou je dlouhá životnost a dobrá teplotní stabilita. Oproti jiným Li bateriím mu méně vadí přebíjení. Jmenovité napětí jednoho článku je 3,2 V. Tento typ akumulátoru špatně pracuje při nízkých teplotách. Další jeho nevýhodou je, že trpí na samovybíjení více, oproti jiným Li článkům. Porovnání různých typů akumulátorů můžeme vidět v tabulce 5.1. [33]

Tabulka 5.1 Porovnání různých typů akumulátorů [34]

Typ baterie	Hustota energie [Wh]	Energetická Účinnost [%]	Hustota výkonu [Wh]	Životnost cyklu [cykly]	Samovybíjení [%/měsíc]
Olověná baterie	30-40	70-90	180	200-2000	3-4
Li-ion	100-250	75-90	1800	500-2000	5-10
Li-pol	130-200	70	3000	>1200	4-8
Ni-MH	30-80	70	250-1000	500-100	30
Ni-Cd	40-60	60-90	140-180	500-2000	10-15
NaS	150	80-90	120-150	250	-
VRB	25-40	80	100-150	>16000	<1

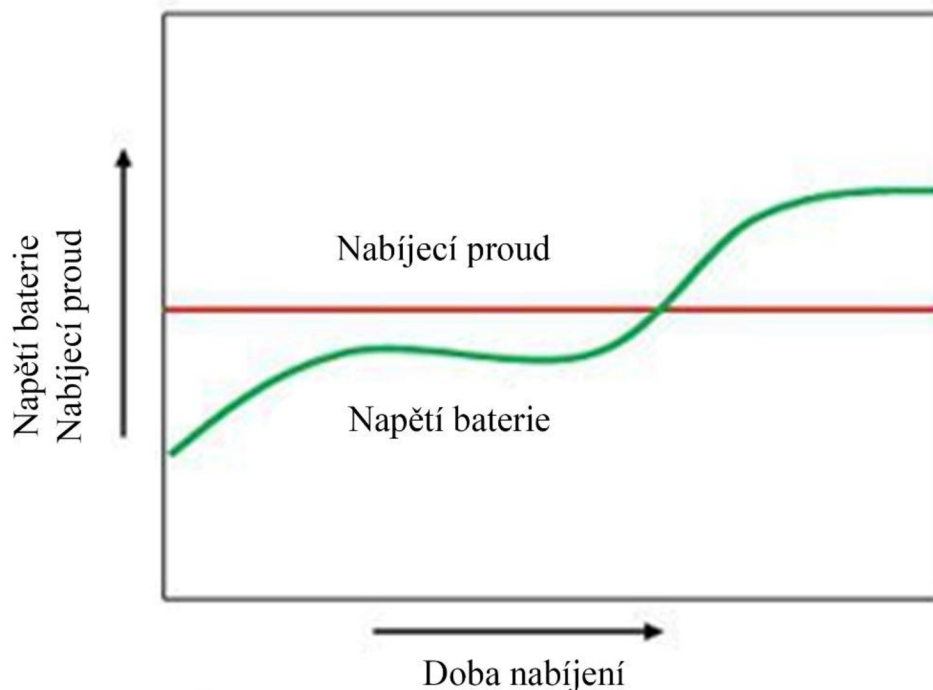
6. NABÍJECÍ A OCHRANNÉ OBVODY AKUMULÁTORU

6.1 Nabíjecí metody akumulátoru

Nabíjecí metody závisí hlavně na použitém akumulátoru a času nabíjení. Proto musíme zvolit správnou metodu nabíjení v závislosti na aplikaci a našich požadavcích na nabíjení. Různé metody mohou ovlivnit životnost baterie, proto si musíme dát při výběru vhodného typu nabíjení záležet.

6.1.1 Nabíjení konstantním proudem

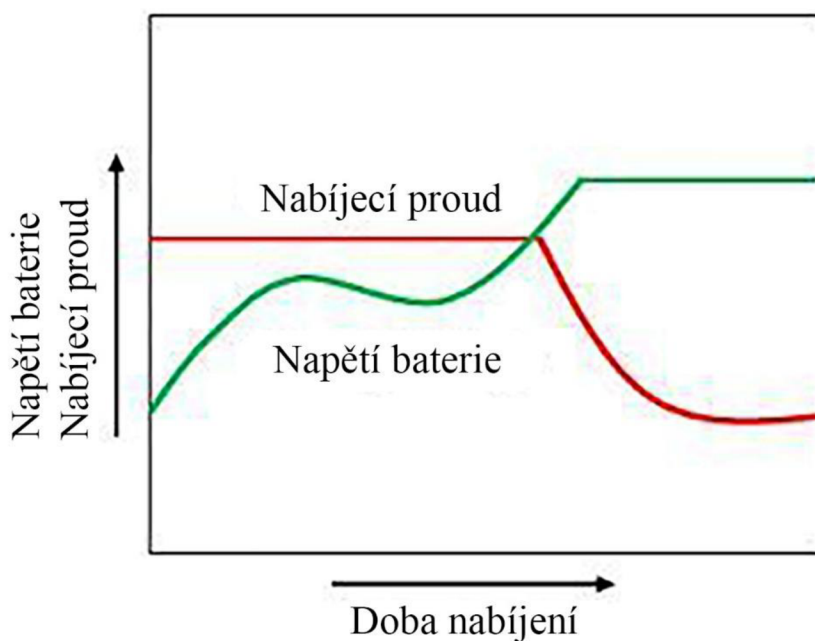
Jak už název napovídá, tato metoda nabíjení funguje na principu udržování konstantního proudu při dobíjení akumulátoru. Po určité době po připojení svorek k baterii se na výstupu akumulátoru začne zvedat napětí, proto se musí regulovat odpor, aby zůstal proud stále konstantní. V praxi se tato metoda občas používá způsobem, že akumulátory nabíjíme ve dvou etapách. V první etapě nabíjíme vyšším konstantním proudem a v druhé etapě přepneme na nižší konstantní proud a s tímto proudem dokončíme nabíjení. Touto metodou snížíme plynování akumulátoru. Tímto typem nabíjení může dojít k přebití, proto je potřeba použít např. časovač. Metoda nabíjení konstantním proudem se používá převážně u článků Ni-MH a Ni-Cd. Průběh nabíjení konstantním proudem můžeme vidět na obrázku 6.1. [35]



Obrázek 6.1 Průběh nabíjení konstantním proudem [35]

6.1.2 Nabíjení konstantním napětím

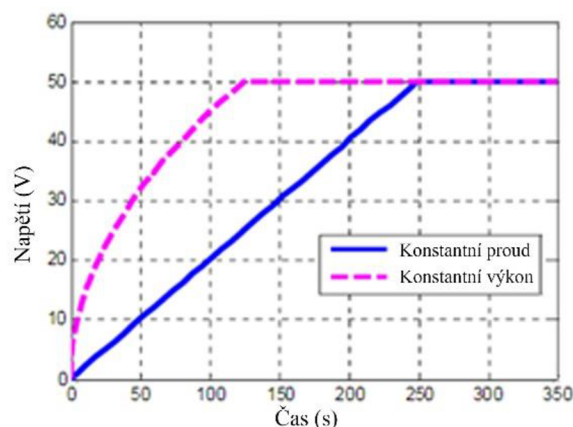
U této metody je akumulátor nabíjen konstantním napětím. Vybitá baterie má nižší napětí a teče do akumulátoru vysoký proud. Jak se postupně baterie nabíjí, tak proud klesá, až na minimální hodnotu. Napětí akumulátoru a zdroje se téměř srovnají, tudíž nedojde k přebití baterie a zdroj ji jen udržuje nabitou. Průběh nabíjení konstantním napětím můžeme vidět na obrázku 6.2. Tato metoda se používá převážně u olověných akumulátorů. [35]



Obrázek 6.2 Průběh nabíjení konstantním napětím [35]

6.1.3 Nabíjení konstantním výkonem

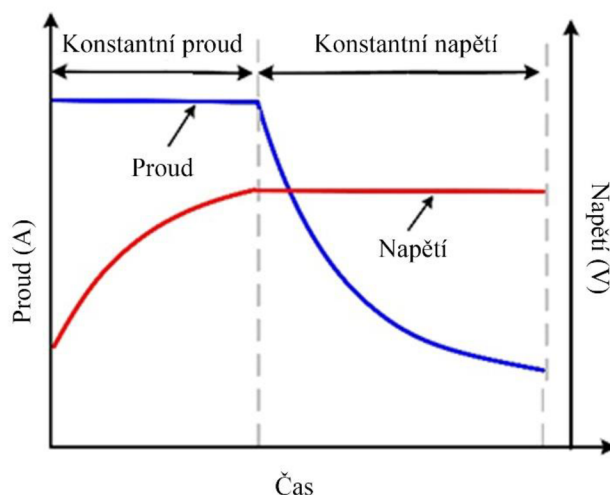
Nabíjení konstantním výkonem funguje na principu, že zdroj dodává do svorek akumulátoru stále stejný výkon. Výkon se dá spočítat jako násobek napětí a proudu. Napětí na vybitém akumulátoru je nižší, proto na začátku nabíjení teče do baterie větší proud. S časem nabíjení roste napětí, z toho důvodu klesá proud, aby byl stále konstantní výkon. V porovnání s metodou konstantního napětí zde proud neklesne tak rychle. Porovnání těchto dvou metod můžeme vidět na obr.6.3. Tato metoda se používá u aplikací, kdy potřebujeme akumulátor rychle nabít. [36]



Obrázek 6.3 Porovnání průběhu nabíjení metody s konstantním napětím a konstantním výkonem [36]

6.1.4 Nabíjení konstantním proudem následováno konstantním napětím (CCCV)

Zkratka CCCV pochází z anglického Constant Current followed by Constant Voltage. Jedná se v podstatě o kombinaci metody konstantního proudu a konstantního napětí. Nejprve je akumulátor nabíjen konstantním proudem, do doby, než svorky akumulátoru dosáhnou hodnotu napětí, která je předem nastavená. Poté začne obvod nabíjet akumulátor metodou konstantního napětí, proud klesá a baterie se tolik neničí. Při nabíjení konstantním napětím proud klesne na velmi nízkou úroveň. Napětí zdroje a akumulátoru se srovnají a nedochází k přebíjení. Průběh nabíjení metodou CCCV můžeme vidět na obrázku 6.4. Tato metoda je důležitá při nabíjení lithiových (Li) článků. [37]



Obrázek 6.4 Průběh nabíjení metodou CCCV [37]

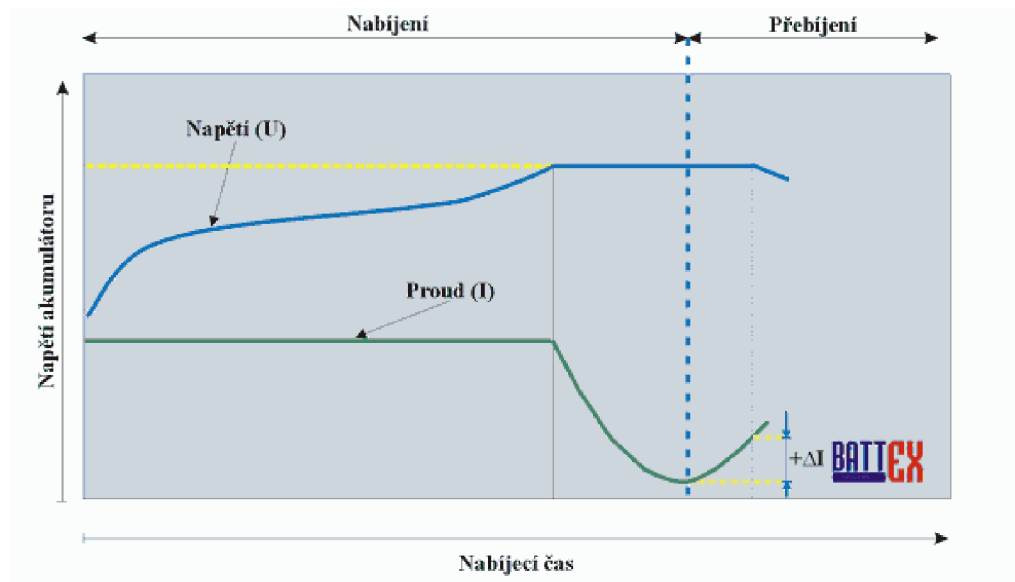
6.2 Ukončení nabíjení

6.2.1 Časové ukončení nabíjení

Metoda časového ukončení funguje na principu vypnutí nabíjení anebo omezením proudu na úplné minimum, po předem definovaném časovém intervalu, jen aby udržel baterii nabitou a nedocházelo k samovolnému vybití akumulátoru. Tato metoda se využívala dříve, ale u levnějších nabíječek se s ní můžeme setkat i v dnešní době. Výhodou této metody je jednoduchost a cena. Je zde ale mnoho nevýhod, například pokud baterie nebyla plně vybitá a čas je pevně definovaný, tak dochází k přebíjení a životnost baterie klesá. Musí se dbát na to, aby byla baterie řádně vybitá anebo musíme upravit čas nabíjení. Navíc realizace této metody bývá často prováděna čítači, kde hlavní problém nastává při výpadku energie, pokud nemáme záložní zdroj. V takovém případě začne čítač odpočítávat čas od začátku a opět dochází k přebíjení akumulátoru, což vede k jeho degradaci. [38]

6.2.2 Proudové ukončení nabíjení

Tento typ ukončení se používá jen u specifického typu nabíjení. Jedná se o nabíjení podobné typu CCCV, což znamená, že nejdříve nabíjí konstantním proudem a poté přejde na nabíjení konstantním napětím, jen s tím rozdílem, že čeká, až začne proud zase narůstat a v tento okamžik ukončí nabíjení. Nejedná se o častý typ ukončení nabíjecího procesu, protože není příliš spolehlivý, převážně za vyšších teplot. Průběh ukončení nabíjení metodou proudového ukončení u Ni-Cd článků můžeme vidět na obrázku 6.5. Používá se při ultrarychlém nabíjení. [39]



Obrázek 6.5 Metoda proudového ukončení u Ni-Cd akumulátorů[39]

6.2.3 Napět'ové ukončení nabíjení

Napět'ové ukončení metodou V_{CO} :

Tato metoda funguje na principu vypnutí nabíjení po dosažení určité předem definované hodnoty napětí. Pro tuto metodu musíme znát nabíjený akumulátor, abychom mohli toto maximální napětí definovat. Nevýhodou této metody je nepřesnost způsobena tím, že průběh nabíjení akumulátoru se mění v závislosti na teplotě, nebo proudu kterým nabíjíme. [40]

Napět'ové ukončení metodou PKV:

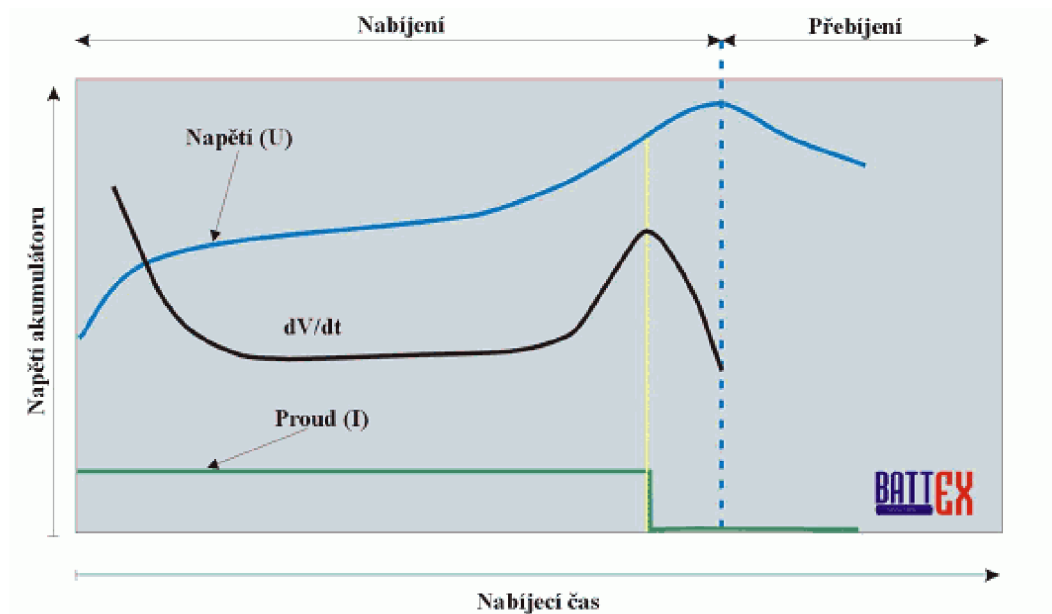
Zkratka PKV pochází z anglického slova Peak Voltage. Tato metoda vyhledává maximální napětí na akumulátoru, při kterém přestane baterii nabíjet. Je v podstatě podobná jako metoda V_{CO} , jen se zde nemusí hodnota definovat a zařízení ji najde samo, proto nemusí znát charakteristiky akumulátoru. Nevýhodou je, že najít bod maximálního napětí je velmi složité při nabíjení malými proudy. Při nabíjení vysokými proudy vzniká zahřívání akumulátoru a metoda je opět zkreslována. [41]

Napět'ové ukončení metodou $-\Delta U$:

Jedná se o poměrně používanou metodu při nabíjení Ni-Cd a Ni-MH akumulátorů, která sleduje napětí baterie, dokud nedojde k poklesu napětí. Tento pokles je předem definovaný. Bývá to většinou hodnota 5 mV pro Ni-MH a 10 mV pro Ni-Cd na článek baterie. Jelikož čeká až poklesne napětí, tak dochází k přebíjení akumulátoru, ale jen krátce. Metoda není vhodná pro velmi malé proudy, protože zde dojde k poklesu velmi pomalu, nebo k němu nedojde vůbec. Také není vhodná pro příliš velké proudy, což souvisí s přehříváním akumulátoru a změnou charakteristiky vlivem teploty. [42]

Napět'ové ukončení metodou d^2V/dt^2 :

Tato metoda je založena na principu sledování druhé derivace napětí v čase a sleduje napět'ovou derivační špičku, při které zastaví dobíjení. Výhodou této metody je, že nedochází k přebíjení akumulátoru, což má pozitivní vliv na jeho životnost. Nevýhodou je, že nedojde k plnému nabití. Grafické znázornění ukončení nabíjení na Ni-Cd akumulátoru metodou d^2V/dt^2 můžeme vidět na obr.6.6. [43]



Obrázek 6.6 Metoda d^2V/dt^2 ukončení u Ni-Cd akumulátorů [43]

6.2.4 Teplotní ukončení nabíjení

Teplotní ukončení metodou T_{CO} :

Metoda funguje na principu přerušení nabíjení při dosažení předem definované teploty. Využívá vlastnosti, že akumulátor se nabíjením zahřívá. Musíme znát teplotu, při které je akumulátor plně nabitý. Metoda funguje správně jen za předpokladu, že se akumulátor vždy nabíjí při stejné okolní teplotě a proudu, protože při změně nabíjecího proudu se mění i teploty akumulátoru. Pokud je teplota nižší, dochází k přebíjení. Za předpokladu, že je okolní teplota vyšší, než při které je T_{CO} definováno, baterie se nenabije do plna. Metoda je velmi nepřesná. [44]

Teplotní ukončení metodou $\Delta T/\Delta t$:

Tato metoda funguje na principu sledování nárůstu teploty v čase. Využívá vlastnosti, že u akumulátoru ke konci nabíjení začne stoupat teplota rychleji, než na začátku a uprostřed nabíjení. V okamžiku, kdy začne teplota akumulátoru stoupat rychleji, než $0\text{ }^\circ\text{C}$ až $1\text{ }^\circ\text{C}$ za minutu, dojde k přerušení nabíjení. Metoda funguje nejlépe na vybité a zchladlé akumulátory za pokojové teploty do $30\text{ }^\circ\text{C}$. [45]

6.3 Ochranné obvody akumulátorů

6.3.1 Ochrana proti zkratovému proudu

Tato ochrana slouží k odpojení akumulátoru v případě, kdy dojde ke zkratu. V případě zkratu může dojít k vážnému poškození baterie, jelikož vznikne velký odběr proudu a baterie se začne zahřívat do vysokých teplot. Tento jev může mít u některých článků za následek vznícení, nebo dokonce i možnou explozi. Provedení této ochrany se dá provést několika způsoby. Nejpoužívanější je tepelné odpojení, kdy se hlídá teplota akumulátoru a po dosažení definované teploty se baterie odpojí. Další možné ochrany při zkratovém proudu jsou provedeny elektronickým odpojením, nebo pojistkou. [46]

6.3.2 Ochrana proti nadměrnému vybití

Tento typ ochrany hlídá vybití baterie a nedovolí akumulátoru, aby klesnulo jeho napětí pod určitou úroveň. Pokud by došlo k nadměrnému vybití, článek by se trvale poškodil. Bez této ochrany by se akumulátor stále vybíjel až na nulové napětí, proto je tento typ ochrany velmi důležitý. U lithiových Li baterií je hodnota minimálního napětí mezi 2 V až 3 V, záleží podle použití a přesnému typu baterie. Pokud používáme baterii, kde je velký odběr, je lepší tuto minimální hodnotu nastavit výše. Naopak u aplikací s nízkým výkonem si můžeme dovolit hodnotu minimálního napětí nastavit na nižší hodnotu, ale není dobré akumulátor nadměrně vybíjet, protože to vede k jeho poškození. [46]

6.3.3 Nadproudová ochrana

Nadproudová ochrana odpojí baterii od zátěže v případě překročení nastaveného proudového limitu. Je to tedy pevně definovaná hodnota proudu, která se nastavuje menší, než je zkratový proud. Pokud bychom se dostali až na hodnotu zkratového proudu, došlo by k přehřívání a zbytečnému zatěžování baterie, proto je vhodnější volit nějakou proudovou rezervu. Při nastavení zkratového proudu bychom měli zvážit použití zvolené aplikace a musíme také brát v úvahu velikost odebíraného proudu. Některé obvody mají možnost nastavení nadproudové ochrany tak, že dovolí tuto definovanou hodnotu na malou chvíli překročit, což se hodí u aplikací, kde je na krátkou dobu velký špičkový proud, např. spouštění elektromotoru. [46]

6.3.4 Tepelná ochrana

Při odběru vyšších výkonů, nebo špatném nabíjení akumulátoru dochází k jeho přehřívání, což může vést k poničení baterie, požáru, nebo dokonce i explozi. Tepelná ochrana má pevně definovanou hodnotu ve stupních, kdy odpojí akumulátor od zátěže, nebo nabíječky. Tepelná hodnota odpojení se nastavuje v závislosti na použitém typu baterie. Většinou je nastavena teplotní ochrana u lithiových Li článků na 65 °C, ale je lepší se vyšším teplotám vyhýbat, protože to může poškodit baterii. [46]

6.3.5 Ochrana proti přebití

Tato ochrana se používá při nabíjení baterie. Přebíjení akumulátoru vede k jeho degradaci, nebo až k jeho úplnému zničení. Je to ochrana, která hlídá úroveň nabití baterie a včas ukončí nabíjení a dojde k odpojení akumulátoru. Tato ochrana se nastavuje v závislosti na typu akumulátoru. Ukončení nabíjení může být realizováno několika způsoby, jako je např. napěťové, proudové. Může být také ukončeno teplotní metodou, nebo časovou, jen tyto metody nejsou příliš přesné. [46]

6.3.6 Přepět'ová ochrana

Jedná se o ochranu, kdy je nastaveno pevně definované maximální napětí, které může do baterie vstoupit. Používá se převážně u nabíjení. Tato ochrana chrání baterii před vysokým napětím, což by ji mohlo poničit. Pokud nabíjíme z pevného zdroje, tak většinou přepětí nehrozí, ale například když nabíjíme autobaterii pomocí alternátoru, tak se zde může přepětí objevit kvůli kolísání otáček alternátoru. Tato ochrana se používá většinou na napěťové špičky. [47]

7. REALIZACE ZAŘÍZENÍ

7.1 Fotovoltaický panel

Výběr fotovoltaického panelu je velmi důležitý. Záleží zde na mnoha faktorech, jako je váha panelu, rozměry, výkon, proud, napětí, cena a jeden z nejdůležitějších parametrů je typ použitého článku v panelu. Jelikož se bude panel naklánět na konstrukci v azimutu i elevaci, jeví se zde jako nejvhodnější článek monokrystalický. Monokrystalické články mají největší účinnost, ale musí na ně svítit Slunce co nejvíce kolmo, zatímco monokrystalické nemusí mít tak přímý svit. Jelikož je panel na trackeru, je důležitá i váha, aby nebyla konstrukce zbytečně zatěžována. Požadavek byl použit panel s maximálním výkonem od 5 W do 10 W. Vybrán byl monokrystalický panel od firmy Eclipsera se jmenovitým výstupním napětím 12 V a maximálním výstupním proudem 0,5 A. Maximální výkon tohoto panelu je tedy 6 W. Jeho rozměry jsou 200 mm na výšku a 170 mm na šířku. Váha použitého FV panelu je pouhých 120 g a je cenově dostupný. Odpovídá tedy všem požadavkům pro tuto aplikaci. Tento monokrystalický fotovoltaický panel můžeme vidět na obrázku 7.1. [48]



Obrázek 7.1 Vybraný FV panel od firmy Eclipsera

7.2 Baterie

Pro tuto aplikaci jsou použity dvě baterie. Jedna nabíjecí a druhá pro napájení trackeru. Dvě baterie jsou používány kvůli oddělení nabíjecího a napájecího obvodu, aby se dalo zvláště měřit, co tracker spotřebuje a dodaný výkon panelem. Vybrána byla baterie od firmy Sony s označením US18650VTC6. Jedná se o typ Lithiové baterie Li-ion. Tento akumulátor má jmenovité napětí 3,6 V a jeho nabíjecí napětí je 4,2 V. Kapacita tohoto

článku je 3130 mAh. Vybrán byl tento typ akumulátoru pro svoji univerzálnost. Baterie typu 18650 se používají v dnešní době ve velkém množství zařízení. Navíc tento akumulátor dokáže vyvinout poměrně velký proud 10 A, což se může hodit v mnoha aplikacích. Tato baterie se nabíjí metodou CCCV. Jedná se o metodu nabíjení konstantním proudem následovanou konstantním napětím. [49]

7.3 Mikrokontroler

Jedná se o jednočipový počítač, který obsahuje procesor, paměť a I/O periferie. Procesor má v tomto zařízení za úkol zpracovávat data, reagovat na instrukce a řídit mikrokontroler. Paměti jsou zde dvě. Programová paměť tzv. ROM je dlouhodobá paměť, na které jsou například instrukce pro procesor a jiná dlouhodobě uložená data. Druhou pamětí je zde datová paměť tzv. RAM, na které jsou uložena krátkodobá data o provádění instrukcí. O tyto data po odpojení zdroje přijdeme. I/O periferie pochází z anglického Input/Output a jedná se o vstupní, nebo výstupní rozhraní. Slouží například k připojení různých senzorů. Mikrokontrolery se dají programovat několika programovacími jazyky, jako je např. C, C++, python a další. Tyto mikrokontrolery se prodávají také v tzv. vývojových deskách, kde se jedná v podstatě o mikrokontroler, který je rozšířený o další periferie, což je vhodné pro tuto aplikaci. Porovnání mikrokontroleru ESP32 a ATmega328P můžeme vidět v tabulce 7.1. [50]

Tabulka 7.1 Porovnání ESP32 a ATmega328P [51]

Mikrokontroler	ESP32	ATmega328P
Paměť Flash	4 MB	32 kB
Statická RAM	520 MB	2 kB
Frekvence hodin	240 MHz	16 MHz
Operační napětí	3,3 V	5 V
Spotřeba proudu	80 mA – 90 mA	45 mA – 80 mA
DC proud na IO pin	40 mA	20 mA
DC proud na 3,3 V pin	50 mA	50 mA
Digitální IO piny	36	14
Analogové vstupní piny	Více než 18	6
UART	3	1
SPI	4	1
I2C	2	1
PWM	16	6
Wi-Fi	Ano	Ne
Bluetooth	Ano	Ne

7.3.1 Arduino UNO a NANO

V úvahu přicházela vývojová deska Arduino. Přesněji Arduino NANO. Obě tyto zařízení využívají stejný 8-bit mikrokontroler ATmega328P. Obsahují 14 digitálních I/O periférií a jeden šesti kanálový analogově digitální převodník. Dále je zde I2C multi-masterová sériová sběrnice, SPI sériové periferní rozhraní, USART, což je synchronní/asynchronní sériové rozhraní, PWM rozhraní, kde se jedná o pulzně šířkovou modulaci a mnohé další. Napájení desky může být pomocí USB, nebo napájecích pinů. Jedná se o jednu z nejrozšířenějších desek. Programuje se pomocí prostředí Arduino IDE s programovacím jazykem WIRING. Může se programovat i v jiných jazycích, např. v jazyce C, nebo C++. Požadavkem pro navrhovaný systém je lokální, nebo vzdálené ukládání dat. To by se zde muselo řešit dalšími moduly, protože ani jedna z těchto desek nemá přímo na sobě možnost např. Micro SD karty, nebo Wi-Fi a Bluetooth. [52]

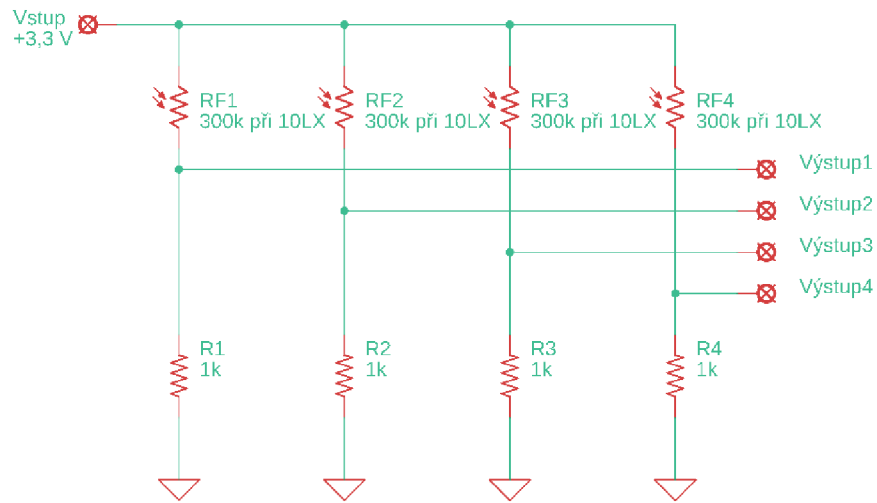
7.3.2 ESP32-PICO-KIT1

Další, a to zvolenou možností je vývojová deska s 32-bit mikrokontrolerem ESP32, který přímo v sobě obsahuje Wi-Fi a Bluetooth. ESP32 umožňuje více možností, než Arduino UNO a NANO, pro tuto aplikaci je však klíčová převážně I2C sběrnice, analogově digitální převodník a integrovaný Bluetooth a Wi-Fi. Další předností ESP32 je nízká spotřeba energie, proto se hodí pro aplikace napájené baterií. Programování zde lze provést více jazyky, nejběžněji se používá jazyk C. Na trhu je více vývojových desek s mikrokontrolerem ESP32. Vybrána byla vývojová deska ESP32-PICO-KIT1, a to z důvodu integrovaného Bluetooth, Wifi, malých rozměrů a kvůli dostatečnému množství vstupů a výstupů. Dalším důvodem výběru této desky je nízká spotřeba energie a možnost jejího zapůjčení. [53]

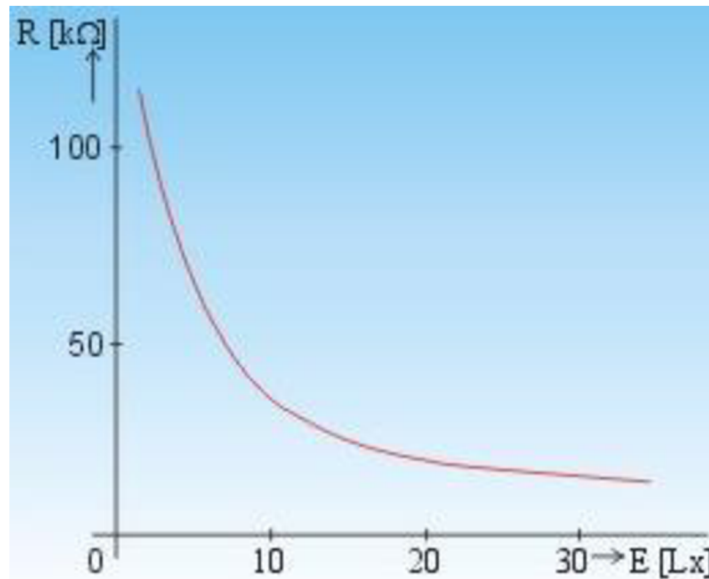
7.4 Snímání polohy Slunce

Snímání polohy u tohoto zařízení je realizováno napět'ovými děliči za pomoci fotorezistoru. Schéma tohoto zapojení je na obr.7.2. Použity jsou fotorezistory od firmy Token s označením PGM1205-MP, které mají při osvětlení 10 LX odpor 140-300 k Ω . Vybrán byl záměrně fotorezistor s co největším odporem, protože většina fotorezistoru je navržena pro měření za menšího osvětlení. Za přímého slunečního svitu je hodnota záření mnohonásobně větší a odpor těchto fotorezistorů klesne na hodnoty okolo 300 Ω až 400 Ω . Odporový dělič je realizován pomocí fotorezistoru a odporu, kde hodnota tohoto odporu je 1k Ω . Dělič je napájen 3,3 V stejnosměrného napětí z mikrokontroleru ESP32 a mikrokontroler porovnává úbytky napětí na jednotlivých fotorezistorech. Pokud budou úbytky napětí stejné, potom je FV panel nakloněn kolmo ke Slunci. Za předpokladu, že se napětí na fotorezistorech liší, potom je potřeba naklonit panel příslušným směrem. Závislost velikosti odporu u fotorezistorů na osvětlení můžeme vidět na obrázku 7.3. Jelikož naprosto stejnou hodnou svitu na fotorezistorech je téměř nemožné dosáhnout a

docházelo by ke kmitání a motory by byly téměř stále aktivní, proto byl přidán do obvodu potenciometr, kterým se nastavuje hodnota tolerance. [54]

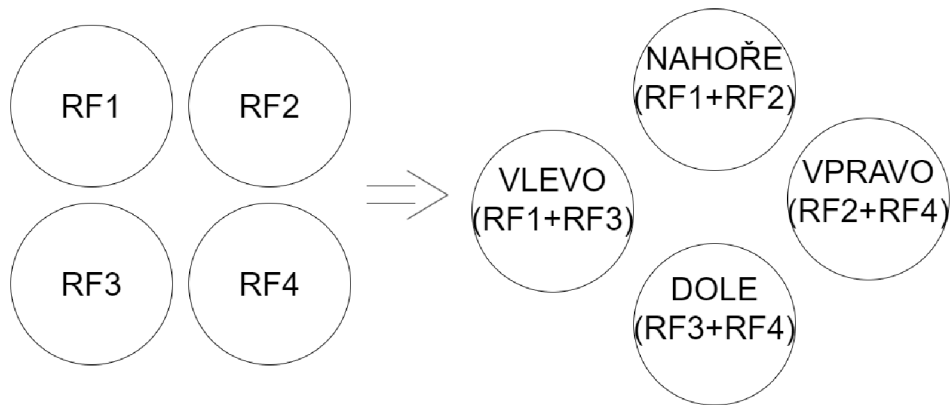


Obrázek 7.2 Zapojení odporového děliče s fotorezistory [55]



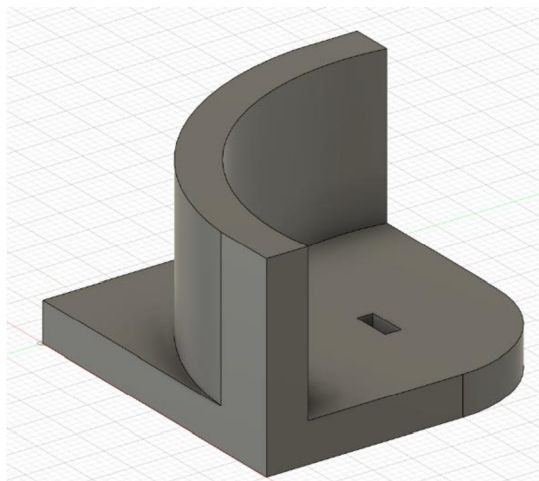
Obrázek 7.3 Závislost velikosti odporu na osvětlení [56]

Jelikož fotorezistory mají poměrně velkou toleranci, tak mikrokontroler průměruje dva sousední fotorezistory, čímž částečně eliminuje nepřesnost. Jak průměrování probíhá je znázorněno na obr.7.4. Průměrování probíhá vždy u dvou sousedních fotorezistorů, takže např. pokud máme nahoře RF1 a RF2, tak se zprůměrují a mikrokontroler je bere jako jeden nahoře. Stejně tak to funguje např. u RF1 a RF3. Tento průměr vidí mikrokontroler jako senzor vlevo. [55]



Obrázek 7.4 Průměrování fotorezistorů [55]

Fotorezistory jsou umístěny v každém rohu FV panelu. Senzor je umístěn v držáku vytisknutém na 3D tiskárně z materiálu PETG kvůli jeho dobré teplotní odolnosti, dobré tisknutelnosti a pevnosti. Součástí držáku je také stínítko, aby na fotorezistor dopadalo světlo jen z jedné části a více tak vynikly rozdíly dopadajícího světla na různé senzory. Držák fototranzistoru lze vidět na obr.7.5.



Obrázek 7.5 Držák fotorezistoru

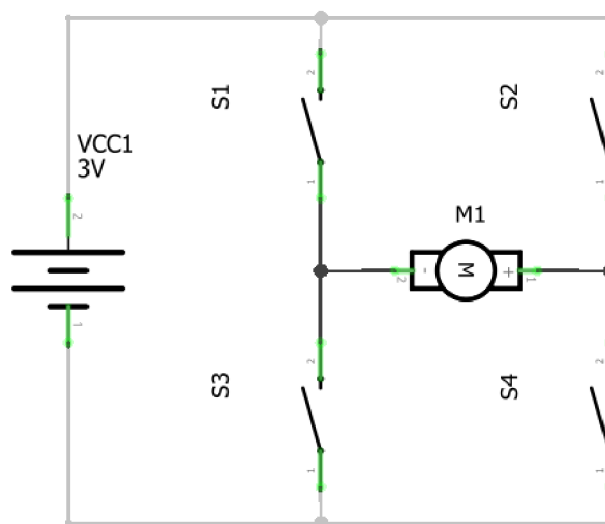
7.5 Elektromotor a jeho řízení

Pohon trackeru je možno realizovat DC motory, krokovými motory, nebo servo motory. Výhodou použití DC motoru je jednoduchost řízení H-můstky a cena. Nevýhodou je, že u DC motoru se nedá přímo určit o kolik otáček, nebo o jaký úhel změní svůj pohyb. Za použití krokových motorů by bylo o něco složitější ovládání a musel by k ní být použit vhodný ovladač. Jsou také dražší, ale ovládají se po krocích, proto se dá dopočítat jejich velikost pohybu. Poslední možností realizace pohonu je servo motor. Klasický servo motor se pohybuje v určitém rozmezí svého pohybu, což znamená, že se neotáčí celý dokola, proto by musel být použity tzv. kontinuální servo motor, který se dokáže otáčet

kolem celé své osy, a nejen v určitém rozsahu. U servo motoru je měřen úhel jejich pohybu většinou potenciometrem a jsou už zpřevodovány.

Jako pohon trackeru pro pohyb v obou osách byl vybrán 6 V DC motor 25GA-370 s převodovkou, který se vyrábí v provedení s různými převody. Jelikož u tohoto systému se bude pohyb měnit během celého dne vždy jen o kousek, tudíž bylo zapotřebí zvolit motor, který má vhodné otáčky. Vybrána byla verze s 26 otáčkami za minutu. V kombinaci s převody na konstrukci, které jsou 12:1 by mělo být dosaženo požadované rychlosti a pohyb by neměl být moc rychlý, čímž bude dosaženo lepší citlivosti a nemělo by dojít k rozkmitání konstrukce.

Jako řízení pro motory byl vybrán modul L298N, což je v podstatě H-můstek. Schéma zapojení H-můstku můžeme vidět na obr. 7.6. Spínače jsou ve schématu jen pro představu, ve skutečnosti jsou zde například tranzistory, nebo relé. H-můstek, když má rozpojeny všechny spínače, tak se motor neotáčí. Pokud jsou S2 a S3 rozepnuty a sepnuty jsou S1 a S4, roztočí se motor na jednu stranu. Pokud jsou sepnuty S2 a S3 a rozepnuty jsou S1 a S4, motor se otáčí na druhou stranu. Obvod L298N může řídit 2 DC motory s napětím 5 V až 35 V se špičkovým proudem 2 A do obou směrů, nebo jeden krokový motor. Tento můstek způsobuje pokles napětí o 2 V, proto pokud používáme 6 V DC motory, musíme do něj přivést napětí 8 V. Jeho další výhodou je, že má regulátor napětí na 5 V, tudíž mikrokontroler ESP32 můžeme napájet přímo z tohoto modulu. Vybrán byl kvůli jednoduchému řízení pomocí mikrokontroleru, regulátoru napětí na 5 V a nízké ceně. [57], [58]



Obrázek 7.6 Schéma zapojení H-můstku [58]

7.6 Další použité komponenty

7.6.1 Senzor napětí a proudu INA3221

Jedná se o tříkanálový senzor napětí a proudu, který komunikuje s mikrokontrolerem po sběrnici I2C. V programu pro tento modul INA3221 byla použita knihovna „SDL_Arduino_INA3221.h. [59]“ Tento modul měří napětí od 0 V do 26 V a proud maximální, který dokáže změřit je do 1,1 A. Omezení tohoto proudu lze popřípadě změnit výměnou odporu bočnicku, čímž můžeme dosáhnout vyšší citlivosti, nebo v opačném případě měření většího rozsahu proudu. V tomto případě byl u dvou modulů změněn bočník z 0,1 Ω na 0,05 Ω , kvůli zvětšení rozsahu. Napájení tohoto modulu je od 2,5 V až 5 V a odběr je okolo 350 μ A. Tento modul je zde použit pro měření výkonu dodaného FV panelem, výkonu do baterie, aby byly zjištěny ztráty na nabíjecím obvodu a výkon, který je potřebný pro provoz trackeru, aby bylo možné zjistit spotřebu energie. Tento modul je v zařízení hlavně kvůli kontrole na jednotlivých částech zařízení. [60]

7.6.2 Hodiny reálného času DS1307

Jedná se o modul, který udává mikrokontroleru informace o reálném čase. Komunikuje po sběrnici I2C a má záložní zdroj, což je dobré např. při vybití baterie, která napájí mikrokontroler a další zařízení. Informace o čase zůstane správná po výměně baterie napájecí systém trackeru a zařízení bez dalšího nastavení může fungovat dále. V programu pro tento modul byla využita knihovna „RTClib.h. [61]“ Modul je energeticky nenáročný a jeho baterie ho dokáže napájet i několik let. Informace o čase navrhované zařízení využívá k probuzení a usnutí mikrokontroleru kvůli úspoře energie. V noci Slunce nesvítí, proto není potřeba, aby byl tracker aktivní. [62]

7.6.3 DC/DC měnič MT3608

Jedná se o nastavitelný step-up měnič, což znamená, že mění stejnosměrné napětí z menší hodnoty na stejnosměrné výstupní napětí o větší hodnotě. Vstupní napětí tohoto modulu je 2 V až 24 V a výstupní napětí lze nastavit v rozsahu od napětí zdroje do 24 V. Maximální výstupní proud tento obvod má 2 A a účinnost 93 %. Tento modul je použit ke zvýšení napětí 3,6 V z Li-ion baterie na 8 V pro obvod L298N. Výhodou tohoto měniče je jeho cena a nastavitelnost výstupu, což znamená, že můžeme použít i jinou baterii, pokud bude potřeba pro napájení trackeru. [63]

7.6.4 DC/DC měnič 774-013

Jedná se měnič napětí z 1 V až 5 V na stabilizované napětí 5 V. Účinnost tohoto modulu je 96 % a při vstupním napětí 3 V má maximální proud 500 mA. Tento modul je v zařízení používán pro napájení mikrokontroleru ESP32, modulů INA3221 a hodin reálného času DS1307. Mikrokontroler může být napájen z modulu L298N, ale pokud budeme používat spínací prvky pro odpojování tohoto modulu, kvůli úspoře energie, je potřeba přidat další napájecí modul. [64]

7.7 MPPT regulátor a nabíjecí obvod

Vybrán byl integrovaný obvod od firmy Linear Technology LT3652HV. Jedná se o nabíjecí obvod pro solární aplikace s integrovaným MPPT regulátorem. Slouží převážně k nabíjení lithiových (Li) baterií metodou CCCV, což je nabíjení konstantním proudem následováno konstantním napětím. Nabíjet může i olověné baterie. Rozsah vstupního napětí je u LT3652HV 4,95 V až 34 V. Výstupní napětí lze zde nastavit až na 18 V. Ukončení nabíjení může u tohoto obvodu být provedeno časovačem, nebo C/10 ukončení, což znamená, že se ukončí nabíjení, až klesne hodnota proudu pod 1/10 naprogramovaného maxima. Po tomto ukončení vstoupí nabíječka do pohotovostního režimu, kdy dodává proud pouze 85 μ A a nabíjení se znovu spustí při poklesu o 2,5 % baterie. MPPT je u LT3652HV vyřešeno metodou Constant Voltage, kde se napětíovým děličem nastaví referenční hodnota napětí, kdy má panel maximální výkon a obvod se snaží držet napětí na tomto bodě tím, že sníží nabíjecí proud, pokud klesne napětí pod referenční hodnotu nastavenou odporovým děličem. [65]

7.7.1 Návrh MPPT regulátoru a nabíjecího obvodu s LT3652HV

Obvod byl navrhován jako vývojová deska, proto jsou vyvedené některé piny obvodu LT3652HV, které nejsou využity, ale později se mohou hodit. Obvodové schéma můžeme vidět na obr.7.7. Zapojení je dle typických aplikací v datovém listu obvodu LT3652HV, jen je upraveno pro tuto aplikaci. Byl přidán potenciometr, který zde plní funkci napětíového děliče a je přiveden na pin V_{IN_REG} , kde plní funkci nastavení referenční hodnoty pro MPPT regulátor. Byl zvolen potenciometr místo pevného napětíového děliče z důvodu úpravy referenčního bodu napětí, kdyby byl použit jiný panel, nebo k přesnějšímu nastavení regulátoru. Maximální proud je nastaven odporem R_4 na 2 A. Další nezbytnou změnou byl přepočítání napětíového děliče na vstup V_{FB} , kterým se nastavuje výstupní napětí pro baterii, kde potřebujeme mít nastaveno nabíjecí napětí na 4,2 V. Výpočet jednotlivých odporů je v následujících rovnicích. [65]

$$\frac{R_{FB2}}{R_{FB1}} = \frac{3,3}{U_{BAT(FLT)} - 3,3} = \frac{3,3}{4,2 - 3,3} = 3,6667, \quad (7.1)$$

R_{FB1} a R_{FB2} jsou zde odpory děliče, kde tímto výpočtem byl zjištěn jejich poměr. $U_{BAT(FLT)}$ je tzv. udržovací napětí. Proud I_{RFB} je $10 \mu A$, kde tuto hodnotu potřebujeme pro následující rovnice. [65]

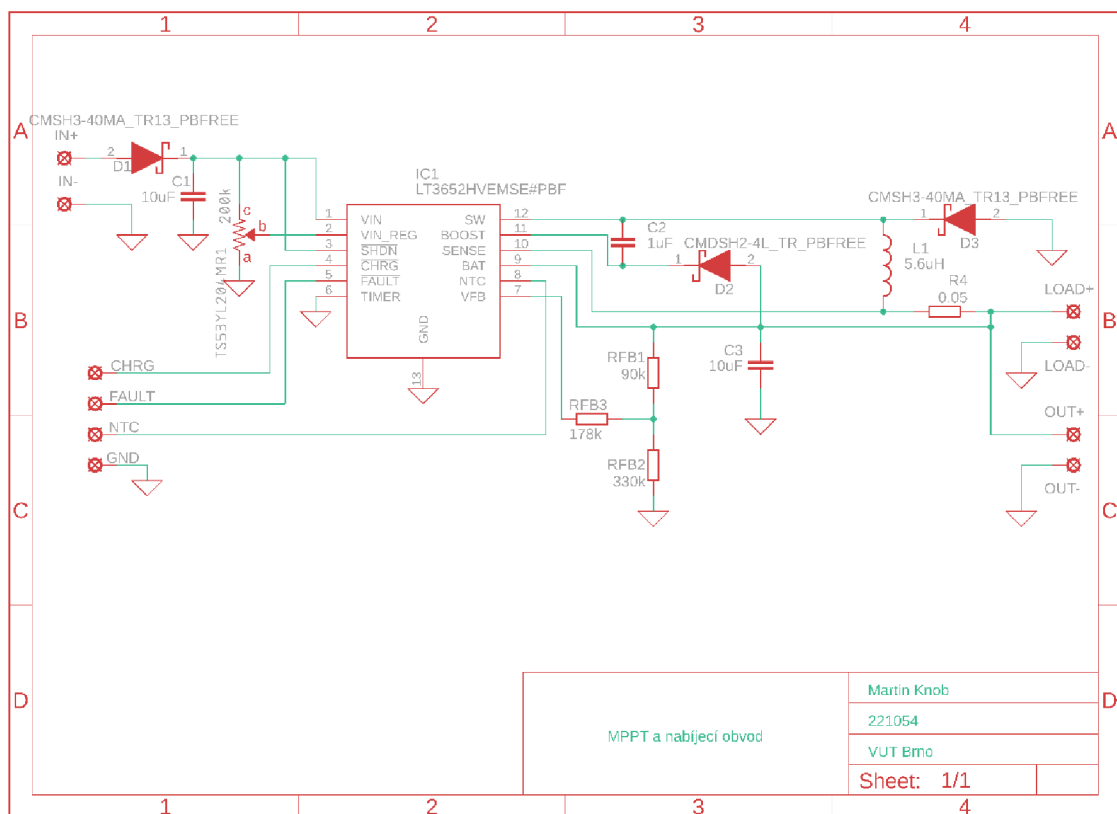
$$R_{FB2} = \frac{3,3}{I_{RFB}} = \frac{3,3}{10 \cdot 10^{-6}} = 330 \text{ k}\Omega, \quad (7.2)$$

$$\frac{R_{FB2}}{R_{FB1}} = 3,6667 \Rightarrow R_{FB1} = \frac{R_{FB2}}{3,6667} = \frac{330k}{3,6667} = 90 \text{ k}\Omega, \quad (7.3)$$

Na pin V_{FB} musí být připojen odpor s $250 \text{ k}\Omega$, proto musíme ještě dopočítat R_{FB3} .

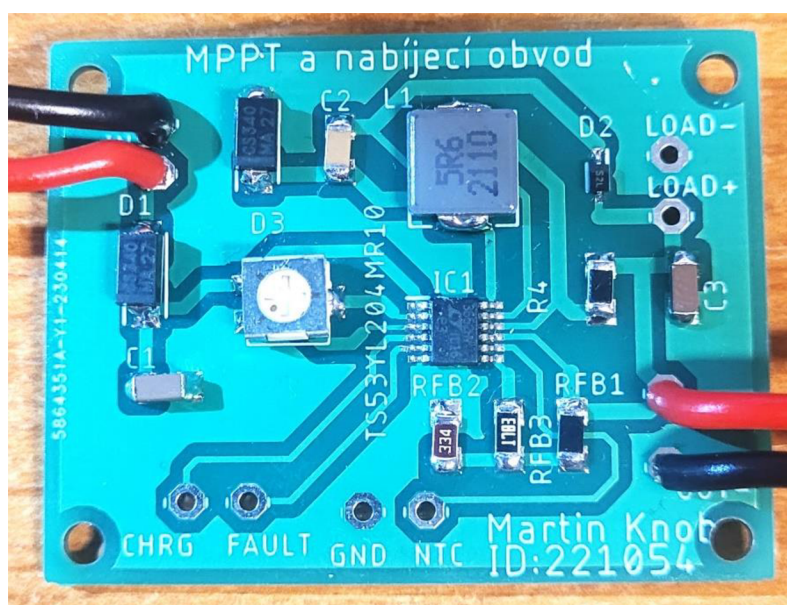
$$R_{FB3} = 250k - \frac{R_{FB1} \cdot R_{FB2}}{R_{FB1} + R_{FB2}} = 250k - \frac{90k \cdot 330k}{90k + 330k} = 179,3 \text{ k}\Omega, \quad (7.4)$$

Hodnota odporu R_{FB3} byla ve schématu použita $178 \text{ k}\Omega$, jelikož je to nejbližší dostupná hodnota rezistoru.



Obrázek 7.7 Obvodové schéma MPPT regulátoru a nabíjecího obvodu s LT3652HV

Návrh desky plošných spojů byl proveden v programu Eagle od firmy Autodesk. Byly navíc vyvedeny piny CHRG, FAULT, NTC a GND, pro případnou modifikaci obvodu. Pin CHRG slouží pro identifikaci nabíjení a FAULT pro identifikaci chyby. Stavů těchto pinů můžeme vidět v tab.7.2. Můžeme k nim připojit LED diody, nebo číst tyto piny mikrokontrolerem. NTC slouží pro sledování teploty baterie, kde by v případě překročení nastaveného limitu teploty baterie došlo k pozastavení nabíjení. GND je pouze vyvedená zem. Navíc byla dodělána možnost připojení zátěže. Celý tento obvod má tedy nastavitelný MPPT regulátor a dá se popřípadě upravit dle potřeby, např. výměnou rezistorů pro nabíjení jiné baterie. Zhotovenou desku plošných spojů MPPT regulátoru a nabíjecího obvodu můžeme vidět na obrázku 7.8. [65]



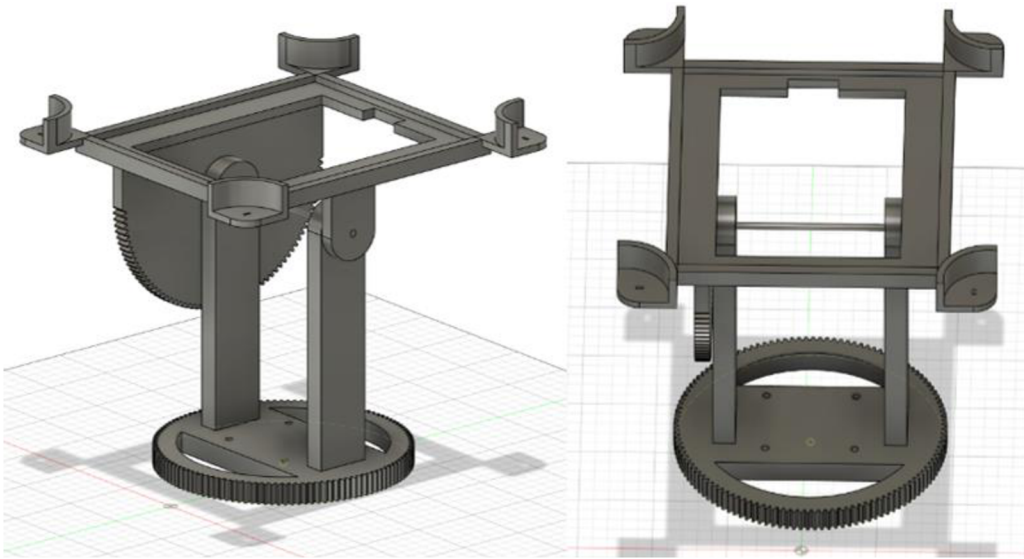
Obrázek 7.8 Deska plošných spojů MPPT regulátoru a nabíjecího obvodu s LT3652HV

Tabulka 7.2 Možnosti stavů pinů CHRG a FAULT [65]

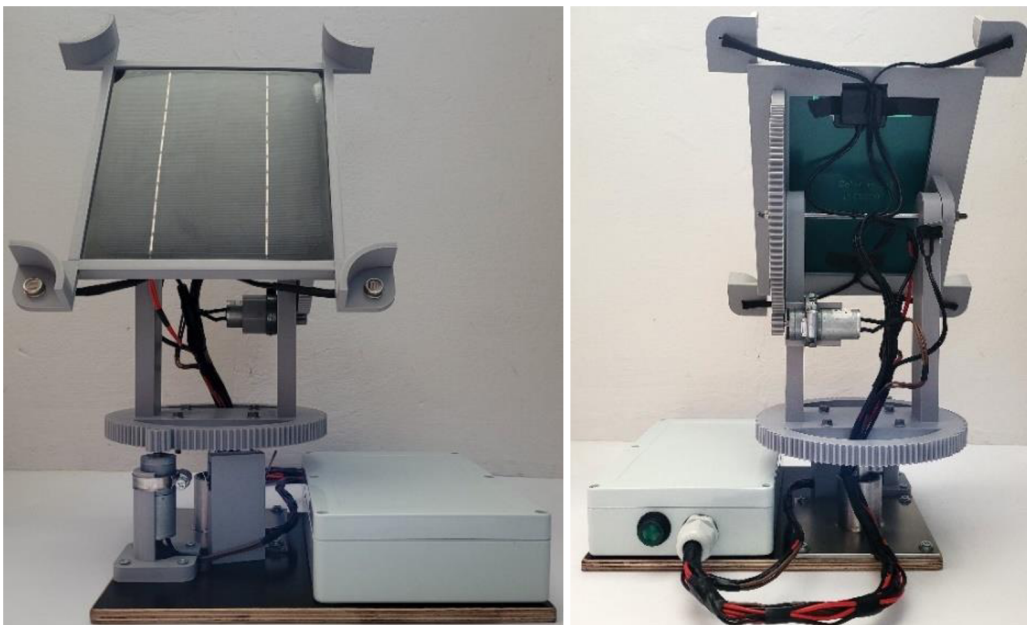
Stav pinu		Popis stavu
CHRG	FAULT	
OFF	OFF	Neprobíhá nabíjení
OFF	ON	Chyba baterie
ON	OFF	Běžné nabíjení
ON	ON	Překročena teplota baterie – pozastaveno nabíjení

7.8 Konstrukce trackeru

Požadavky na konstrukci byly pohyb v azimutu i elevaci. Poměry ozubených kol byly zvoleny 12:1, kde velké ozubené kolo má 120 zubů a malé 10 zubů. Velký poměr převodů byl zvolen z důvodu pomalého pohybu, aby bylo dosaženo požadované citlivosti a nedošlo k rozkmitání. Konstrukce byla navržena v programu Fusion 360 od firmy Autodesk. Použitou konstrukci pro tracker můžeme vidět na obr.7.9. Konstrukce je vyrobena za pomoci 3D tiskárny z materiálu PETG kvůli jeho teplotní odolnosti, dobré tisknutelnosti a pevnosti. Navíc se tento materiál málo kroučí a je za rozumnou cenu. [66]

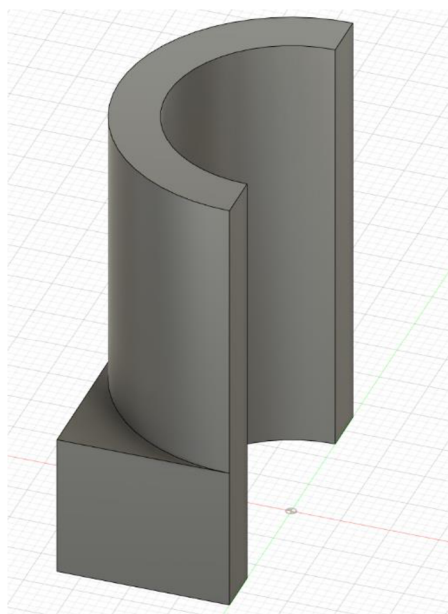


Obrázek 7.9 Návrh konstrukce

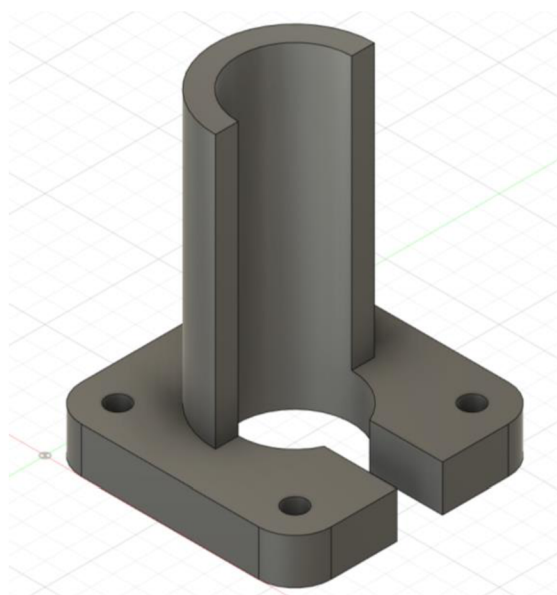


Obrázek 7.10 Vyrobená konstrukce

FV panel je uchycen v horní části trackeru. V rozích jsou držáky, do kterých se umístí fotorezistory. Držák DC motoru pro pohyb v elevaci je na konstrukci přilepen a motor do tohoto držáku je připevněn nerezovou objímkou. Reálnou konstrukci můžeme vidět na obr.7.10. Držák horního motoru je na obr.7.11 a držák spodního motoru na obrázku 7.12. Držák spodního motoru bude přišroubován na nosnou desku a k držáku bude motor přichycen objímkou stejně jako u druhého motoru. Držák motoru pro pohyb v azimutu je na obr. 7.12.

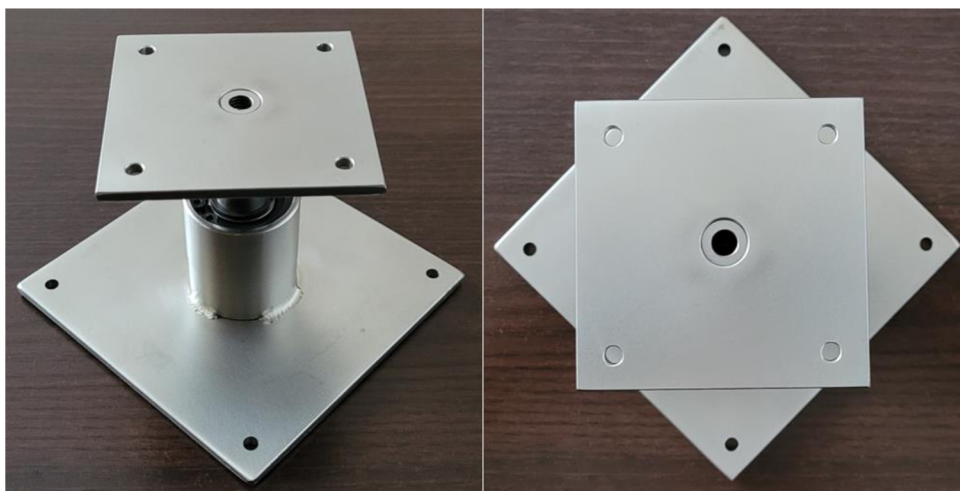


Obrázek 7.11 Držák horního DC motoru (pro pohyb v elevaci)



Obrázek 7.12 Držák spodního DC motoru (pro pohyb v azimutu)

Celá vytištěná konstrukce trackeru je přišroubována na nosnou konstrukci. Nosná konstrukce je vyrobena z nerez a obsahuje dvě ložiska kvůli stabilitě, aby nedocházelo k vyklání konstrukce, což by mohlo způsobit nedoléhání ozubených kol do sebe. Nosnou konstrukci najdeme na obr.7.13. Celá tato konstrukce i s trackerem je přišroubována k nosné desce. Všechny další součástky, jako je mikrokontroler, MPPT, nabíjecí obvod a další moduly jsou také přidělány na nosnou desku, jen jsou schované ve vhodné krabici, kvůli ochraně před vnějšími vlivy.



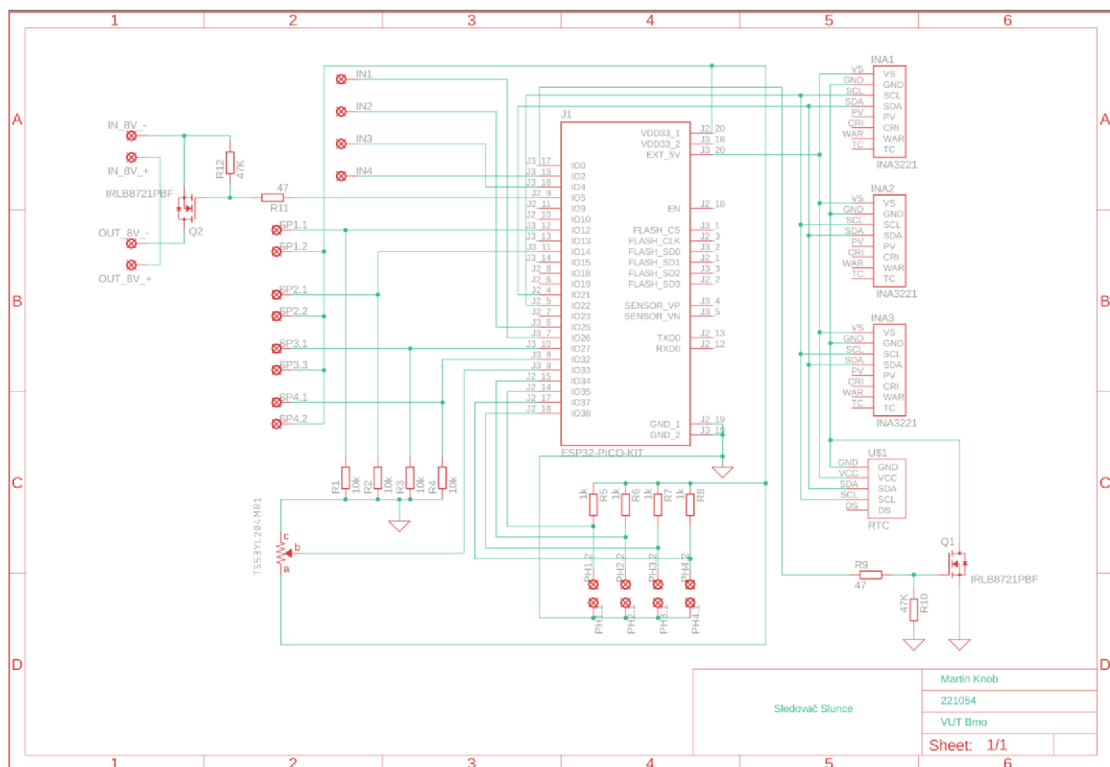
Obrázek 7.13 Nosná konstrukce

7.9 Fotovoltaický nabíječ akumulátoru se sledováním Slunce

Sledovač Slunce snímá polohu Slunce pomocí napěťových děličů s fotorezistory. Porovnávání úbytků napětí na těchto děličích porovnává mikrokontroler ESP32. Na základě těchto hodnot z napěťových děličů dá mikrokontroler pokyn přes modul L298N, což je v podstatě H-můstek, DC motorům pro pohyb daným směrem, aby byl panel stále kolmo ke Slunci a zvýšila se tím efektivita výroby elektrické energie pomocí monokrystalického FV panelu. Další důležitou částí sledovače je modul INA3321, což je modul pro měření napětí a proudu. Měření elektrických veličin zde probíhá na více místech. Tyto moduly jsou ve sledovači tři. Měří elektrické veličiny, jako jsou celková spotřeba systému, výkon nabíječky, napětí na výstupu nabíječky, nabíjecí proud, napětí napájecí baterie, proud odebíraný z baterie, napětí na FV panelu a výkon vyrobený FV panelem.

Sledovač je napájen Li-ion baterií typu 18650. Jmenovité napětí této baterie je 3,6 V, proto je toto napětí přes DC-DC step-up měnič zvýšeno na 8 V, které je přes N-kanálový MOSFET přivedeno na modul L298N pro řízení motorů. Přivedeno zde je 8 V z toho důvodu, že na samotném modulu L298N je úbytek napětí 2 V a používáme dva 6 V DC

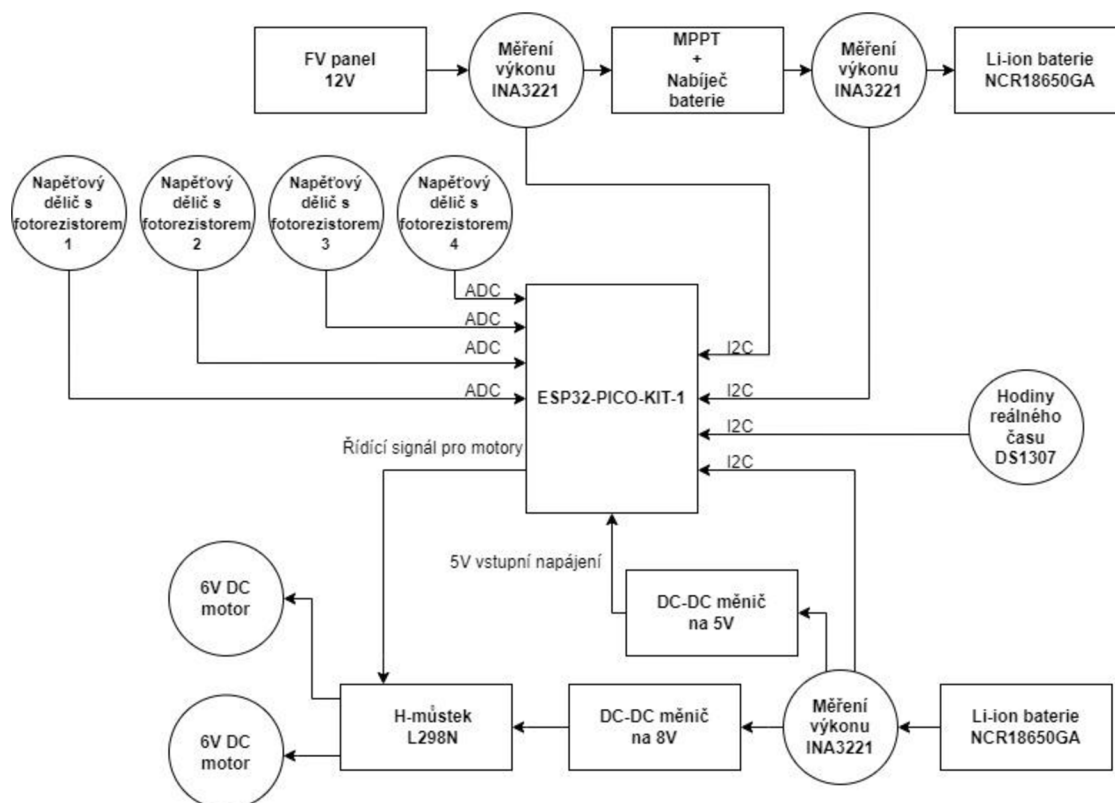
motory. Moduly INA3221 a DS1307 jsou opět připojeny přes N-kanálový MOSFET tranzistor. S těmito moduly komunikuje mikrokontroler po sběrnici I2C. Modul DS1307 jsou hodiny reálného času. Tento modul zde byl přidán kvůli tomu, aby zařízení vědělo, kolik je hodin a na základě tohoto údaje se mikrokontroler přepne do režimu Deep Sleep módu. Zařízení je usnáno od 22 hodin do 5 hodin. Jelikož v noci Slunce nesvítí, tak není potřeba, aby zařízení měřilo polohu slunce, nebo měřilo data, jelikož panel žádnou energii vytvářet nebude a zařízení díky tomu bude šetřit energii, pokud ho necháme přes noc aktivní. Dále byly do zařízení přidány koncové spínače, kvůli ochraně před zničením, pokud by došlo ke zmatení senzorů pro vyhodnocení polohy Slunce, nebo k zastínění zařízení, atd. Do zapojení sledovače byl také přidán potenciometr, kterým se nastavují tolerance pro porovnávání napětěových děličů s fotorezistory, protože napětí na těchto děličích nebude skoro nikdy stejné. Díky potenciometru si můžeme mechanicky tolerance doladit dle potřeby, bez změny programu. Schéma zapojení sledovače můžeme vidět na obr.7.14.



Obrázek 7.14 Schéma zapojení sledovače Slunce

Bohužel u spínání tranzistorů nastal problém v návrhu, který spočívá v tom, že N-kanálovými tranzistory se rozepíná zem. Všechny moduly mají zem propojenou, protože se měly rozepínat naráz jedním tranzistorem. Modulem INA3221 měříme napětí z baterie a v modulu je zem připojeného spotřebiče propojena se zemí pro napájení modulu, tak se země spojí a nejdou rozepínat. Stejný problém nastal i u rozepínání modulu pro řízení motorů L298N. Možné řešení, jak vyřešit tento problém je ve výměně

N-kanálových tranzistorů za P-kanálové MOSFET tranzistory a rozepínat kladnou větev. Jenže při tomto řešení by se musela předělat deska plošných spojů, což je už v tomto časovém intervalu nemožné realizovat, navíc P-kanálové tranzistoru jsou na trhu méně běžné a pro tuto aplikaci potřebujeme specifický tranzistor, který se plně otevře už při napětí 3 V. Z tohoto důvodu není v tomto systému odpojování modulů kvůli úspoře energie realizováno, což ale není z pohledu měření až takový problém, protože spotřeba s odpojováním modulů a bez byla změřena zvlášť a můžeme ji vidět v tabulce 7.2, tudíž se dá výpočty eliminovat.

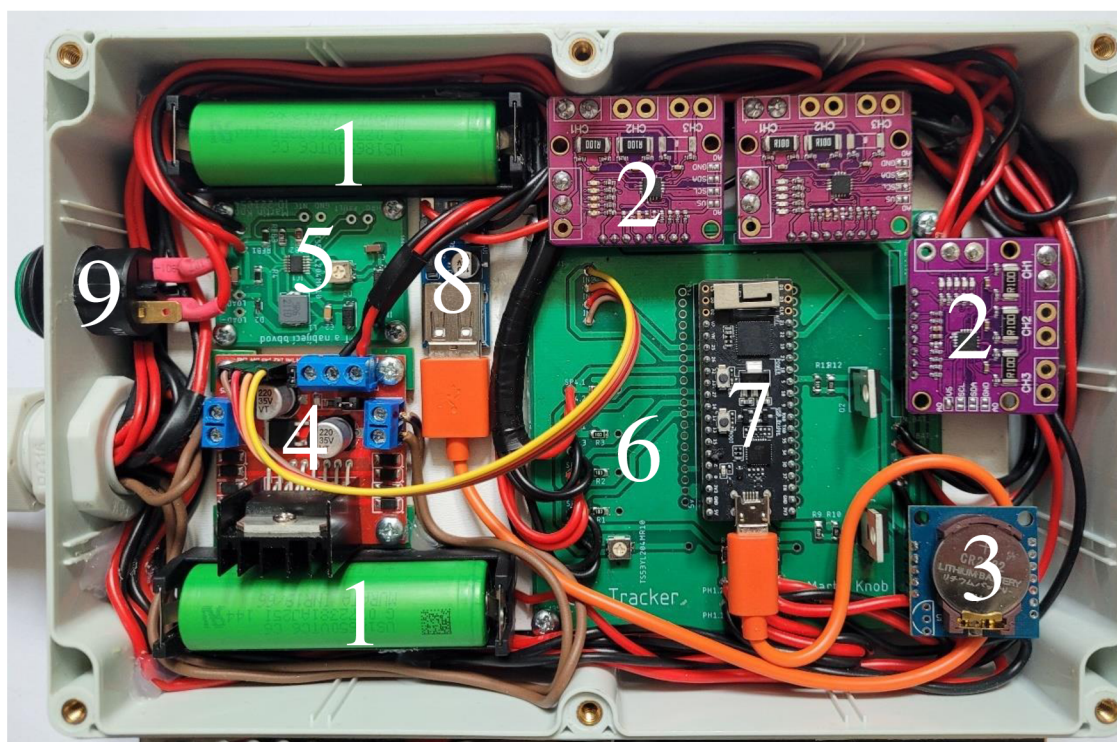


Obrázek 7.15 Blokové schéma FV nabíječe akumulátoru se sledováním slunce

Na obr.7.15 se nachází podrobné schéma celého zařízení. Monokrystalický FV panel je přiveden přes modul INA3221, na kterém se měří výkon FV panelu a napětí FV panelu na MPPT a nabíjecí obvod, který využívá metodu MPPT Constant Voltage a nabíjecí metodu CCCV. Výstup z tohoto MPPT a nabíjecího obvodu je přiveden na nabíjenou baterii Li-ion typu 18650 opět přes modul INA3221, na kterém se měří výkon, napětí a proud nabíječky. Měření výkonu před i za nabíjecím obvodem je z toho důvodu, abychom zjistili ztrátu na tomto nabíjecím obvodu. Moduly INA3221 jsou připojeny po sběrnici I2C k mikrokontroleru ESP32. Tento mikrokontroler je napájen z druhé Li-ion baterie přes DC-DC měnič, který změní napětí baterie na 5 V. Dvě baterie jsou v tomto zařízení převážně kvůli měřeným datům, abychom zjistili, kolik výkonu je z baterie

odebírání a kolik výkonu dokáže panel vyrobit. Pro běžný provoz by bylo lepší mít pouze jednu baterii, která by napájela zařízení a zároveň by byla dobíjena. Baterie by se potom nemusela měnit a zařízení by bylo více soběstačné, ale nabíjení by trvalo déle. Napájecí baterie je přes druhý DC-DC měnič, který změní napětí z baterie na 8 V, přivedeno přes modul INA3221 na obvod pro řízení motorů L298N. Modul INA3221 na této části měří napětí, proud a výkon odebíraný z napájecí baterie. Jak už bylo řečeno, vyhodnocení polohy Slunce je realizováno napěťovými děliči s fotorezistory, kde jsou tyto hodnoty čteny mikrokontrolerem. Poslední částí jsou hodiny reálného času DS1307, na základě jejich hodnot je mikrokontroler přes noc uspán.

Na obr. 7.16 můžeme vidět reálné zapojení celého zařízení. Číslo 1 jsou Li-ion baterie. Moduly INA3221 jsou na čísle 2. Pod číslem 3 se nachází hodiny reálného času DS1307. Modul pro řízení DC motorů L298N se nachází na čísle 4. Číslem 5 je popsán MPPT a nabíjecí obvod využívající integrovaný obvod LT3652HV. Mikrokontroler ESP32 je popsán číslem 7. Na čísle 8 je DC-DC měnič pro napájení mikrokontroleru a posledním číslem 9 je popsán spínač, který odpojí napájecí baterii od obvodu. Cena elektronických součástí u tohoto zařízení vyšla okolo 3500 Kč včetně fotovoltaického panelu, baterií, atd. Mechanické části, jako jsou nerezová konstrukce, konstrukce sledovače, krabice pro elektronické součástky, atd. vyšly cenově okolo 1300 Kč. Jedná se o cenu převážně materiálu, jelikož zařízení bylo sestaveno vlastnoručně.



Obrázek 7.16 Reálné zapojení celého zařízení

7.9.1 Ošetření pro úsporu energie

Při výběru komponentů byl kladen důraz na nízkou spotřebu. Dalším ošetřením, kromě výběru komponentů mělo být odepínání modulů, což se v této práci shledalo s problémem, ale pokud by zařízení mělo být používáno, mohlo by to ušetřit poměrně velkou část energie. Další možností šetření energie, které je v této práci spočívá v uspávání mikrokontroleru. Přesněji přechod do Deep Sleep módu. Tento mód je realizován tak, že se definuje interval, jak dlouho ESP32 má být uspano. Po uplynutí této doby se probudí, vyhodnotí polohu Slunce, nasměruje panel kolmo ke Slunci, pokud je potřeba, změří data, připojí se na Wifi, odešle pomocí Wifi data na server ThingSpeak, a pokud je vše tohle vykonáno, jde zase spát. Čím kratší bude interval spánku, tím budou data méně přesná a naklonění nemusí být kolmé, ale ušetříme více energie. Porovnání spotřeby s uspaním a bez uspaní můžeme vidět v tabulce 7.3. V této tabulce je také změřené, kolik by ušetřilo vypínání modulů. Naklání panelu nemusí být příliš časté, jelikož Slunce mění svoji polohu velmi pomalu. Nastaven je interval 5 minut, což bohatě stačí pro přesnost dat a pohyb panelu. Tento interval se dá jednoduše v programu změnit dle potřeby, pokud chceme přesná data, nebo delší výdrž baterie. Do Deep Sleep módu jde mikrokontroler také v noci od 22 hodin do 5 hodin ráno, protože v tomto intervalu Slunce nesvítí a není potřeba, aby bylo ESP32 aktivní. Dalším ošetřením pro úsporu energie bylo snížení taktu procesoru z 260 MHz na 80 MHz. Takt 80 MHz bohatě stačí na vykonávání všech úkonů trackeru. Větším snížením taktu by už nebylo možné využívat Wifi na mikrokontroleru ESP32.

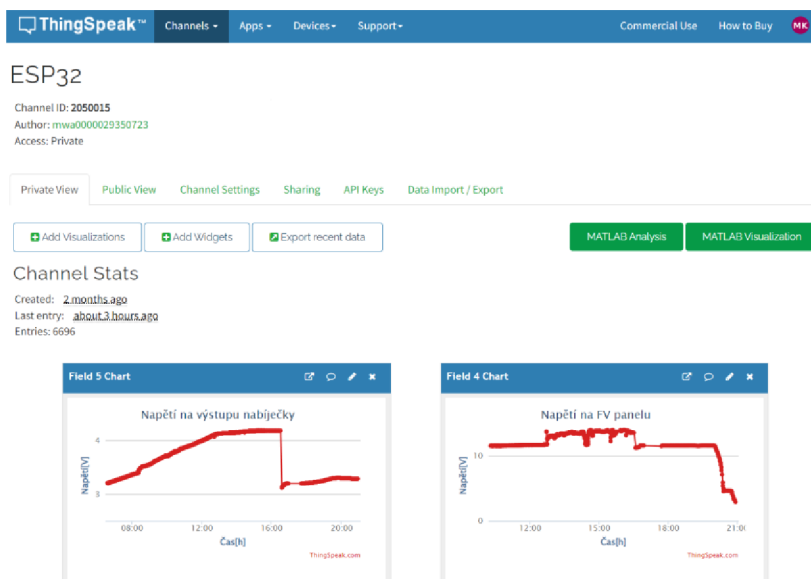
Tabulka 7.3 Porovnání spotřeby s uspaním a bez uspaní

	U [V]	I [mA]	P [W]
Deep Sleep mód se všemi aktivními moduly	4,14	120	0,497
Deep Sleep mód s odpojenými moduly	4,14	40	0,166
Normální režim se všemi aktivními moduly	4,14	150	0,621
Normální režim s odpojenými moduly	4,14	70	0,29

7.9.2 Odesílání a ukládání dat

Zařízení odesílá data bezdrátově pomocí Wifi. Mikrokontroler ESP32 byl vybrán převážně kvůli implementované Wifi, což znamená, že nepotřebuje další Wifi modul. Data jsou odesílána a ukládána na server ThingSpeak [67]. V programu pro komunikaci s ThingSpeak serverem byla použita knihovna „thingspeak.h.“ [68] Stačí jen, když je zařízení připojeno k Wifi a automaticky data odesílá podle nastaveného intervalu. Stačí mít přístup k internetu a data si můžeme zobrazit odkudkoli, například pomocí mobilního

telefonu, nebo notebooku. Vzdáleně tedy vidíme, kolik FV panel aktuálně vyrábí energie, jak je nabitá baterie, podle jejího napětí, nebo kolik energie nabíječi zbývá a veškerá další data. Ukázkou prostředí serveru ThingSpeak můžeme vidět na obr. 7.17.



Obrázek 7.17 Ukázka prostředí ThingSpeak [67]

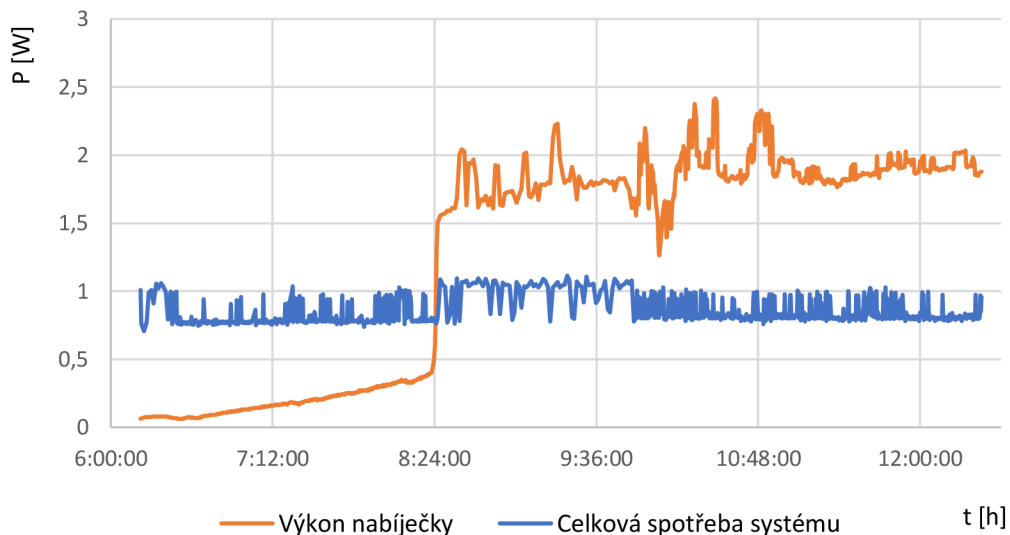
7.9.3 Počáteční hledání polohy Slunce

Jelikož zařízení sleduje Slunce, tak vždy večer skončí otočeno na západ a Slunce vychází na východě. Tento problém je vyřešen tak, že se zařízení ve 22 hodin uspí, až do 5 hodin ráno, kde jako první úkon začne hledat polohu Slunce. Tuto polohu hledá tak, že se začne otáčet doprava, dokud na senzory svitu nedopadne světlo. Jakmile senzory svitu zachytí světlo, tak skončí hledání polohy a zařízení začne běžně fungovat, což znamená, že se nasměruje kolmo ke Slunci, připojí se k Wifi, změří data, odešle data a uspí se na nastavený čas spánku. Může ale nastat situace, že Slunce v 5 hodin ráno ještě nevyšlo. Tento problém je vyřešen tak, že jak se začne zařízení otáčet doprava, otáčí se tak dlouho, dokud nedojde ke koncovému spínači. Od tohoto spínače se začne otáčet zpátky, dokud nebude sepnut druhý spínač. Pokud dojde k situaci, že byly sepnuty oba spínače a nebyl zachycen svit, tak to znamená, že Slunce ještě nevyšlo a při stisku druhého spínače je zařízení uspano na 15 minut, kde po uplynutí této doby opět začne hledat Slunce. Toto hledání polohy Slunce je prováděno vždy po zapnutí sledovače.

8. NAMĚŘENÁ DATA

8.1 Spotřeba energie

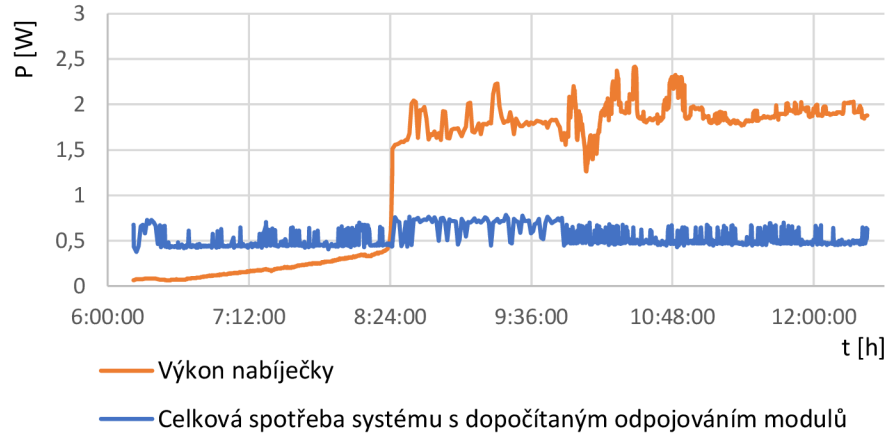
Spotřeba energie trackeru za normálních okolností se všemi aktivními moduly byla změřena 0,621 W. Jedná se o spotřebu, kdy jsou všechny moduly aktivní, jen nejsou DC motory spuštěny. Motory během celého dne běží jen krátkou dobu. V režimu Deep Sleep módu se dostaneme na spotřebu 0,497 W. V tomto režimu je sledovač 5 minut, poté se probudí, vykoná úkony, jako je natočení FV panelu, změření a odeslání dat. Tento úkon trvá do 10 sekund, tudíž většinu času je právě v režimu spánku. Kdyby se povedlo realizovat ještě odpojování modulů INA3221 pro měření elektrických veličin a modulu L298N pro řízení motorů, dostali bychom se na hodnotu v režimu spánku 0,166 W. Moduly by byly vypínány pouze v režimu spánku, protože by jinak mikrokontroler nedokázal po probuzení naměřit data a naklonit FV panel správným směrem.



Obrázek 8.1 Závislost výkonu na čase (porovnání výkonu nabíječky a celkové spotřeby, konstrukce se sledováním 22.5.2023)

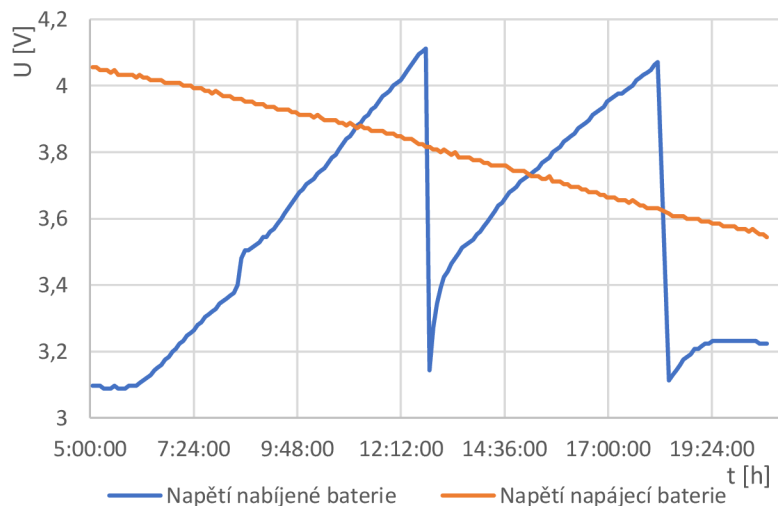
Na obrázku 8.1 můžeme vidět spotřebu trackeru a vyrobenou energii dodávanou do baterie. Toto měření bylo provedeno 22.5.2023. Tato změřená spotřeba trackeru je o něco větší, než skutečná spotřeba. Větší změřená spotřeba je způsobena tím, že ESP32 měří pouze, když není ve spánku, navíc při měření může dojít k pohybu motorů, kvůli natočení panelu, což také poměrně zvedne spotřebu. Navíc vyšší spotřebu způsobí i zapnutá Wifi, která ve spánku není aktivní. Na obrázku 8.2 můžeme vidět porovnání vyrobené energie dodávané do baterie a spotřebu, kde bylo dopočítáno, jaká by byla spotřeba s odpojováním modulů. I kdyby bylo odpojování funkční, stejně bychom to nedokázali změřit, jelikož by byly moduly odpojeny. Ve skutečnosti je i zde skutečná spotřeba o něco

menší, ze stejného důvodu jako v předchozím případě. Vyšší spotřeba je tedy způsobena tím, že měření je možno provést pouze, když je ESP32 aktivní, což je méně času, než je ve spánku, kde má spotřebu menší.



Obrázek 8.2 Závislost výkonu na čase (porovnání výkonu nabíječky a celkové spotřeby s dopočítáním vypínání modulů, konstrukce se sledováním 22.5.2023)

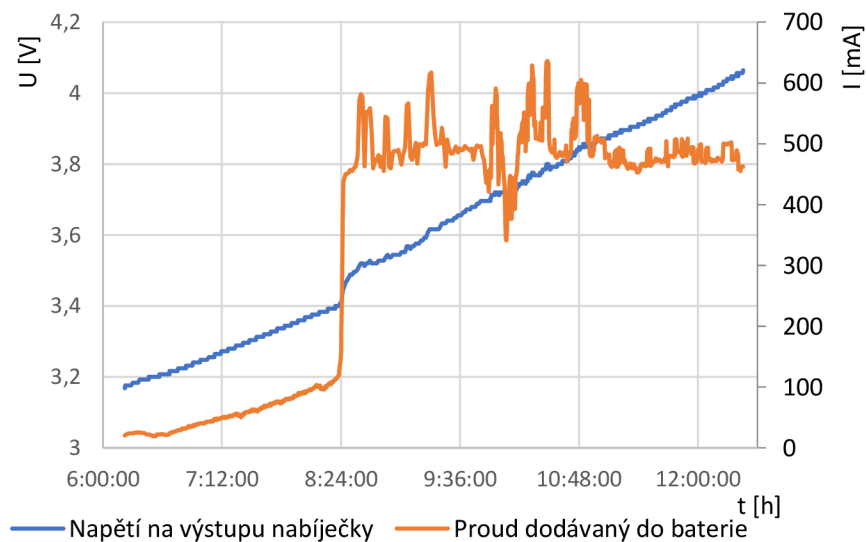
Na obrázku 8.3 můžeme vidět závislost napětí napájecí a nabíjených baterií na čase. Můžeme tedy vidět, že zařízení vyrobilo více energie, než spotřebovalo, i když není aktivní odpojování modulů. Toto zařízení za celý den nabilo dvě baterie do plného nabití a jednu pouze částečně. Při tomto nabíjení přitom sledovač spotřeboval zhruba polovinu kapacity jedné baterie.



Obrázek 8.3 Závislost napětí napájecí a nabíjené baterie na čase (konstrukce se sledováním 27.5.2023)

8.2 Nabití baterie

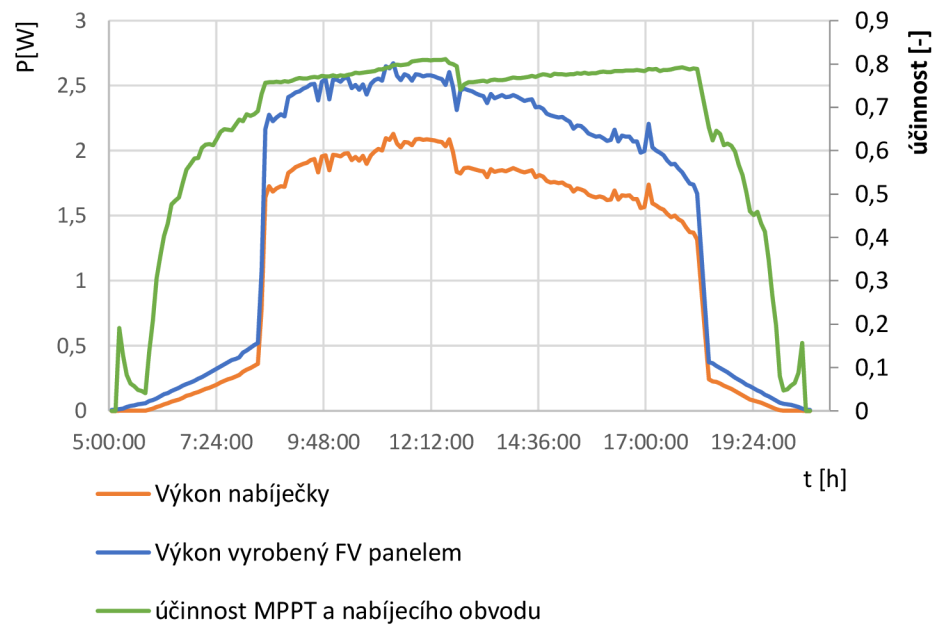
Na obrázku 8.4 můžeme vidět napětí a proud dodávaný do baterie v závislosti na čase. Toto měření probíhalo dne 22.5.2023 s nakláněním konstrukce. Z obrázku 8.4 lze vidět, že nabití baterie trvalo okolo 6 hodin. Od 6 hodin ráno do zhruba půl deváté nebyly ideální podmínky, což znamená, že Slunce nemělo ráno optimální svit a nedodávalo dostatek energie. Po půl deváté ráno začalo Slunce více svítit a hodnota nabíjecího proudu se zvedla na hodnotu okolo 0,5 A, kde si sledovač s nabíječem tuto hodnotu proudu držel až do nabití baterie. Navíc toto měření bylo mírně pod mrakem. Statická konstrukce nabytla baterii znatelně pomaleji. Na statické konstrukci se baterie nenabíla za celý den do maximální hodnoty, ale v den (26.5.2023), kdy bylo provedeno toto měření, byly o něco horší podmínky. Slunce bylo o trochu více stíněno mraky.



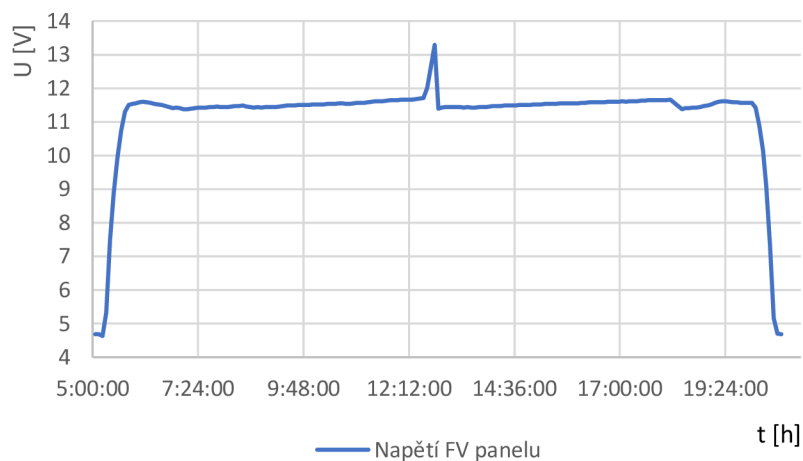
Obrázek 8.4 Napětí a proud dodávaný do baterie v závislosti na čase (konstrukce se sledováním 22.5.2023)

8.3 MPPT regulátor a nabíjecí obvod

Na obrázku 8.5 můžeme vidět průběh výkonu nabíjecího obvodu a vyrobeného výkonu FV panelem v závislosti na čase. Také v tomto obrázku je účinnost MPPT regulátoru a nabíjecího obvodu. Z tohoto grafu můžeme vidět, že účinnost (při svitu) je okolo 0,7-0,8. Na obrázku 8.6 můžeme vidět napětí na výstupu FV panelu v závislosti na čase. Z tohoto obrázku můžeme vidět správnou funkci MPPT regulátoru, který drží konstantní hodnotu napětí na nastavené hodnotě potenciometrem. V tomto obrázku je kolem jedné hodiny odpoledne nárůst napětí na hodnotu přes 13 V. Tento nárůst je způsoben tím, že baterie byla už plně nabita, proto neodebírala dostatek proudu, což mělo za důsledek nárůst napětí. Pokud by zde MPPT regulátor nebyl, hodnota napětí FV panelu by při zátěži klesla na hodnotu okolo 5 V a panel by nevyráběl tolik energie.



Obrázek 8.5 Výkon a účinnost MPPT a nabíjecího obvodu v závislosti na čase (konstrukce se sledováním 27.5.2023)

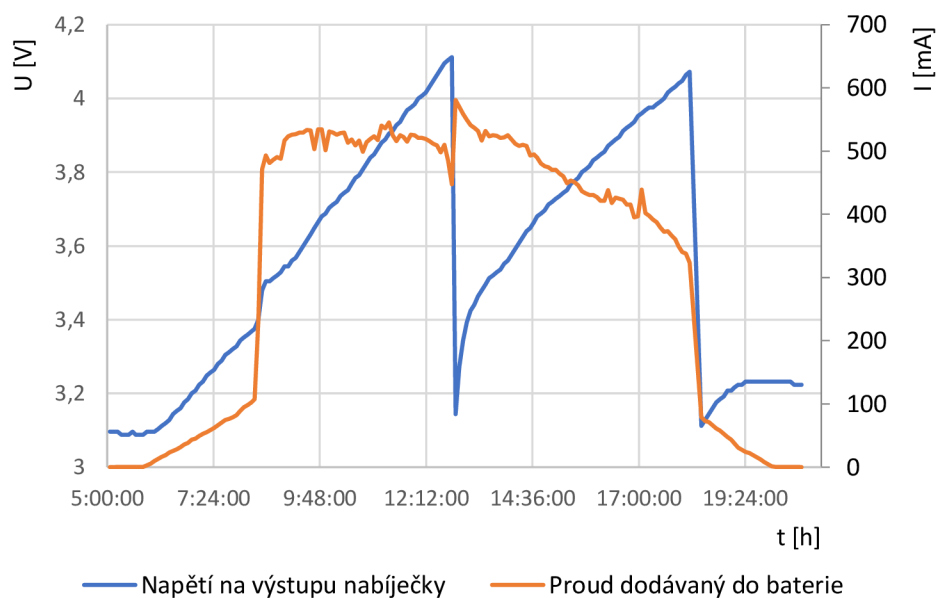


Obrázek 8.6 Napětí na výstupu FV panelu v závislosti na čase (konstrukce se sledováním 27.5.2023)

8.4 Měření se sledováním Slunce

Toto měření probíhalo dne 27.5.2023. Na obrázku 8.7 můžeme vidět napětí a proud dodávaný do baterie v závislosti na čase. Na tomto obrázku můžeme vidět, že tento den byly nabíjeny 3 baterie, z toho dvě se nabily do plného nabití a třetí jen mírně jelikož v tuto hodinu byl už malý sluneční svit. Dále můžeme vidět na nabíjecím proudu ostré hrany na začátku a na konci, které jsou způsobeny stíněním okolními domy, protože v tuto

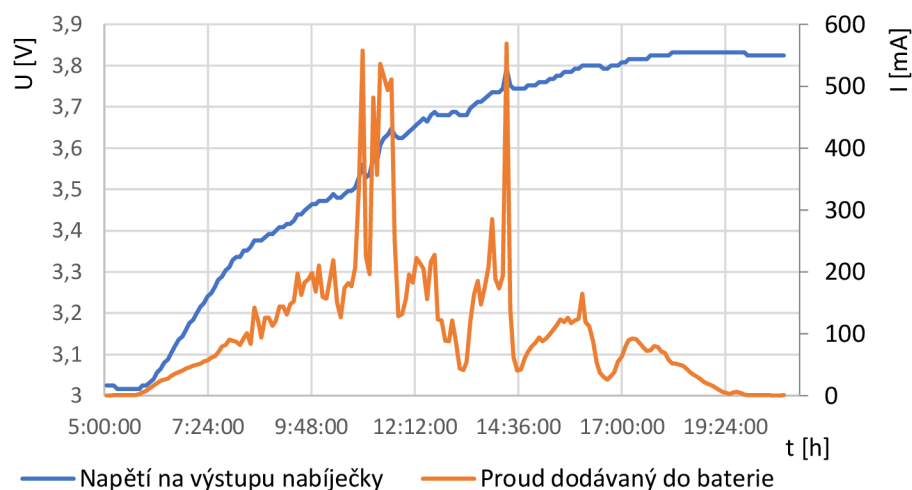
hodinu už není Slunce tak vysoko. Stejně jako u měření 22.6.2023 je i u tohoto měření vidět, že nabití baterie trvá na konstrukci s nakláněním při dobrém slunečním svitu 5 až 7 hodin. Na měření u konstrukce se sledováním Slunce se nejvíce projeví použitý FV panel, kde je zde použit FV panel monokrystalický.



Obrázek 8.7 Napětí a proud dodávaný do baterie v závislosti na čase (konstrukce se sledováním 27.5.2023)

8.5 Měření bez naklánění panelu (statická konstrukce)

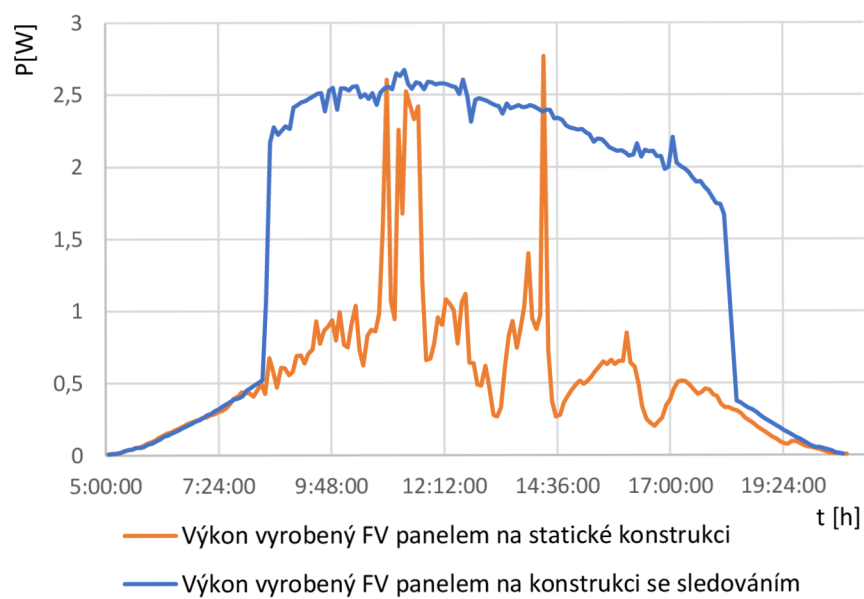
Toto měření probíhalo dne 26.5.2023. Podmínky pro měření nebyly ideální, jelikož bylo mírně pod mrakem. Fotovoltaický panel byl namířen směrem na jih pod úhlem 35° , což je ideální umístění FV panelu na statické konstrukci v České republice. Měření probíhalo celý den od pěti hodin ráno do třičtvrtě na devět večer. Na obrázku 8.8 můžeme vidět napětí a proud dodávaný do baterie v závislosti na čase. Na tomto obrázku je vidět, jak se projevila statická konstrukce oproti konstrukci se sledováním. Můžeme zde zpozorovat, že se baterie za celý den nenabíla na maximální hodnotu. Také z tohoto obrázku jde vidět hlavně na začátku a na konci dne, že panel dodával hodně méně proudu než u konstrukce se sledováním Slunce. Jelikož se jedná o monokrystalický fotovoltaický panel, který má největší teoretickou účinnost, ale pouze za předpokladu přímého slunečního svitu. Nejvíce dodával zhruba uprostřed dne, kdy na panel dopadalo nejvíce přímého záření. V grafu jsou vidět poklesy proudu, které jsou způsobeny zastíněním Slunce mraky.



Obrázek 8.8 Napětí a proud dodávaný do baterie v závislosti na čase (statická konstrukce 26.5.2023)

8.6 Porovnání statické konstrukce a konstrukce se sledováním

Rozdíl mezi statickou konstrukcí a konstrukcí se sledováním bychom nejpřesněji změřili, kdybychom měli dvě stejná zařízení a u jednoho bychom naklápění vypnuli. Jelikož máme zařízení pouze jedno, museli jsme měřit ve dva různé dny. Měření statické konstrukce bylo prováděno dne 26.5.2023. Měření na konstrukci se sledovačem bylo uskutečněno 27.5.2023. Je nutno dodat, že při měření na statické konstrukci bylo o něco horší počasí, což znamená, že bylo občas mírně zataženo. Na obrázku 8.9 můžeme vidět rozdíl ve vyrobeném výkonu FV panelem v závislosti na čase, jak konstrukce se sledováním, tak statické konstrukce. Hlavní rozdíl mezi těmito konstrukcemi je v tom, že konstrukce se sledováním vyrábí energii v poměrně velkém množství během celého dne, a statická konstrukce nejvíce vyrábí uprostřed dne, kdy sluneční záření nejvíce dopadá na FV panel. Takhle velký rozdíl ve vyrobeném výkonu je také způsoben použitým typem FV panelu. Byl použit monokrystalický fotovoltaický panel, který má největší teoretickou účinnost, ale pouze za předpokladu přímého slunečního svitu. Velký rozdíl mezi těmito konstrukcemi můžeme také vidět na počtu nabitých baterií během celého dne. Na konstrukci se sledováním Slunce jsme dokázali nabít dvě baterie do plného nabití a třetí baterii jen částečně. Zatímco na statické konstrukci jsme nabili jen jednu baterii, a to byla nabita pouze na hodnotu napětí lehce přes 3,8 V.



Obrázek 8.9 Výkon vyrobený FV panelem na statické konstrukci a na konstrukci se sledováním v závislosti na čase

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo navrhnout a sestrojít systém, který by nabíjel akumulátor pomocí FV panelu. Tento systém aktivně sleduje Slunce a na základě jeho polohy natačí panel v azimutu i elevaci, aby bylo dosaženo co největší efektivity přeměny energie ze Slunce.

Nejdříve bylo potřeba prostudovat a popsat různé typy fotovoltaických článků a panelů, aby bylo možné vybrat vhodný typ panelu pro tuto aplikaci. Dále bylo potřeba popsat různé metody MPPT regulace, kde se jedná o regulaci, která hledá bod maximálního výkonu FV panelu a hlídá tak jeho optimální výkon. Následující nezbytnou částí byl popis akumulátoru a jeho ochranných a nabíjecích obvodů a metod, abychom mohli zvolit správný typ akumulátorů a vhodných obvodů pro tento systém.

Nabízela se možnost použití monokrystalického, nebo polykrystalického panelu, kde byl nakonec zvolen panel monokrystalický z důvodu vyšší účinnosti, jelikož bude panel stále kolmo ke Slunci a více se na něm projeví rozdíl mezi statickou konstrukcí a konstrukcí s aktivním sledováním. Dále byla vybrána Lithiová baterie typu Li-ion 18650, což je jeden z nejpoužívanějších článků a byl vybrán pro jeho univerzálnost, kapacitu a další jeho vlastnosti, jako je například absence paměťového efektu, což znamená, že ji můžeme nabíjet kdykoli a nezáleží na jejich předchozí úrovni nabití, nebo vybití. Tyto baterie jsou v zařízení použity dvě, jedna jako zdroj pro mikrokontroler a další použité komponenty, kvůli energetické soběstačnosti, aby nemusel být připojen externí zdroj energie a druhá baterie je nabíjena z FV panelu. Rozdělené jsou baterie hlavně kvůli měření dat, abychom zjistili, kolik zařízení spotřebuje energie a kolik dokáže dodat do baterie. Pro tyto baterie byl navržen nabíjecí obvod, který používá metodu nabíjení CCCV, což znamená že nabíjí nejprve konstantním proudem a následně konstantním napětím. Pro tento nabíjecí obvod byl zvolen integrovaný obvod LT3652HV, který také umí MPPT regulaci metodou Constant Voltage. O řízení se stará mikrokontroler ESP32, který pomocí napěťových děličů s fotorezistory vyhodnocuje polohu Slunce, ovládá DC motory pro pohyb panelu, měří a odesílá data pomocí modulů INA3221. Data odesílá bezdrátově pomocí Wifi na server ThingSpeak. Část této bakalářské práce byla úspěšně prezentována v rámci soutěže Student EEICT 2023.

Rozdíl mezi statickou konstrukcí a konstrukcí se sledováním Slunce je poměrně znatelný. V den, kdy bylo prováděno měření na statické konstrukci, bylo o trochu více pod mrakem, ale protože máme FV panel pouze jeden, nebylo možné provést měření jinak, než ve více dnech. Jelikož byly baterie v tomto zařízení odděleny, mohli jsme měřit zvlášť spotřebu a vyrobený výkon FV panelem, ale pro běžné využití je lepší, když by zároveň byla baterie nabíjena a systém by s ní byl napájen, popřípadě baterie spojit paralelně. Díky této úpravě bychom dosáhli soběstačnosti celého zařízení. Další nezbytnou úpravou tohoto zařízení je předělat spínání modulů, čímž dosáhneme poměrně menší spotřeby.

LITERATURA

- [1] MATUŠKA, Tomáš. Solární zařízení v příkladech. Praha: Grada, 2013. Stavitel. ISBN 978-80-247-3525-2.
- [2] Zelené zprávy.cz: Solární energie a její využití [online]. 2011 [cit. 2022-12-01]. Dostupné z: <http://www.zelenezpravy.cz/solarni-energie-a-jeji-vyuziti/>
- [3] Energetika: Sluneční energie [online]. [cit. 2022-12-01]. Dostupné z: <https://energetika.plzen.eu/alternativni-zdroje-energie/slunecni-energie/>
- [4] *Obnovitelné energie: Fotovoltaické elektrárny - podmínky v ČR* [online]. [cit. 2022-12-01]. Dostupné z: <http://www.obnovitelne-energie.cz/fotovoltaicke-elektrarny-podminky-cr.php>
- [5] SolidSun: Intenzita slunečního záření v České republice: vyplatí se vlastní solární elektrárna? [online]. [cit. 2022-12-01]. Dostupné z: <https://www.solidsun.cz/prispevky/intenzita-slunecniho-zareni-v-ceske-republice-vyplati-se-vlastni-solarni-elektrarna-248.php>
- [6] European Commission: PVGIS Photovoltaic Geographical Information System [online]. [cit. 2022-12-01]. Dostupné z: http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/countries/europe/g13y_cz.png
- [7] Encyklopedie fyziky: Fyzikální podstata [online]. [cit. 2022-12-02]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/723-fyzikalni-podstata>
- [8] HUDCOVÁ, Lucie. OPTICKÉ KOMUNIKACE: Optické přijímače [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-12-02]. Přednáška BPC-OKO. Vysoké učení technické v Brně.
- [9] Fyzika 007: Vnější fotoelektrický jev [online]. [cit. 2022-12-02]. Dostupné z: <https://sites.google.com/site/fyzika007/fyzika-mikrosveta/vnejsi-fotoelektricky-jev>
- [10] Bronislav Bechník. Tzb info: Stručná historie fotovoltaiky [online]. 2014 [cit. 2022-12-02]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/11652-strucna-historie-fotovoltaiky>
- [11] PV education: First photovoltaic Devices [online]. [cit. 2022-12-02]. Dostupné z: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/manufacturing-si-cells/first-photovoltaic-devices>
- [12] Fotovoltaika: Solární (fotovoltaické) články [online]. [cit. 2022-12-03]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k32.htm>
- [13] MORAVEC, Jan. OENERGETICE.CZ: Polovodiče: Fotovoltaický jev a parametry fotovoltaického článku [online]. 2017 [cit. 2022-12-03]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/polovodice-fotovoltaicky-jev-parametry-fotovoltaickeho-clanku>
- [14] CHMEL, Ladislav a Ivo HAMERNÍK. FOTOVOLTAIKA, FOTOTERMIKA: Konstrukce a výroba fotovoltaických článků a panelů [online]. 2016 [cit. 2022-12-03]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/91/03.html>

- [15] FEJFAR, Antonín. Tzb info: Fotovoltaika druhé a třetí generace [online]. 2006 [cit. 2022-12-03]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/3506-fotovoltaika-druhe-a-treti-generace>
- [16] MATUŠKA, Tomáš. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Fotovoltaika - základy: P6 FV technologie [online]. Praha, 2020. Dostupné také z: http://users.fs.cvut.cz/tomas.matuska/wordpress/wp-content/uploads/2020/04/AZE2-P6_FV_technologie.pdf
- [17] Bohemia civil engineering: 3 typy fotovoltaických panelů – jaké jsou jejich výhody? [online]. 2019 [cit. 2022-12-03]. Dostupné z: <https://www.bce.cz/3-typy-fotovoltaickych-panelu/>
- [18] Fotovoltaické systémy: Fotovoltaické systémy pro výrobu elektřiny [online]. [cit. 2022-12-03]. Dostupné z: <https://www.cne.cz/fotovoltaicke-systemy/uvod-do-fv-systemu>
- [19] VANĚK, Jiří, Petr KŘIVÍK a Vítězslav NOVÁK. FEKT VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ. Alternativní zdroje energie. Brno, 2006.
- [20] SPŠ, SOŠ A SOU, HRADEC KRÁLOVÉ. Obnovitelné zdroje elektrické energie: Fotovoltaika [online]. Dostupné také z: <https://vyuka.hradebni.cz/file.php/305/Fotovoltaika.pdf>
- [21] Solar feeds: Types of Solar Trackers and their Advantages & Disadvantages [online]. 2021 [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: <https://www.solarfeeds.com/mag/solar-trackers-types-and-its-advantages-and-disadvantages/>
- [22] LUDT, Billy. Solar Power World: What is a solar tracker and how does it work? [online]. 2020 [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: <https://www.solarpowerworldonline.com/2020/01/what-is-a-solar-tracker-and-how-does-it-work/>
- [23] Electrical Academia: Single-Axis and Dual-Axis Solar Tracker [online]. [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: <https://electricalacademia.com/renewable-energy/single-axis-dual-axis-solar-trackers/>
- [24] Sino voltages: Dual Axis Trackers [online]. [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: <https://sinovoltaics.com/learning-center/csp/dual-axis-trackers/>
- [25] Northern Arizona Wind & Sun: What is Maximum Power Point Tracking (MPPT) [online]. [cit. 2022-12-09]. Dostupné z: <https://www.solar-electric.com/learning-center/mppt-solar-charge-controllers.html/>
- [26] KHAN, Ubaid U., Musa RAHEEM, Suleman ATA a Zeashan H. KHAN. ResearchGate: Design and Implementation of a low-cost MPPT Controller for Solar PV System [online]. Pakistan, 2016 [cit. 2022-12-09]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/312972240_Design_and_Implementation_of_a_low-cost_MPPT_Controller_for_Solar_PV_System

- [27] FARANDA, Roberto, Sonia LEVA a V. MAUGERI. IEEE Xplore [online]. Pittsburgh: IEEE, 2008 [cit. 2022-12-09]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4596156/authors>
- [28] MEHTA, Vishal. Hindawi International Journal of Photoenergy: Comparison of Different MPPT Algorithms with a Proposed One Using a Power Estimator for Grid Connected PV Systems [online]. 2016 [cit. 2022-12-10]. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/journals/ijp/2016/1728398/>
- [29] HOHM, D. P. a M. E. ROPP. Comparative study of maximum power point tracking algorithms. Progress in Photovoltaics: Research and Applications [online]. 2003, 11(1), 47-62 [cit. 2022-12-11]. ISSN 1062-7995. Dostupné z: doi:10.1002/pip.459
- [30] ESRAM, Trishan a Patrick L. CHAPMAN. Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques [online]. 439-449 [cit. 2022-12-11]. Dostupné z: doi:10.1109/TEC.2006.874230
- [31] Proelektrotechniky.cz: Vite, jak funguje baterie? [online]. [cit. 2022-12-13]. Dostupné z: <https://www.proelektrotechniky.cz/vzdelavani/17.php>
- [32] Battery university: BU-206: Lithium-polymer: Substance or Hype? [online]. [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-206-lithium-polymer-substance-or-hype>
- [33] Battery university: BU-205: Types of Lithium-ion [online]. [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>
- [34] BISWAS, Md Multan, Md Shafiul AZIM, Tonmoy Kumar SAHA, Umama ZOBAYER a Monalisa Chowdhury URMI. Towards Implementation of Smart Grid: An Updated Review on Electrical Energy Storage Systems. Smart Grid and Renewable Energy [online]. 2013, 04(01), 122-132 [cit. 2022-12-14]. ISSN 2151-481X. Dostupné z: doi:10.4236/sgre.2013.41015
- [35] Circuit Globe: Lead-Acid Battery Charging Methods [online]. [cit. 2022-12-15]. Dostupné z: <https://circuitglobe.com/lead-acid-battery-charging-methods.html>
- [36] SAMOSIR, Ahmad. Development of a Current Control Ultracapacitor Charger Based on Digital Signal Processing. TELKOMNIKA. 2009/12/01, 7. Dostupné z: doi:10.12928/telkomnika.v7i3.587
- [37] Advanced Energy Storage and Applications: Charge [online]. Peking [cit. 2022-12-15]. Dostupné z: <http://en.aesa.net.cn/About.aspx?ClassID=125>
- [38] Battex: Ukončení časové [online]. [cit. 2022-12-15]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/nabijeni-hermetickych-akumulatoru/nabijeni-hermetickych-nicd-akumulatoru/ukonceni-casove>
- [39] Battex: Ukončení proudové [online]. [cit. 2022-12-15]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/nabijeni-hermetickych-akumulatoru/nabijeni-hermetickych-nicd-akumulatoru/ukonceni-proudove>
- [40] Battex: Metoda „VCO“ [online]. [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/nabijeni-hermetickych->

- akumulátoru/nabíjení-hermetických-nicd-akumulátoru/ukončení-napětové/metoda-vco
- [41] Battex: Metoda „PKV“ [online]. [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/nabijeni-hermetickych-akumulatoru/nabijeni-hermetickych-nicd-akumulatoru/ukonceni-napetove/metoda-pkv>
- [42] Battex: Metoda „ $-\Delta V$ “ [online]. [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/nabijeni-hermetickych-akumulatoru/nabijeni-hermetickych-nicd-akumulatoru/ukonceni-napetove/metoda-delta-v>
- [43] Battex: Metoda „ d^2V/dt^2 “ [online]. [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/nabijeni-hermetickych-akumulatoru/nabijeni-hermetickych-nicd-akumulatoru/ukonceni-napetove/metoda-d-v-dt>
- [44] Battex: Metoda „TCO“ [online]. [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/nabijeni-hermetickych-akumulatoru/nabijeni-hermetickych-nicd-akumulatoru/ukonceni-teplotni/metoda-tco>
- [45] Battex: Metoda „ $\Delta T/\Delta t$ “ [online]. [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/nabijeni-hermetickych-akumulatoru/nabijeni-hermetickych-nicd-akumulatoru/ukonceni-teplotni/metoda-dT/dt>
- [46] Tritek: What is a BMS protection board of lithium battery? [online]. [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <https://tritekbattery.com/bms-protection-settings-of-the-lithium-battery/>
- [47] Sunpower electronics: Over Voltage Protection [online]. [cit. 2022-12-17]. Dostupné z: <https://www.sunpower-uk.com/glossary/what-is-over-voltage-protection/>
- [48] In: ECLIPSERA. : Solární panel 12V 6W až 500mA s DC konektorem [online]. 2022 [cit. 2022-12-18]. Dostupné z: <https://dratek.cz/docs/produkty/1/1691/1643025601.pdf>
- [49] SONY. Lithium Ion Rechargeable Battery Technical Information: Lithium Ion Rechargeable Battery Technical Information [online]. 2015. [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: https://www.kronium.cz/uploads/SONY_US18650VTC6.pdf
- [50] LUTKEVICH, Ben. TechTarget: microcontroller (MCU) [online]. last updated 2019 [cit. 2022-12-18]. Dostupné z: <https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/microcontroller>
- [51] Maker guides: ESP32 vs Arduino Speed Comparison [online]. [cit. 2022-12-22]. Dostupné z: <https://www.makerguides.com/esp32-vs-arduino-speed-comparison/>
- [52] Láska kit: Arduino Nano R3, ATmega328P Klon, Připájené piny [online]. [cit. 2022-12-19]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/arduino-nano-r3-atmega328p-klon--pripajene-piny/>

- [53] In: ESPRESSIF SYSTEMS. : ESP32PICOV3 [online]. [cit. 2022-12-19].
Dostupné z: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-pico-v3_datasheet_en.pdf
- [54] In: TOKEN ELECTRONICS INDUSTRY. Token: Light-Dependent Photoresistors for Sensor Applications. [online]. [cit. 2022-12-19]. Dostupné z: <http://token.com.tw/pdf/resistor/cds-resistor-pgm.pdf>
- [55] Proceedings II of the 29th Student EEICT 2023 (Selected Papers). Brno, 2023. ISBN 978-80-214-6154-3.
- [56] ELUC: Fotoodpor (fotorezistor) [online]. Olomouc: Vyšší odborná škola a Střední průmyslová škola elektrotechnická, 2009 [cit. 2022-12-22]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/610>
- [57] Fyzikální kabinet: Řízení DC motorů modulem ESP32 [online]. [cit. 2022-12-19]. Dostupné z: http://kabinet.fyzika.net/ESP32/ESP32-dc_motor/ESP32-rizeni-DC-motoru.php
- [58] SVOBODA, Aleš. Dratek: Změna směru otáčení DC motoru [online]. [cit. 2022-12-22]. Dostupné z: <https://navody.dratek.cz/technikuv-blog/zmena-smeru-otaceni-dc-motoru.html>
- [59] Github: SDL_arduino_INA3221. Github [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: https://github.com/switchdoclabs/SDL_Arduino_INA3221
- [60] Drátek: Senzor napětí a proudu INA3221 [online]. [cit. 2022-12-19]. Dostupné z: <https://navody.dratek.cz/navody-k-produktum/senzor-napeti-a-proudu-ina3221.html>
- [61] Github: RTCLib. ADAFRUIT. Github [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://github.com/adafruit/RTCLib>
- [62] Dratek: Hodiny reálného času DS1307 [online]. [cit. 2022-12-20]. Dostupné z: <https://navody.dratek.cz/navody-k-produktum/hodiny-realneho-casu-ds1307.html>
- [63] Hadex: Napájecí modul, step-up měnič 2A s MT3608 [online]. [cit. 2022-12-20]. Dostupné z: <https://www.hadex.cz/m407-napajeci-modul-step-up-menic-2a-s-mt3608/>
- [64] GME electronic: Napájecí modul 1 - 5V na USB A [online]. [cit. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/v/1508323/napajeci-modul-1-5v-na-usb-a>
- [65] LINEAR TECHNOLOGY. LT3652HV. In: Analog Devices [online]. [cit. 2022-12-20]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3652hvf.pdf>
- [66] Prusa research: PETG [online]. [cit. 2022-12-20]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/petg_2059
- [67] ThingSpeak: ThingSpeak for IoT Projects. ThingSpeak: ThingSpeak for IoT Projects [online]. [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://thingspeak.com/>
- [68] Github: thingspeak-arduino. MATHWORKS. Github [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://github.com/mathworks/thingspeak-arduino>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

MPPT	Sledování maximálního bodu výkonu (Maximum Power Point Tracking)
Li-ion	Lithium iontový
CCCV	Konstantní proud následovaný konstantním napětím (Constant Current followed by Constant Voltage)
FV	Fotovoltaický
DC	Stejnsměrný proud (Direct Current)
kWh/m ²	KiloWatt hodin na metr čtverečný
K	Katoda
A	Anoda
G	Galvanometr
M	Mřížka
Au	Zlato
Se	Selen
μm	Mikrometr
V	Volt
mm	Milimetr
W	Watt
EVA	Etylvinylacetátová fólie
tzv.	Takzvaně
např.	Například
tzn.	To znamená
CV	Konstantní napětí (Constant Voltage)
IC	Metoda přírůstkové vodivosti (Incremental Conductance)
P&O	Přerušení a pozorování (Perturb and Observe)
dI _{FV}	Derivace proudu FV panelu
dU _{FV}	Derivace napětí FV panelu
Pb	Olovo
H ₂ SO ₄	Kyselina sírová
Ni-Cd	Nikl-kadmiové
KOH	Hydroxid draselný
Cd	Kadmium
Ni	Nikl
Ni-MH	Nikl-metalhydrid
ZrCrNi	Slitina zirkonu, chromu a niklu
Mg ₂ Ni	Slitina hořčíku a niklu
LaNi _{5-x} Sn _x	Slitina lanthanu, niklu a cínu

Li	Lithium
Li-Pol	Lithium-polymer
Co	Kobalt
LiFePO ₄	Lithium-železo-fosfát
V _{CO}	Metoda napět'ového ukončení dosažením definované hodnoty
PKV	Metoda napět'ového ukončení špičkovým napětím (Peak Voltage)
-ΔU	Metoda napět'ového ukončení rozdílem napětí
mV	Milivolt
d ² V/dt ²	Metoda napět'ového ukončení sledováním druhé derivace napětí v čase
T _{CO}	Metoda teplotního ukončení pevně definovanou hodnotou
ΔT/Δ	Metoda teplotního ukončení sledováním teploty v čase
°C	Stupeň Celsia
A	Ampér
g	Gram
I/O	Vstup/výstup (Input/Output)
RAM	Elektronická krátkodobá paměť (Random Access Memory)
ROM	Elektronická paměť dlouhodobá (Read Only Memory)
MB	Megabajt
kB	Kilobajt
MHz	Megahertz
mA	Miliampér
SPI	Sériové periferní rozhraní
USART	Synchronní a asynchronní sériové rozhraní
PWM	Pulzně šířková modulace
USB	Univerzální sériová sběrnice
kΩ	Kilo ohm
LX	Lux
S	Spínač

Symbols:

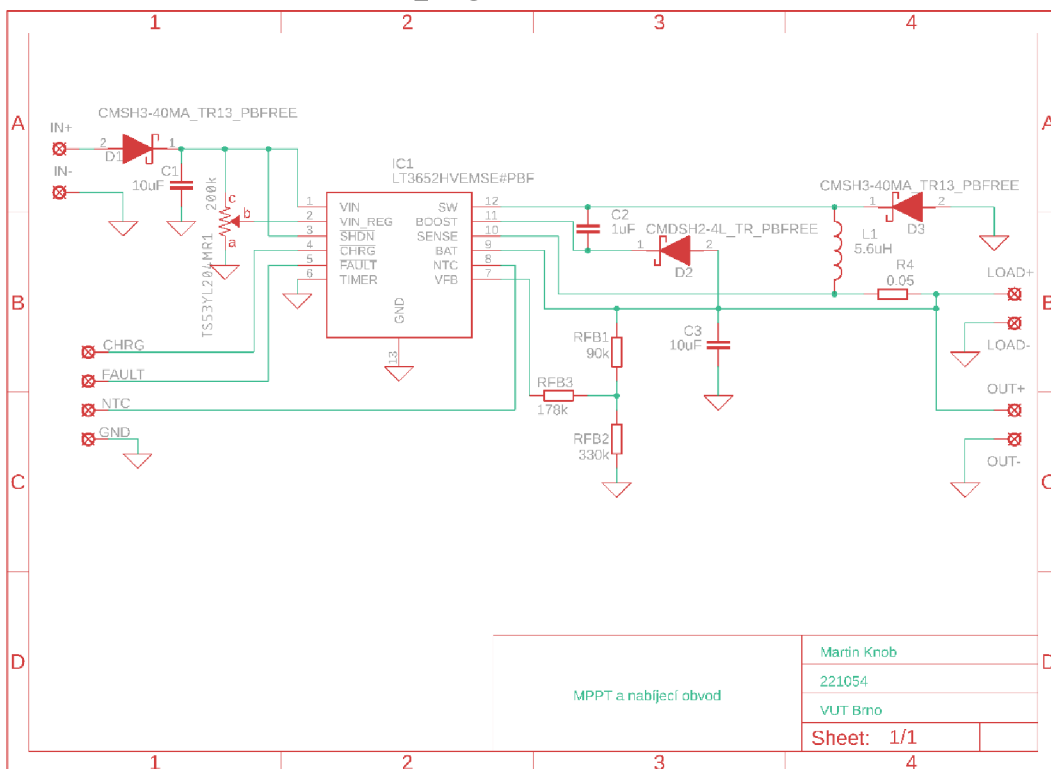
$h\nu$	Energie dopadajícího záření	(J)
W_v	Výstupní práce	(J)
E_k	Kinetická energie	(J)
λ	Vlnová délka	(m)
λ_0	Mezní vlnová délka	(m)
I_{SC}	Zkratový proud	(A)
U_{OC}	Napětí naprázdno	(V)
U_{mp}	Napětí při kterém má FV panel maximální výkon	(V)
I_{mp}	Proud při kterém má FV panel maximální výkon	(A)
I_{FV}	Proud FV panelu	(A)
U_{FV}	Napětí FV panelu	(V)
k_{OC}	Konstanta proporcionality	(-)
k_{SC}	Konstanta proporcionality	(-)
I_{SC}	Proud nakrátko	(A)
R_{FB}	Odpor děliče	(Ω)
$U_{BAT(FLT)}$	Udržovací napětí baterie	(V)
I_{RFB}	Proud děliče	(A)

SEZNAM PŘÍLOH

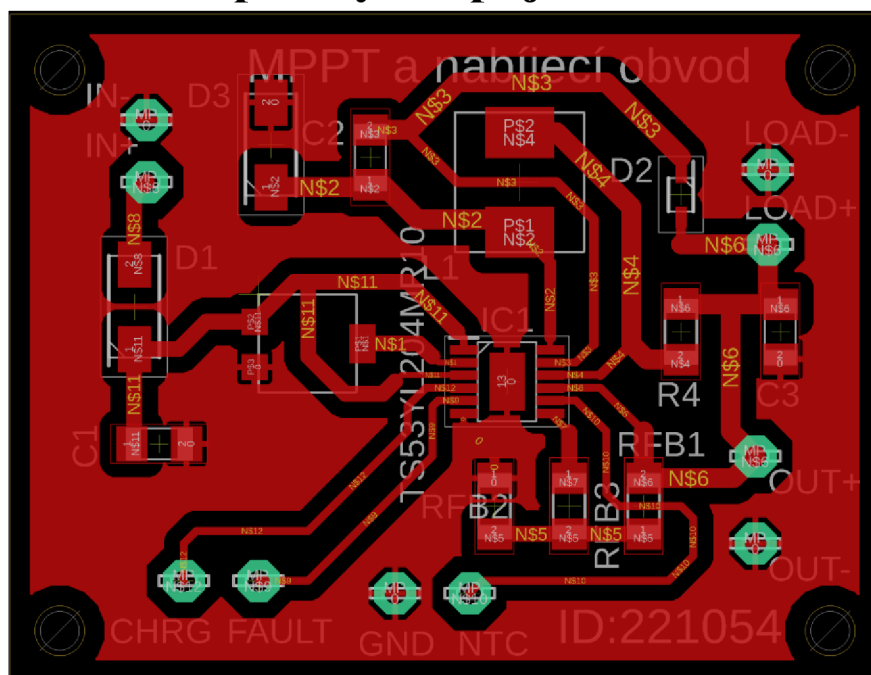
PŘÍLOHA A - MPPT REGULÁTOR A NABÍJECÍ OBVOD.....	77
PŘÍLOHA B - SLEDOVAČ SLUNCE.....	78
PŘÍLOHA C - ZDROJOVÝ KÓD PRO ESP32 JE PŘILOŽEN V SOUBORU ZIP.....	80
PŘÍLOHA D - 3D MODEL TRACKERU JE V PŘILOŽENÉM SOUBORU ZIP.....	81

Příloha A - MPPT regulátor a nabíjecí obvod

A.1 Schéma zapojení

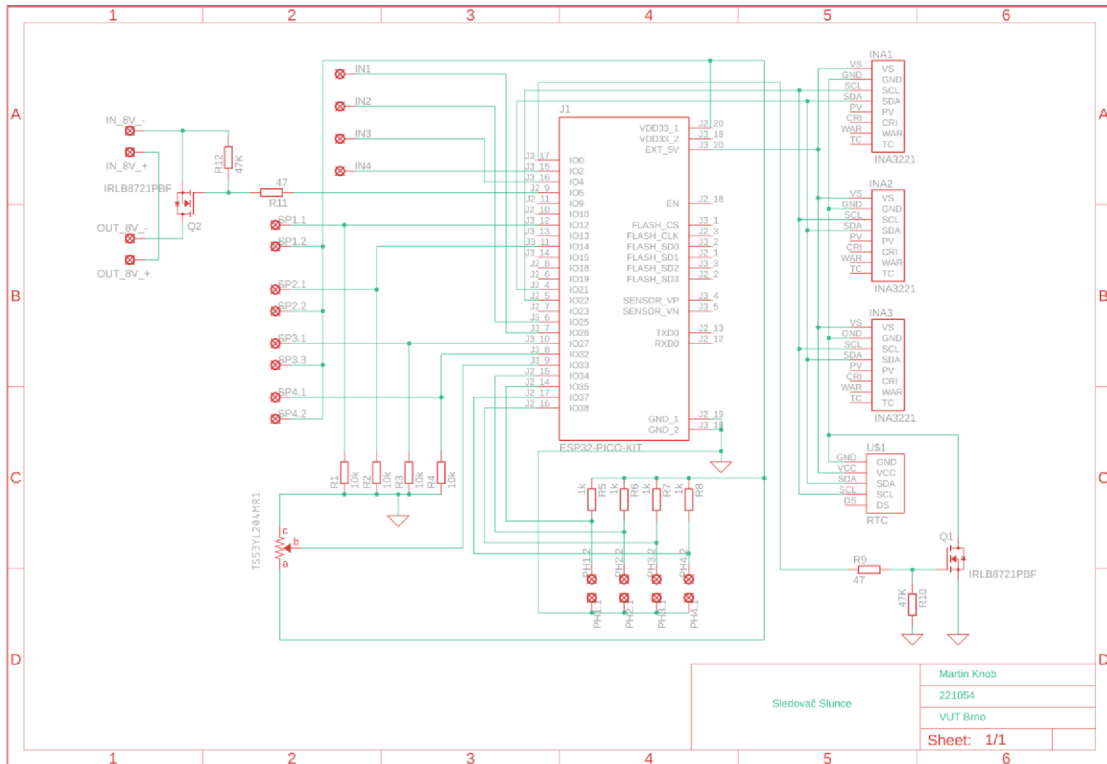


A.2 Deska plošných spojů

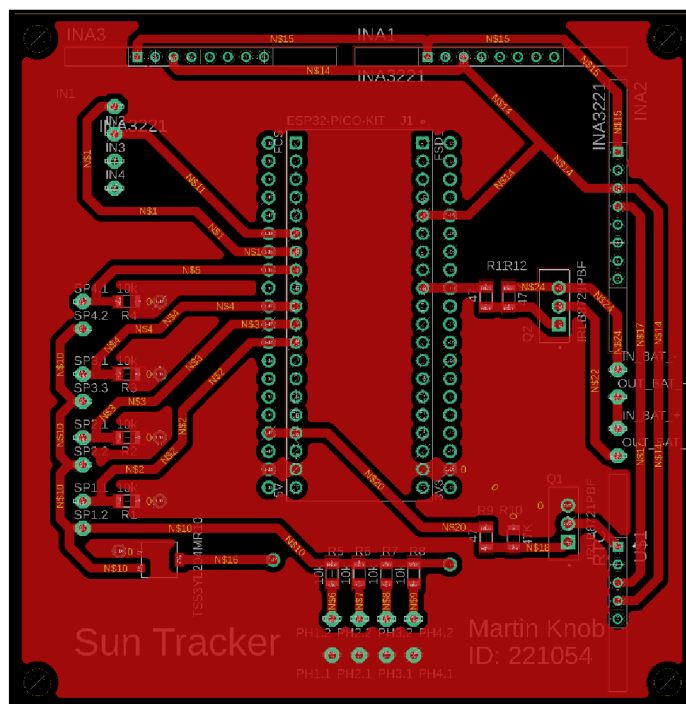


Příloha B - Sledovač Slunce

B.1 Schéma zapojení



B.2 Deska plošných spojů horní strana



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

Příloha D - 3D model trackeru je v přiloženém souboru zip.