

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2025

Aleš Skalický



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## HYBRIDNÍ NAPÁJECÍ SYSTÉM SE SOLÁRNÍM PANELEM

HYBRID POWER SYSTEM WITH SOLAR PANEL

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Aleš Skalický

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Peter Honec, Ph.D.

BRNO 2025

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

**Student:** Aleš Skalický

**ID:** 247464

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2024/25

**NÁZEV TÉMATU:**

## Hybridní napájecí systém se solárním panelem

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je navrhnout low-cost systém pro napájení zařízení v režimu 24/7 kombinující solární napájení, napájení z nočního veřejného osvětlení a bateriový provoz s inteligentním řízením po ethernetu.

- Seznamte se se základními principy.
- Proveďte rešerši v oblasti hybridních napájecích systémů, malé SS napětí (12/24V/48 V).
- Navrhnete vhodnou sestavu solárního panelu (100 Wp), baterie a řídicí elektroniky s možností dobíjení ze sítě 230V.
- Proveďte základní měření nabíjecích charakteristik se solárním panelem i ze sítě a vybíjecích charakteristik se zátěží.
- Osadte DPS a oživte (pouze základní funkčnost procesoru).
- Zhodnoťte.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

HLAVAC V., SONKA M., BOYLE R.: Image Processing, Analysis, and Machine Vision, ISBN 978-0495082521

**Termín zadání:** 10.2.2025

**Termín odevzdání:** 28.5.2025

**Vedoucí práce:** Ing. Peter Honec, Ph.D.

**Ing. Miroslav Jirgl, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

### UPOZORNĚNÍ:

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

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá návrhem a realizací hybridního nízkonákladového napájecího systému, který umožňuje nepřetržitý provoz zařízení v režimu 24/7. Systém kombinuje více zdrojů energie, solární panel, napájení z nočního veřejného osvětlení a z baterie. Klíčovou součástí návrhu je řídicí jednotka, která zajišťuje přepínání mezi jednotlivými zdroji energie na základě aktuálních podmínek. Řídicí jednotka je připravena pro implementaci vzdáleného monitorování a správy systému prostřednictvím ethernetového připojení. Práce se zaměřuje na návrh hardwaru napájecího systému a na otestování jeho funkčnosti. Výsledkem práce je návrh hardwaru pro hybridní napájecí systém, který je vhodný pro aplikace, kde není dostupná stabilní elektrická síť, například pro autonomní monitorovací stanice.

## **Klíčová slova**

Hybridní napájecí systém, solární regulátor nabíjení, solární energie, nabíječka baterií, baterie, vzdálená správa, provoz 24/7.

## **Abstract**

This thesis deals with the design and implementation of a hybrid low-cost power system that allows for 24/7 operation of the facility. The system combines multiple energy sources, solar panel, nighttime public lighting and battery power. A key component of the design is a control unit that provides switching between the different power sources based on current conditions. The control unit is ready to implement remote monitoring and management of the system via an Ethernet connection. The work focuses on the design of the power system hardware and testing its functionality. The result of the work is the design of the hardware for a hybrid power system that is suitable for applications where a stable power grid is not available, such as autonomous monitoring stations.

## **Keywords**

Hybrid power system, solar charge controller, solar power, battery charger, battery, remote management, 24/7 operation.

## **Bibliografická citace**

SKALICKÝ, Aleš. *Hybridní napájecí systém se solárním panelem*. Brno, 2025. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/168273>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2025. 42 s., 1 s. příloh. Bakalářské práce. Vedoucí práce: Ing. Peter Honec, Ph.D.

# Prohlášení autora o původnosti díla

<b>Jméno a příjmení studenta:</b>	Aleš Skalický
<b>VUT ID studenta:</b>	247464
<b>Typ práce:</b>	Bakalářská práce
<b>Akademický rok:</b>	2024/25
<b>Téma závěrečné práce:</b>	Hybridní napájecí systém se solárním panelem

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího 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: 28. května 2025

-----  
podpis autora

## **Poděkování**

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

V Brně dne: 28. května 2025

-----

podpis autora

# Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK.....	10
ÚVOD.....	11
<b>1. TEORIE.....</b>	<b>12</b>
1.1 SOLÁRNÍ PANELE.....	12
1.1.1 Základní parametry solárních panelů.....	12
1.2 BATERIE.....	14
1.2.1 Olověná baterie.....	14
1.2.2 LiFePO <sub>4</sub> baterie.....	14
1.3 SOLÁRNÍ REGULÁTORY NABÍJENÍ.....	15
1.3.1 PWM solární regulátor nabíjení.....	15
1.3.2 MPPT solární regulátor nabíjení.....	16
1.4 NABÍJEČKY BATERÍ.....	17
1.4.1 Základní parametry při výběru nabíječky baterí.....	17
1.5 ŘÍDÍCÍ ELEKTRONIKA.....	18
<b>2. REŠERŠE HYBRIDNÍCH NAPÁJECÍCH SYSTÉMŮ.....</b>	<b>19</b>
2.1 HYBRIDNÍ NAPÁJECÍ SYSTÉM.....	19
2.2 SHRNUTÍ POŽADAVKŮ NA HYBRIDNÍ NAPÁJECÍ SYSTÉM.....	22
2.3 ROZDĚLENÍ NA JEDNOTLIVÉ KOMPONENTY.....	23
2.3.1 Vybrané MPPT solární regulátory nabíjení.....	23
2.3.2 Nabíječka baterí.....	26
2.3.3 Baterie.....	28
2.3.4 Řídící elektronika.....	29
2.3.5 Solární panel.....	32
2.4 KONEČNÝ VÝBĚR VHODNÝCH KOMPONENTŮ.....	33
2.4.1 Solární regulátor nabíjení.....	33
2.4.2 Nabíječka baterí.....	33
2.4.3 Baterie.....	33
2.4.4 Řídící elektronika.....	33
2.4.5 Solární panel.....	34
2.4.6 Přehledové blokové schéma.....	34
<b>3. VLASTNÍ REALIZACE.....</b>	<b>35</b>
3.1 NÁVRH ELEKTRICKÉHO ZAPOJENÍ ŘÍDÍCÍ ELEKTRONIKY.....	35
3.1.1 Spínací členy v řídicí elektronice.....	35
3.1.2 Spínání napětí ze solárních panelů.....	35
3.1.3 Zapojení spínacího prvku pro spínání napětí ze solárních panelů.....	36
3.1.4 Spínání výstupu systému.....	36
3.1.5 Zapojení spínacího prvku výstupu systému.....	36
3.1.6 Spínání síťového napětí do nabíječky baterí.....	37
3.1.7 Zapojení spínacího prvku síťového napětí do nabíječky baterí.....	37
3.1.8 Měření elektrických veličin v několika klíčových bodech systému.....	38
3.1.9 Zapojení měření elektrických veličin v několika klíčových bodech systému.....	39
3.1.10 Hardwarové zapojení mikrokontroleru a jeho periferií.....	41

3.2	NÁVRH ELEKTRICKÉHO SCHÉMA DPS .....	44
3.2.1	<i>Návrh DPS a rozvržení součástek</i> .....	44
3.2.2	<i>Výsledná podoba DPS ve 3D pohledu</i> .....	46
3.2.3	<i>Výsledná podoba DPS po osazení</i> .....	47
3.3	MĚŘENÍ NABÍJECÍCH A VYBÍJECÍCH CHARAKTERISTIK .....	48
3.3.1	<i>Měření při nabíjení ze solárních panelů</i> .....	48
3.3.2	<i>Měření při nabíjení ze sítě</i> .....	49
3.3.3	<i>Měření při vybíjení baterie</i> .....	51
3.3.4	<i>Vyhodnocení výsledků měření</i> .....	51
3.4	OSAZENÍ DPS A OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI .....	52
3.4.1	<i>Postup při osazování DPS</i> .....	52
3.4.2	<i>Beznapěťový test funkčnosti DPS</i> .....	52
3.4.3	<i>Napěťový test funkčnosti DPS a inicializace mikrokontroleru</i> .....	52
3.5	NAPROGRAMOVÁNÍ MIKROKONTROLERU – ZÁKLADNÍ TESTOVACÍ FIRMWARE .....	52
<b>4.</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>53</b>
	<b>LITERATURA</b> .....	<b>54</b>
	<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>57</b>
	<b>SEZNAM ELEKTRONICKÝCH PŘÍLOH</b> .....	<b>58</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1: Graf napětí solárního panelu v závislosti na teplotě [1] .....	13
Obrázek 1.2: Znárodnění omezení při použití PWM solárního regulátoru nabíjení [1].....	15
Obrázek 1.3: Znárodnění výhody při použití MPPT solárního regulátoru nabíjení [1] .....	16
Obrázek 2.1: Ilustrační obrázek SMH 3k [5] .....	19
Obrázek 2.2: Ilustrační obrázek EasySolar-II 3kVA MPPT 250/70 GX [6].....	21
Obrázek 2.3: Ukázka solárního regulátoru Victron energy [7] .....	23
Obrázek 2.4: Ilustrační obrázek Epever XTRA 1206N [8].....	24
Obrázek 2.5: Ilustrační obrázek MPPT CARSPA 20A - 12/ 24 V [9].....	25
Obrázek 2.6: Ilustrační obrázek Mean Well NPB-450-24 [4].....	26
Obrázek 2.7: Ilustrační obrázek Victron energy Blue Smart IP22 Charger [11] .....	27
Obrázek 2.8: Přehledové blokové schéma .....	34
Obrázek 3.1: Ilustrační obrázek relé G5PZ-1A-X DC12 Omron [19].....	36
Obrázek 3.2: Ilustrační obrázek relé sady 39.11.0.012.0060 FINDER [20] .....	37
Obrázek 3.3: Přehledové blokové schéma se znárodněním jednotlivých bodů měření .....	38
Obrázek 3.4: Příklad ochrany vstupu AD převodníku .....	39
Obrázek 3.5: Příklad měření proudu Shunt rezistorem .....	39
Obrázek 3.6: Ilustrační obrázek měřicího modulu PZEM-004T (bez měřicí cívky) [21].....	40
Obrázek 3.7: Příklad zapojení level shifter .....	42
Obrázek 3.8: Zapojení Ethernetového rozhraní .....	42
Obrázek 3.9: Zapojení USB rozhraní.....	43
Obrázek 3.10: Obrázek zobrazující provedení impedančního přizpůsobení.....	45
Obrázek 3.11: 3D pohled na přední stranu DPS .....	46
Obrázek 3.12: 3D pohled na spodní stranu DPS .....	46
Obrázek 3.13: Osazené DPS vrchní strana.....	47
Obrázek 3.14: Osazené DPS spodní strana .....	47
Obrázek 3.15: Přehledové schéma měření při nabíjení ze solárních panelů .....	48
Obrázek 3.16: Přehledové schéma měření při nabíjení ze sítě.....	49

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1: Základní parametry SMH 3k [5].....	20
Tabulka 2.2: Základní parametry EasySolar-II 3kVA MPPT 250/70 GX [6] .....	21
Tabulka 2.3: Požadavky na hybridní napájecí systém .....	22
Tabulka 2.4: Základní parametry SmartSolar Charge Controller MPPT 75/10 [7] .....	23
Tabulka 2.5: Základní parametry Epever XTRA 1206N [8].....	24
Tabulka 2.6: Základní parametry MPPT CARSPA 20A - 12/ 24 V [9] .....	25
Tabulka 2.7: Základní parametry Mean Well NPB-450-24 [10] .....	26
Tabulka 2.8: Základní parametry Victron energy Blue Smart IP22 Charger [11] .....	27
Tabulka 2.9: Parametry baterie CNLFP100-25,6[12].....	28
Tabulka 2.10: Parametry baterie GWL LP12V20AHB .....	28
Tabulka 2.11: Minimální počty požadovaných periférií .....	29
Tabulka 2.12: Parametry MCU STM32L496RG (STMicroelectronics) [14].....	30
Tabulka 2.13: Parametry MCU TM4C1294NCPDT (TI Tiva C Series) [15] .....	31
Tabulka 2.14: Parametry panelu 100W Poly [16].....	32
Tabulka 2.15: Parametry panelu BlueSolar Mono 115W-12V [17] .....	32
Tabulka 2.16: Parametry panelu SolarPro Mono 60W-12V [18] .....	32
Tabulka 3.1 Parametry relé G5PZ-1A-X DC12 Omron [19].....	36
Tabulka 3.2: Parametry relé sady 39.11.0.012.0060 FINDER [20].....	37
Tabulka 3.3: Parametry měřicího modulu PZEM-004T [21].....	40
Tabulka 3.4: Použité přístroje .....	48

# ÚVOD

Tato práce se zabývá návrhem a realizací hybridního nízkonákladového napájecího systému, pro napájení zařízení v režimu 24/7. Klíčovým tématem je efektivní využití obnovitelných zdrojů energie, konkrétně solární energie pro zajištění trvalého napájení zařízení, které je připojeno k nestálému zdroji napájení, jako je napojení monitorovacího zařízení na okruh veřejného osvětlení a úsporu nákladů na provoz. Systém kombinuje napájení ze solárního panelu, baterie a napájení z nočního osvětlení. Celé zařízení by mělo být možné nainstalovat na sloup veřejného osvětlení.

Cílem práce je navrhnout vhodnou kombinaci solárního panelu, baterie, řídicí a výkonové elektroniky pro napájení stejnosměrných zařízení s malým odběrem do 100 W. Dále navrhnout hardware pro inteligentní řídicí systém pro přepínání mezi jednotlivými zdroji energie, pro dosažení co nejefektivnějšího provozu zařízení v režimu 24/7. V poslední části pak otestovat základní parametry systému.

V teoretické části se práce zabývá rozborem jednotlivých komponentů hybridního napájecího systému a řeší jednotlivých komponentů s vhodnými parametry pro použití v této specifikaci hybridního systému. V praktické části jsou dílčí části hybridní napájecího systému sestaveny. Současně je provedena příprava pro vzdálenou správu systému s možností monitorování stavu jednotlivých komponentů a je otestována funkčnost dílčích částí celého systému.

# 1. TEORIE

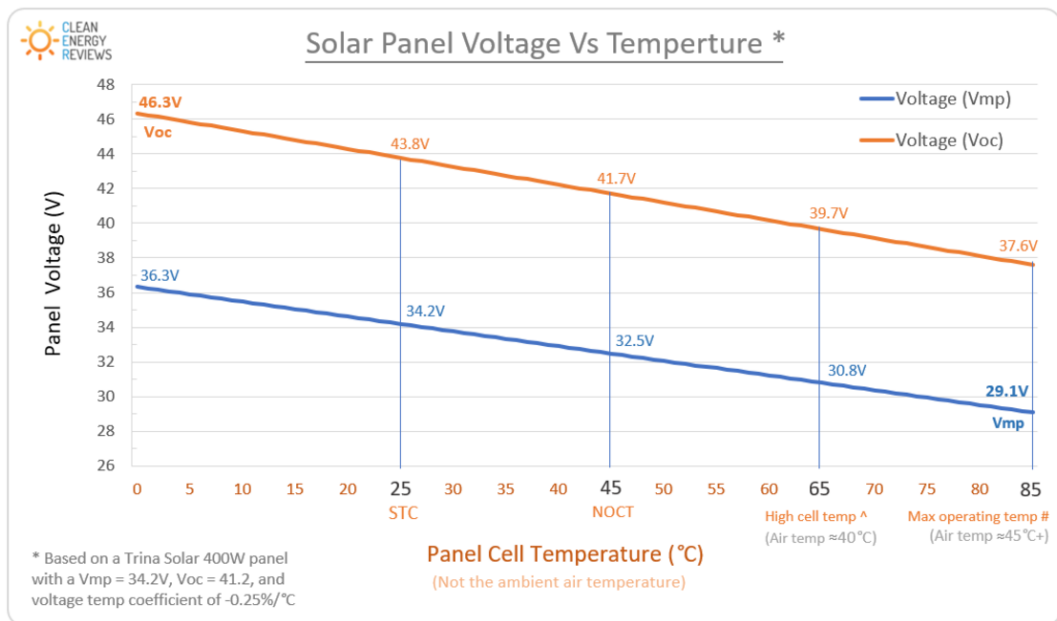
Hybridní napájecí systém se solárním panelem se skládá z více základních komponentů, solárního panelu, baterie, solárního regulátoru nabíjení, nabíječky baterií a řídicí elektroniky. Následující kapitola je rozdělena podle základních komponentů, v jednotlivých částech je stručně popsáno, na jakých principech komponenty pracují a jaké jsou jejich základní parametry potřebné pro jejich výběr na základě potřeb dané aplikace.

## 1.1 Solární panely

Solární panely, konkrétně fotovoltaické, využívají fotovoltaického jevu pro přeměnu sluneční energie na energii elektrickou. Tento proces probíhá ve fotovoltaickém článku, který je nejčastěji tvořen velkoplošnou diodou. Panel se skládá z jednotlivých článků spojených sérioparalelně. Základní rozdělení solárních panelů je na monokrystalické a polykrystalické. Monokrystalické mají jednotlivé články tvořeny z jednoho krystalu křemíku. Toto provedení má obecně větší účinnost, ale je nákladnější na výrobu, proto se používá pro aplikace s menším počtem panelů. Polykrystalické provedení má články vytvořené z roztavených krystalů křemíku. Výsledkem jsou nižší náklady na výrobu, ale také o něco nižší účinnost, proto se hodí do velkých solárních polí.

### 1.1.1 Základní parametry solárních panelů

Základním parametrem solárních panelů jsou jmenovité hodnoty napětí měřené za standardních testovacích podmínek, při teplotě článku 25 °C (STC) a za dané hodnoty osvětlení. Jedním je maximální výkonové napětí ( $V_{mp}$ ), což je standardní provozní napětí panelu. Toto napětí je závislé na intenzitě osvětlení panelu a také na teplotě. Při nižších teplotách stoupá a při vysokých klesá. Tuto změnu udává teplotní koeficient solárního panelu většinou 0,3 % pro 1 °C od hodnoty teploty STC. Druhým je napětí na prázdko ( $V_{oc}$ ), toto napětí je zpravidla vyšší než  $V_{mp}$ , vzniká při otevřené smyčce, toto napětí se také mění s teplotou. Na následujícím obrázku je uveden příklad změny těchto napětí při změně teploty. [1]



Obrázek 1.1: Graf napětí solárního panelu v závislosti na teplotě [1]

Maximální výkon (Wp) panelu se vypočítá vynásobením hodnoty maximálního napětí a maximální hodnoty proudu. Účinnost solárního panelu časem klesá. Zisk solárního panelu závisí na hodnotě osvětlení. Možnost co nejlepšího osvětlení v daném umístění panelu se může ovlivnit jeho polohou vůči slunci, jak úhlem, pod kterým sluneční paprsky dopadají na panel, tak orientací na světovou stranu. Doporučením vhodného umístění a úhlu se zabývá mnoho webových aplikací tzv. solární kalkulačky, které dokáží podle dat osvětlení z daného místa spočítat potenciálně vyrobenou energii za rok, po zadání parametrů solárního pole. Tento nástroj se hodí při plánování fotovoltaické elektrárny.

## 1.2 Baterie

Existuje mnoho typů baterií (akumulátorů), které mají různé vlastnosti. V této části se zaměříme na  $\text{LiFePO}_4$  baterie a na olověné baterie, porovnáme jejich vlastnosti. Základní parametry při výběru baterie jsou následující: Jmenovité napětí baterie a její jmenovitá kapacita udávaná v ampérhodinách Ah nebo také ve watthodinách Wh. Dalším důležitým parametrem může být poměr kapacity baterie k její hmotnosti. Životnost baterie (doba po kterou výrazně neklesne kapacita baterie) je ovlivněna počtem nabíjecích cyklů. Na životnost baterie mají vliv i další faktory, jako například četnost hlubokého vybíjení, způsob nabíjení baterie, provozní teplota a obvyklá hloubka vybití.

### 1.2.1 Olověná baterie

Olověná baterie má elektrody na bázi olova a elektrolytem je kyselina sírová. Ale existují další druhy provedení olověných baterií, které využívají elektrolyt v jiné formě. Jmenovité napětí jednoho článku jsou 2 V. Spojením více článků dohromady je vytvořena baterie většinou o jmenovitém napětí 12 V. Výhodou olověných baterií je jejich schopnost dodávat vysoké rázové proudy. Jejich nevýhodou je míra hloubky vybití. Pro co nejdélší životnost by se baterie neměly na denní bázi vybíjet pod 50 % celkové kapacity. Přesná procentuální hodnota se u různých typů olověných baterií liší. Obecně olověné baterie mají nižší počet cyklů nabití a vybití, a to v řádu stovek, než začnou ztrácet svoji kapacitu. Další důležitý vliv na životnost baterie má provozní teplota. Většinou je doporučovaná teplota +15 °C až +25 °C. Každých +8 °C nad 25 °C může způsobit snížení životnosti až o 30 %. Olověná baterie má nižší energetickou hustotu než například baterie  $\text{LiFePO}_4$ . [2]

### 1.2.2 $\text{LiFePO}_4$ baterie

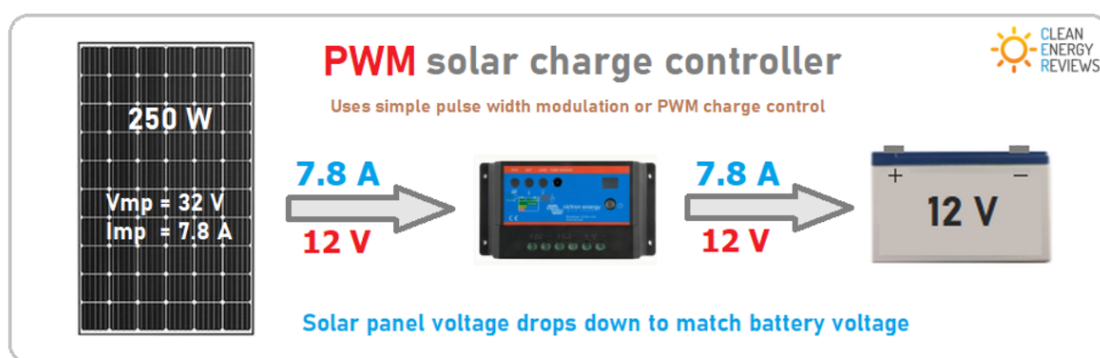
Lithium-železo-fosfátový akumulátor je druh akumulátoru s elektrolytem na bázi organického rozpouštědla nebo polymerního gelu s katodou z lithium-železo-fosfátu a s anodou z uhlíkového grafitu. Maximální doporučené napětí při běžném nabíjení je 3,8 V na článek. Na rozdíl od olověných baterií se častěji vyrábějí s různým jmenovitým napětím 12 V, 24 V a 48 V. Výhodou těchto baterií je míra hloubky vybití. Baterii lze při běžných provozních podmínkách vybíjet do 20 % celkové kapacity. Obecně udávaná životnost je v řádech tisíců cyklů. Provozní teplota má výrazně širší rozsah než u olověných baterií a to -20 °C až 60 °C, ale nabíjení bez ztráty životnosti se musí provádět při teplotách vyšších než 0 °C. Proto je většina baterií vybavena vyhříváním nebo je nutné vyhřívání zajistit jiným způsobem. Díky větší energetické hustotě a menší hloubce vybití lze podstatně snížit celkovou hmotnost použitých baterií v aplikaci než při použití olověných baterií. [3]

## 1.3 Solární regulátory nabíjení

Jsou zařízení, která řídí a zprostředkovávají nabíjení baterie z energie dodané ze solárního panelu. Na vstupu zařízení je připojen výstup ze solárního panelu a na výstupu je připojena baterie. Existují dva hlavní typy solárních regulátorů nabíjení PWM a MPPT.

### 1.3.1 PWM solární regulátor nabíjení

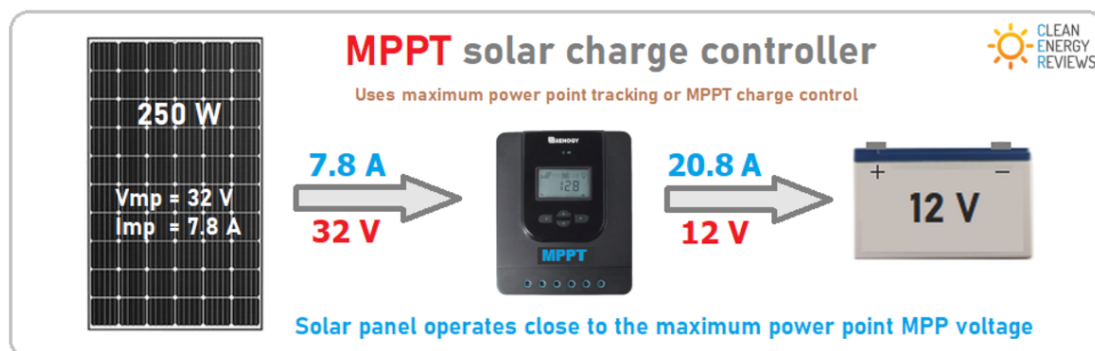
Tento typ solárního regulátoru nabíjení využívá k nabíjení baterie pulzně šířkové modulace a baterie je přímo přes regulátor spojena se solárním panelem. Regulátor moduluje proud a udržuje konstantní napětí baterie. To má však za následek, že panel nepracuje ve svém optimálním provozním napětí, což snižuje jeho výstupní výkon a jeho provozní účinnost. Tento typ solárních regulátorů se spíše hodí pro aplikace s výstupním výkonem v řádech jednotek wattů.



Obrázek 1.2: Znárodnění omezení při použití PWM solárního regulátoru nabíjení [1]

### 1.3.2 MPPT solární regulátor nabíjení

Tento typ solárního regulátoru nabíjení využívá technologii sledování maximálního bodu výkonu. Základem sledovače bodu maximálního výkonu je DC/DC měnič, který pracuje tak, aby využil maximálního výkonu ze solárního panelu. Kvůli oddělení solárního panelu od baterie může panel pracovat za optimálních provozních podmínek. Výstupní napětí a proud panelu závisí na intenzitě ozáření panelu slunečním zářením. To má vliv na napětí a proud panelu, které se v průběhu dne neustále mění. Proto MPPT regulátor nepřetržitě sleduje napětí a proud panelu, aby získal nejlepší kombinaci napětí a proudu pro získání maximálního výkonu. Tato technologie výrazně zvyšuje provozní účinnost a generovaná energie může být o několik desítek procent vyšší než při použití PWM regulátoru nabíjení. [1]



Obrázek 1.3: Znázornění výhody při použití MPPT solárního regulátoru nabíjení [1]

## 1.4 Nabíječky baterií

Nabíječky baterií slouží k bezpečnému a efektivnímu nabíjení baterií. Nabíječka upravuje nabíjecí napětí a proud tak, aby odpovídaly požadavkům konkrétního typu baterie a stavu nabití baterie. Nabíječka se skládá z těchto základních částí: napájecí zdroj, usměrňovač, regulátor napětí a proudu, řídicí jednotka a bezpečnostní obvody. Nabíjení obvykle probíhá ve třech hlavních fázích.

- **Přednabíjecí fáze (Pre-Charge)** - fáze je určena k bezpečnému obnovení velmi vybité baterie. Nabíječka nabíjí velmi nízkým proudem, aby nedošlo k poškození baterie.
- **Fáze konstantního proudu (CC – Constant Current)** - v této fázi nabíječka udržuje konstantní nabíjecí proud. Baterie se nabíjí nejrychleji a většinou odpovídá za většinu přenesené energie do baterie (70 % – 80 % z kapacity baterie).
- **Fáze konstantního napětí (CV – Constant Voltage)** - v této fázi nabíječka udržuje konstantní nabíjecí napětí a pomalu snižuje nabíjecí proud. Tato fáze zajistí plné nabití baterie bez rizika přehřátí nebo poškození baterie.

### 1.4.1 Základní parametry při výběru nabíječky baterií

Základní parametry při výběru nabíječky baterií jsou následující:

- **Celkový výkon nabíjení** určuje, jak rychle se baterie může nabít.
- **Výstupní napětí a proud**, na které je nabíječka navržena a při kterých pracuje. Hodnoty napětí a proudu se odvíjejí od typu použité baterie.
- **Kompatibilita**, podpora různých kapacit a typů baterií.
- **Bezpečnostní prvky**, kterými je daná nabíječka vybavena, nejčastěji ochrana proti přebití, přehřátí a zkratu.
- **Způsob chlazení** nabíječky aktivní, pasivní nebo kombinace obojího. [4]

## 1.5 Řídící elektronika

Řídící elektronika v této aplikaci bude zprostředkovávat sběr dat z jednotlivých komponentů hybridního napájecího zdroje a na základě těchto dat řídit správu systému hybridního zdroje. Řídící elektronika by měla dále zprostředkovávat posílání diagnostických dat a umožňovat vzdálenou správu celého systému. K těmto účelům je vhodné využít mikrokontroleru.

Při výběru mikrokontroleru (MCU) je klíčové zohlednit několik zásadních parametrů, které určují jeho vhodnost pro konkrétní aplikaci. Mezi ně patří:

- **Procesorové jádro a architektura:** Zvolené jádro (např. ARM Cortex-M, AVR nebo PIC) ovlivňuje výkon, podporované instrukční sady a efektivitu zpracování úloh.
- **Taktovací frekvence:** Frekvence procesoru ovlivňuje rychlost zpracování dat. Vyšší frekvence (např. 120 MHz) poskytuje vyšší výkon, ale zvyšuje spotřebu energie, což je třeba zvážit u bateriových zařízení.
- **Paměťové kapacity:** Velikost paměti RAM a Flash je rozhodující pro ukládání dat a kódu programu. Pro komplexní aplikace s rozsáhlým firmwarem je třeba dostatek Flash paměti.
- **Napájecí napětí a spotřeba energie:** Nízká spotřeba je kritická u zařízení napájených z baterií nebo v IoT aplikacích. Některé mikrokontrolery nabízejí režimy nízké spotřeby (Low Power Modes), které výrazně šetří energii.
- **Periférie:** Počet a typ integrovaných periférií (např. ADC, DAC, UART, SPI, I2C) určují schopnost komunikace s okolními zařízeními a sensorovou podporu. Důležité je také zvážit počet GPIO pinů a jejich konfiguraci.
- **Teplotní rozsah a robustnost:** Pro průmyslové aplikace je třeba zohlednit pracovní teplotní rozsah a odolnost vůči vnějším vlivům jako je elektromagnetické rušení.
- **Podpora a ekosystém:** Dostupnost vývojových nástrojů a podpora výrobce.

## 2. REŠERŠE HYBRIDNÍCH NAPÁJECÍCH SYSTÉMŮ

Hybridním napájecím zařízením se rozumí zařízení, které kombinuje více zdrojů energie. V tomto případě se jedná o napájení z elektrické sítě 230 V AC v kombinaci s napájením ze solárního panelu a napájením z baterie. Existuje více úrovní systémového napětí, a to konkrétně 12 V, 24 V nebo 48 V. U 12V systému je požadavek na větší průřezy použitých vodičů a vyšší proudovou odolnost součástí, protože pro stejný výkon protékají systémem 2x vyšší proudy než ve 24V systému. Obdobně je to při použití 48V systému. Dvanáctivoltový systém se spíše hodí pro aplikace s požadavky na nižší výkony, 24V systém pak pro střední výkony a 48V systém pro požadavky na vysoké výkony. V této aplikaci je požadavek na napájení zařízení 24 V DC, tímto výstupem z komerčně dostupných zařízení disponuje jen velmi málo zařízení. Většina komerčně dostupných zařízení obsahuje inverter na 230 V AC, pro napájení zařízení z tohoto typu elektrické sítě. Z tohoto důvodu byla rešerše převážně zaměřena na jednotlivé komponenty hybridního systému vhodné pro tuto konfiguraci.

### 2.1 Hybridní napájecí systém

#### SMH 3k

Je hybridní napájecí zdroj od společnosti EA Sun Power kombinující napájení ze sítě 230 V, solárního pole a baterie, pro zajištění nepřetržitého napájení připojených zařízení sítě 230 V AC. Umožňuje funkci studeného startu, při které zařízení umožňuje pracovat bez potřeby napájení sítě. Disponuje komunikačním portem RS232. Další parametry jsou uvedeny v tabulce. [5]



Obrázek 2.1: Ilustrační obrázek SMH 3k [5]

Tabulka 2.1: Základní parametry SMH 3k [5]

Napětí baterie (PV nabíječka)	24 V
Jmenovitý nabíjecí proud (PV nabíječka)	40 A
Nominální FV výkon 12 V (PV nabíječka)	1000 W
Max. FV napětí otevřené smyčky (PV nabíječka)	102 V
Špičková efektivita (PV nabíječka)	98 %
Výstupní napětí (režim baterie)	230 V
Jmenovitý výkon	2400 W

### EasySolar-II 3kVA MPPT 250/70 GX

Je hybridní napájecí zdroj od společnosti Victron Energy stejně jako předešlý SMH 3k kombinuje napájení ze sítě 230 V, solárního pole a baterie, pro zajištění nepřetržitého napájení připojených zařízení sítí 230 V AC. Zdroj zobrazuje na integrovaném displeji potřebné informace o provozu zdroje, tyto informace lze zobrazovat i vzdáleně v mobilní aplikaci dodávané výrobcem. Přes aplikaci jde provádět i nastavení hybridního zdroje. Další základní parametry jsou uvedeny v tabulce. [6]



Obrázek 2.2: Ilustrační obrázek EasySolar-II 3kVA MPPT 250/70 GX [6]

Tabulka 2.2: Základní parametry EasySolar-II 3kVA MPPT 250/70 GX [6]

Napětí baterie (PV nabíječka)	24 V
Jmenovitý nabíjecí proud (PV nabíječka)	70 A
Nominální FV výkon 12 V (PV nabíječka)	2000 W
Max. FV napětí otevřené smyčky (PV nabíječka)	250 V
Špičková efektivita (PV nabíječka)	99 %
Jmenovitý výkon	2400 W

## 2.2 Shrnutí požadavků na hybridní napájecí systém

Na základě těchto požadavků byly vybírány jednotlivé komponenty hybridního napájecího systému. Požadavky jsou uvedeny v tabulce.

Tabulka 2.3: Požadavky na hybridní napájecí systém

<b>Požadavky na hybridní napájecí systém:</b>	
Napětí systému	24 V DC
Výstupní napětí	24 V DC
Zátěž na výstupu 24/7	typická 25 W maximální 80 W
Výkon solárního pole	100 W <sub>p</sub>
Typ použité baterie	LiFePO <sub>4</sub>
Kapacita baterie	typická 20 Ah maximální 100 Ah
Nabíjecí výkon ze sítě 230V AC	300–400 W
Komunikace	Ethernet

## 2.3 Rozdělení na jednotlivé komponenty

Hybridní napájecí systém vhodný pro tuto aplikaci se skládá z těchto komponentů, solárního regulátoru nabíjení, nabíječky baterií, baterie, řídicí elektroniky a solárního panelu.

### 2.3.1 Vybrané MPPT solární regulátory nabíjení

Pro výběr byly zvoleny solární regulátory nabíjení typu MPPT, pro jejich vlastnost dosáhnout za daných podmínek většího maximálního výkonu ze solárního panelu než při použití PWM solárního regulátoru nabíjení. Komerčně dostupné regulátory MPPT byly zvoleny, tak aby splňovaly parametry požadované danou aplikací.

#### Victron energy SmartSolar Charge Controller MPPT 75/10



Obrázek 2.3: Ukázka solárního regulátoru Victron energy [7]

Tento MPPT solární regulátor nabíjení od společnosti Victron energy, zvládá napětí solárního pole až 75 V a jmenovitý nabíjecí proud 10 A. V tabulce jsou uvedeny další základní parametry. Výrobce poskytuje vzdálenou správu regulátoru přes rozhraní Bluetooth a mobilní aplikaci. [7]

Tabulka 2.4: Základní parametry SmartSolar Charge Controller MPPT 75/10 [7]

Napětí baterie (automatické zvolení)	12/24 V
Jmenovitý nabíjecí proud	10 A
Nominální FV výkon 12 V	145 W
Max. FV napětí otevřené smyčky	75 V
Špičková efektivita	98 %

### Epever XTRA 1206N

Tento MPPT solární regulátor nabíjení od společnosti Epever má podobné parametry jako regulátor od společnosti Victron energy. Maximální napětí solárního pole 60 V a jmenovitý nabíjecí proud 10 A. Další parametry jsou uvedeny v tabulce. Výrobce nabízí přímé zobrazení údajů na integrovaném displeji nebo přes mobilní aplikaci nebo přes přímé propojení s PC. [8]



Obrázek 2.4: Ilustrační obrázek Epever XTRA 1206N [8]

Tabulka 2.5: Základní parametry Epever XTRA 1206N [8]

Napětí baterie (automatické zvolení)	12/24 V
Jmenovitý nabíjecí proud	10 A
Jmenovitý FV výkon 12 V	130 W
Max. FV napětí otevřené smyčky	60 V
Špičková efektivita	97,9 %

### MPPT CARSPA 20A - 12/24V

Tento MPPT solární regulátor nabíjení od výrobce Carspa má podobné parametry jako dva předešlé regulátory. Maximální napětí solárního pole 65 V a vyšší maximální nabíjecí proud 20 A. Minimální napětí solárního pole v režimu 12 V je 10-40 V, pro režim 24 V je rozmezí 20-65 V. Další parametry jsou uvedeny v tabulce. Tento regulátor nenabízí vzdálenou správu. [9]



Obrázek 2.5: Ilustrační obrázek MPPT CARSPA 20A - 12/ 24 V [9]

Tabulka 2.6: Základní parametry MPPT CARSPA 20A - 12/ 24 V [9]

Napětí baterie	12/24 V
Jmenovitý nabíjecí proud	20 A
Maximální výkon modulu	240 W/ 480 W
Max. napětí modulu	65 V
Špičková efektivita	99 %

### 2.3.2 Nabíječka baterií

Nabíječka baterií je v této aplikaci hlavním zdrojem pro nabíjení baterie, nabíječka je napájena ze sítě 230 V. Toto napájení je ale dostupné po omezenou dobu, a to kdy je spuštěno veřejné osvětlení. Bylo stanoveno, že bude počítáno s dobou okolo pěti hodin denně při zahrnutí letního provozu. Z těchto předpokladů vychází, že by nabíječka měla disponovat nabíjecím výkonem cca 300–400 W. Dalším požadavkem na nabíječku je možnost vzdálené správy a zasílání diagnostických dat. Nabíječka musí umožňovat nabíjení LiFePO<sub>4</sub> baterií viz. sekce Baterie [10]

#### Nabíječka Mean Well NPB-450-24



Obrázek 2.6: Ilustrační obrázek Mean Well NPB-450-24 [4]

Nabíječka od společnosti Mean Well je průmyslovou nabíječkou, její provedení je robustní a vhodné pro intenzivní použití. Nabíječka disponuje řadou ochrán: ochrana proti zkratu, přepětí, přehřátí, podpětí a přepólování baterie. Umožňuje nastavení nabíjecích průběhů. Podporuje nabíjení baterie typu LiFePO<sub>4</sub>. Disponuje vestavěnou sběrnici CANBus pro vzdálené ovládání. Základní parametry jsou uvedeny v tabulce. [10]

Tabulka 2.7: Základní parametry Mean Well NPB-450-24 [10]

BOOST nabíjecí napětí	28,8 V
FLOAT nabíjecí napětí	27,6 V
Maximální výstupní proud	13,5 A
Maximální výstupní výkon	453,6 W
Efektivita	93 %

## Victron energy Blue Smart IP22 Charger 24/12



Obrázek 2.7: Ilustrační obrázek Victron energy Blue Smart IP22 Charger [11]

Nabíječka Victron energy Blue Smart IP22 Charger profesionální nabíječka s přesnou kontrolou nabíjení, vhodná pro dlouhou životnost baterie. Disponuje ochranou proti zkratu, přehřátí a přepólování. Podporuje nabíjení baterie typu LiFePO4. Nabíječka disponuje technologií Bluetooth pro správu z mobilní aplikace. Základní parametry jsou uvedeny v tabulce. [11]

Tabulka 2.8: Základní parametry Victron energy Blue Smart IP22 Charger [11]

BOOST nabíjecí napětí	28,4 V
FLOAT nabíjecí napětí	27,0 V
Maximální výstupní proud	12 A
Maximální výstupní výkon	340,8 W
Efektivita	94 %

### 2.3.3 Baterie

Výhodné je použití LiFePO<sub>4</sub> baterií, protože mají delší životnost, nižší hmotnost při stejných parametrech a širším rozpětí provozní teploty než olověné baterie. Ale vyžadují použití nabíječky baterií a MPPT solárního regulátoru nabíjení, který podporuje nabíjení LiFePO<sub>4</sub> baterií. Baterii je nutné pro nabíjení při teplotách nižších než 0 °C externě vyhřívat nebo použít baterii s integrovaným vyhříváním. Systém bude napájet zařízení s napětím 24 V DC, proto i baterie bude 24V, takto zvolená úroveň napětí má i další výhody. Kapacita baterie by měla být 80–100 Ah, nebo 20 Ah. Hodnota kapacity 80–100 Ah počítá s napájením zařízení s odběrem 80 W po dobu 24 hodin čistě z baterie. Hodnota kapacity 20 Ah počítá s napájením zařízení s odběrem 25 W.

#### Goowei Energy CNLFP100-25,6 100 Ah

Je moderní trakční baterie LiFePO<sub>4</sub> od společnosti Goowei Energy s BMS obvodem chránícím články baterie před nežádoucími stavy jako je příliš hluboké vybití, přebíjení, překročení proudových limitů a proti zkratu. Optimální životnost více než 2000 cyklů při 100 % hloubce vybití. Pro tuto baterii je nutné zajistit externí zahřívání pro nabíjení při teplotách nižších než 0 °C. Další parametry jsou uvedeny v tabulce. [12]

Tabulka 2.9: Parametry baterie CNLFP100-25,6[12]

Jmenovité napětí	25,6 V
Jmenovitá kapacita	100 Ah
Maximální nabíjecí/vybíjecí proud	100/100 A
Provozní napětí	18,4 – 29,2 V
Provozní teplota nabíjení/vybíjení	0-45 / -10-50 °C
Hmotnost	22,3 Kg

#### GWL LP12V20AHB

Je baterie 12V, proto se počítá s využitím sériového spojení dvou baterií. Baterie nemá externí zahřívání. Zahřívání bude vyřešeno, tím že při nízkých teplotách se bude baterie nabíjet nižším výkonem.

Tabulka 2.10: Parametry baterie GWL LP12V20AHB

Jmenovité napětí	12 V
Jmenovitá kapacita	20 Ah
Maximální nabíjecí/vybíjecí proud	10/100 A
Provozní teplota nabíjení/vybíjení	0-45 / 0-55 °C
Celková hmotnost	1 Kg

### 2.3.4 Řídící elektronika

Při výběru vhodných MCU pro tuto aplikaci bylo vybíráno na základě následujících požadavků. Aby MCU mělo dostatečný výpočetní výkon pro řízení algoritmů přepínání mezi zdroji a monitorování stavu systému. Podpora komunikačních rozhraní UART/SPI/I<sup>2</sup>C pro připojení k periferiím a podpora Ethernet pro vzdálenou správu a monitorování. Široké možnosti GPIO pro ovládání prvků k přepínání zdrojů a dalších periferií. Podpora knihoven a nástrojů k usnadnění vývojové fáze softwaru. V tabulce jsou uvedeny minimální počty jednotlivých periferií s možným využitím.

Tabulka 2.11: Minimální počty požadovaných periferií

<b>Periferie</b>	<b>Počet</b>	<b>Možné využití</b>
UART	1x	Ladění systému pomocí sériového monitoru
SPI	2x	Pro připojení externího ADC
I <sup>2</sup> C	4x	Připojení nízkoenergetických senzorů
GPIO	8x	Pro ovládání relé nebo MOSFET přepínačů
Ethernet	1x	Připojení pro vzdálené monitorování a ovládání systému
ADC	2x	Pro měření proudu a napětí

## STM32L496RG

Je ultra-low-power MCU od společnosti STMicroelectronics postavené na Arm Cortex - M4 32-bit RSC jádře operující na frekvenci až 80 MHz. Další parametry jsou uvedeny v tabulce. [14]

Tabulka 2.12: Parametry MCU STM32L496RG (STMicroelectronics) [14]

STM32L496RG (STMicroelectronics)		
Jádro:	ARM Cortex-M4F	
Paměť:	Flash pamět: 1 MB	SRAM: 320 KB
Periferie:		
	Ethernet MAC:	Ano, ale bez integrovaného PHY
	ADC:	3 moduly s 12bitovým rozlišením
	UART:	6 portů
	SPI, I <sup>2</sup> C, USB:	3x, 4x, podpora USB OTG
	PWM:	2 moduly s vysokým rozlišením
	GIPO:	82 pinů
Napájení:	1,8 – 3,6 V	
Cena:	střední	

### TM4C1294NCPDT (TI Tiva C Series)

Je mikrokontroler od společnosti Texas Instruments ze série Tiva C. Je určen pro aplikace s požadavkem na výpočetní výkon, síťovou konektivitu a flexibilní možnosti periférií. Jádro procesoru postavené na Cortex-M4F ARM. Další parametry jsou uvedeny v tabulce. [15]

Tabulka 2.13: Parametry MCU TM4C1294NCPDT (TI Tiva C Series) [15]

<b>TM4C1294NCPDT (TI Tiva C Series)</b>		
Jádro:	ARM Cortex-M4F	
Paměť:	Flash paměť: 1 MB	SRAM: 256 KB
Periferie:		
	Ethernet MAC:	Ano + PHY
	ADC:	2 moduly s 12bitovým rozlišením
	UART:	8 portů
	SPI, I <sup>2</sup> C, USB:	4x, 10x, podpora USB OTG
	PWM:	1 moduly s vysokým rozlišením
	GIPO:	90 pinů
Napájení:	3,0 – 3,6 V	
Cena:	střední	

### 2.3.5 Solární panel

Na trhu je dostupná celá řada různých specifikací solárních panelů. Pro tuto aplikaci je potřebný výkon dán v zadání práce a to 100 Wp, tento výkon je kompromisem mezi velikostí plochy panelu a omezenými možnostmi montáže na stožár veřejného osvětlení.

#### 100W Poly

Je polykrystalický solární panel s vysokým výkonem v hliníkovém rámu.

Tabulka 2.14: Parametry panelu 100W Poly [16]

Jmenovitý špičkový výkon	100 Wp
Max. proud (Imp)	5,38 A
Max. napětí (Vmp)	18,60 V
Napětí otevřené smyčky	22,30 V
Rozměry	1010x680x30 mm
Váha	7 Kg

#### BlueSolar Mono 115W-12V

Je monokrystalický panel od společnosti Victronenergy s výkonem 115W v hliníkovém rámu. Výkon je zanedbatelně vyšší než požadovaný.

Tabulka 2.15: Parametry panelu BlueSolar Mono 115W-12V [17]

Jmenovitý výkon	115 Wp
Max. proud (Imp)	6,04 A
Max. napětí (Vmp)	19,00 V
Napětí otevřené smyčky	23,32 V
Rozměry	1030x668x30 mm
Váha	8 Kg

#### SolarPro Mono 60W-12V

Je monokrystalický panel od společnosti SolarPro s výkonem 60W v hliníkovém rámu.

Tabulka 2.16: Parametry panelu SolarPro Mono 60W-12V [18]

Jmenovitý výkon	60 Wp
Max. proud (Imp)	3,3 A
Max. napětí (Vmp)	18,24 V
Napětí otevřené smyčky	21,8 V
Rozměry	1030x668x30 mm
Váha	5 Kg

## **2.4 Konečný výběr vhodných komponentů**

Na základě rešerší daných komponentů byla zvolena výsledná kombinace komponentů, která je vhodná pro použití v hybridním napájecím systému, který splňuje požadavky zadavatele a zadání. Při zpracovávání rešerše byly komponenty vybírány podle daných požadavků a v rešerši uvedeny alternativy od různých výrobců s minimálními rozdíly v klíčových parametrech. V této kapitole bude ke každému komponentu napsáno, proč byl daný komponent zvolen.

### **2.4.1 Solární regulátor nabíjení**

Vybraným solárním regulátorem nabíjení je CARSPA MPPT 20A-12/24 V, protože splňuje požadavky na potřebný nabíjecí výkon a vyhovuje i v dalších parametrech jako je jednoduchost ovládání.

### **2.4.2 Nabíječka baterií**

Vybranou nabíječkou baterií je Mean Well NPB-450-24, protože splňuje požadavky na nabíjecí výkon a podporuje ovládání přes CANbus, kterého bude využito pro její správu z řídicí elektroniky.

### **2.4.3 Baterie**

Vybranou baterií je GWL LP12V20AHB, protože prvotní konfiguraci bude počítáno s průměrným výkonem napájeného zařízení 25 W.

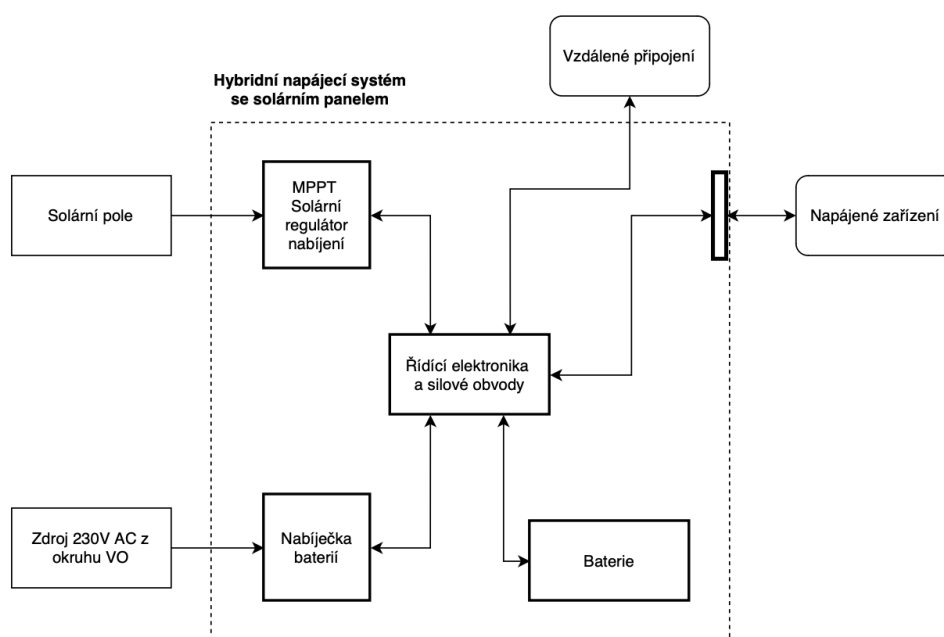
### **2.4.4 Řídící elektronika**

Vybraným MCU pro řídicí elektroniku je TM4C1294NCPDT (TI Tiva C Series) od společnosti Texas Instruments. Splňuje dané minimální počty daných periférií a na rozdíl od druhého vybraného MCU disponuje již integrovaným rozhraním Ethernet MAC + PHY.

## 2.4.5 Solární panel

Vybraným solárním panelem nemůžou být první dva z uvedených, protože vybraný solární regulátor nabíjení CARSPA MPPT 20A-12/24 V pracuje v režimu 24 V v rozmezí napětí solárního pole 20-65 V, při použití jen jednoho panelu je maximální napětí obou vybraných panelů pod touto úrovní. Řešením je použití dvou panelů zapojených do série. Tím se napětí solárního pole zvýší. Výsledným maximálním napětím solárního pole je součet maximálních napětí použitých panelů. V tomto případě byl vybrán solární panel SolarPro Mono 60W-12V, protože při podobné velikosti dosahuje vyššího výkonu.

## 2.4.6 Přehledové blokové schéma



Obrázek 2.8: Přehledové blokové schéma

## 3. VLASTNÍ REALIZACE

V této části se práce zabývá vlastní realizací a návrhem elektrického zapojení řídicí elektroniky. Také se zabývá výběrem vhodných součástek s potřebnými parametry pro danou aplikaci. Dále návrhem elektrického schématu pro desku plošného spoje s implementací řídicího MCU. A následným návrhem designu DPS. Měřením dílčí části systému, která zprostředkovává nabíjení baterie, a to v rozsahu stanovení základních nabíjecích charakteristik v režimu nabíjení ze solárního panelu i ze sítě. Provedením měření vybíjecích charakteristik při zapojené zátěži. Postupem při osazování DPS a testem funkčnosti DPS a mikrokontroleru.

### 3.1 Návrh elektrického zapojení řídicí elektroniky

Hlavní částí řídicí elektroniky jsou spínací členy pro spínání zdrojů nabíjení baterie. V řídicí elektronice je zahrnuto i měření elektrického napětí a proudu v různých částech systému důležitých pro monitoring a správu systému zpracovávaných řídicím MCU. Tak jako potřebné obvody pro zajištění funkčnosti a požadavků pro připojení samotného čipu mikrokontroleru a jeho periférií.

#### 3.1.1 Spínací členy v řídicí elektronice

Systém je navržen tak, že je potřeba zajistit spínání napětí ze solárních panelů do MPPT solárního regulátoru nabíjení a tím i nabíjení baterie z tohoto zdroje. Obdobně je to i v případě potřeby spínat síťové napětí do nabíječky baterií. Dále je spínán výstup systému určený pro napájení napájeného zařízení. Také je blíže popsán postup výběru jednotlivých spínacích prvků.

#### 3.1.2 Spínání napětí ze solárních panelů

Pro potřeby této aplikace byla zvolena kombinace dvou solárních panelů SolarPro Mono 60W-12V, jejichž technické parametry jsou uvedeny v tabulce *Tabulka 2.16*. Panely byly zapojeny do série, což znamená, že výstupní napětí solárního pole je dvojnásobné oproti napětí jednoho panelu. Tato skutečnost musí být zohledněna při návrhu a dimenzování spínacího prvku, který musí být schopen spolehlivě pracovat při vyšším napětí. Jako vhodný spínací prvek bylo zvoleno elektromagnetické relé, a to zejména z důvodu jeho schopnosti spínat kladný pól napájecího napětí. Alternativní možnosti, jako například polovodičové relé (Solid State Relay) nebo spínací tranzistor osazený přímo na desce, byly zamítnuty, neboť tyto prvky obvykle spínají zátěž vůči zemi a neumožňují přímé spínání kladného pólu, což by v této aplikaci představovalo omezení z hlediska funkčnosti. Vybraným relé je Univerzální relé High VDC Power Relay od společnosti Omron.

### Univerzální relé High VDC Power Relay Omron

Je elektromagnetické relé od společnosti Omron pro osazení na DPS. I přesto, že jsou jeho parametry v některých ohledech naddimenzované vzhledem k požadavkům dané aplikace, jedná se o nejvhodnější volbu z běžně dostupných relé na trhu.

Tabulka 3.1 Parametry relé G5PZ-1A-X DC12 Omron [19]

Výrobní číslo	G5PZ-1A-X DC12
Jmenovitý proud kontaktu	16 A
Spínací napětí	277 VAC/ 220VDC
Napětí cívky	12 V
Forma reléového kontaktu	SPST - NO
Materiál kontaktu	Stříbro



Obrázek 3.1: Ilustrační obrázek relé G5PZ-1A-X DC12 Omron [19]

#### 3.1.3 Zapojení spínacího prvku pro spínání napětí ze solárních panelů

Z důvodu, že se jedná o elektromagnetické relé s napětím cívky 12 VDC nelze jej přímo spínat z GPIO výstupu MCU. Proto je jeho spínání řešeno přes pomocný spínací MOSFET tranzistor, který je už přímo spínán signálem z MCU. Pro potřebu spínacího napětí 12 VDC je využit STEP-DOWN modul, který systémové napětí 24 VDC transformuje na potřebné napětí 12 VDC. Paralelně k cívce relé je zapojena polovodičová dioda sloužící jako ochrana proti napěťovým špičkám z cívky relé.

#### 3.1.4 Spínání výstupu systému

Spínání napájecího výstupu systému je řešeno stejným relé Omron G5PZ-1A-X DC12, jako v předchozím případě.

#### 3.1.5 Zapojení spínacího prvku výstupu systému

Zapojení je obdobné jako v případě zapojení spínacího prvku pro spínání napětí ze solárních panelů.

### 3.1.6 Spínání síťového napětí do nabíječky baterií

Zvoleným spínacím prvkem je rovněž elektromagnetické relé vhodné pro spínání na vstupu nabíječky baterií s proudovým odběrem 2 A v síti 230 VAC. Vybraným relé je 39.11.0.012.0060 od společnosti FINDER.

#### Relé sada 39.11.0.012.0060 FINDER

Je sada elektromagnetického relé od společnosti FINDER. Relé je dodávané pro montáž na DIN lištu se signalizační diodou.

Tabulka 3.2: Parametry relé sady 39.11.0.012.0060 FINDER [20]

Označení	39.11.0.012.0060
Jmenovitý proud kontaktu	6 A
Zatížitelnost kontaktu	250 VAC
Napětí cívky	12 V
Forma reléového kontaktu	SPST – NO, SPST – NC



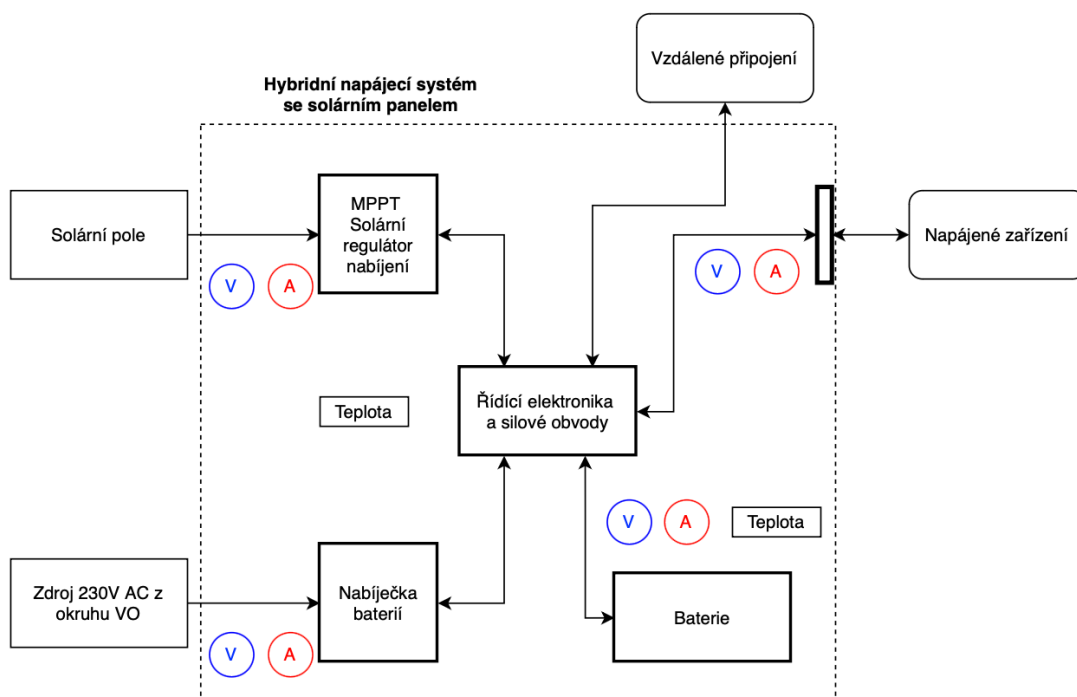
Obrázek 3.2: Ilustrační obrázek relé sady 39.11.0.012.0060 FINDER [20]

### 3.1.7 Zapojení spínacího prvku síťového napětí do nabíječky baterií

Zavedení síťového napětí přímo na společnou desku plošného spoje by bylo konstrukčně komplikované, protože by bylo nutné zajistit dodržení předepsaných izolačních vzdáleností mezi vodivými cestami. Z tohoto důvodu bylo zvoleno řešení umístění spínacího prvku mimo DPS. Do modulu vhodného pro montáž na DIN lištu, která bude umístěna v ochranné krabici celého systému. Spínání cívky relé je realizováno obdobně jako u ostatních relé v tomto systému, a to pomocí MOSFET tranzistoru spínaného signálem z MCU. Paralelně k cívce je zapojena ochranná dioda. Na DPS je připojena cívka relé přes šroubovací svorkovnici.

### 3.1.8 Měření elektrických veličin v několika klíčových bodech systému

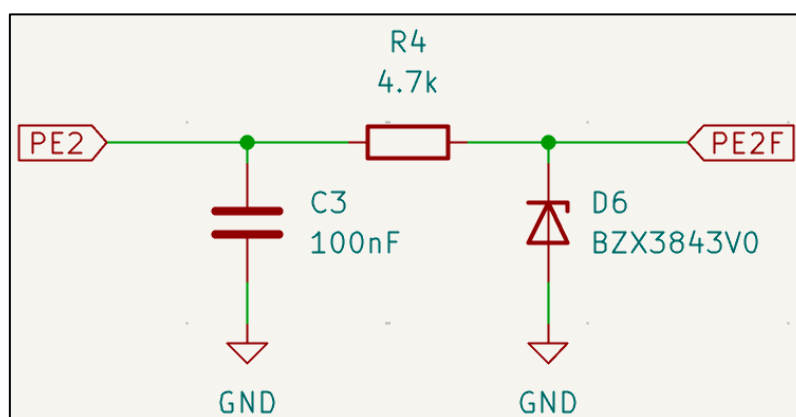
Napětí je měřeno na výstupu ze solárního pole, a to před spínacím prvkem. Toto uspořádání umožňuje detekci přítomnosti napětí na výstupu solárních panelů, a tedy ověření zda dochází k výrobě elektrické energie, což je základní podmínkou pro zahájení nabíjení akumulátoru z fotovoltaického zdroje. Ve stejné větvi je zároveň měřen i proud, což umožňuje zpětný výpočet vyrobené energie ze solárního pole. Další měření napětí a proudu je realizováno na vstupu ze sítě veřejného osvětlení VO, a to za účelem detekce přítomnosti síťového napětí a možnosti spustit nabíjení akumulátoru z tohoto zdroje. Napětí akumulátoru a proud do nebo z akumulátoru jsou rovněž monitorovány, což umožňuje průběžné vyhodnocování stavu systému včetně nabíjecího a vybíjecího režimu. Na výstupu systému je měřen proud dodávaný do napájeného zařízení, což poskytuje informace o aktuálním odběru zátěže. Dále je umožněno měření teploty akumulátoru a okolního prostředí. Jednotlivé body měření jsou znázorněny v přehledovém blokovém schématu uvedeném níže.



Obrázek 3.3: Přehledové blokové schéma se znázorněním jednotlivých bodů měření

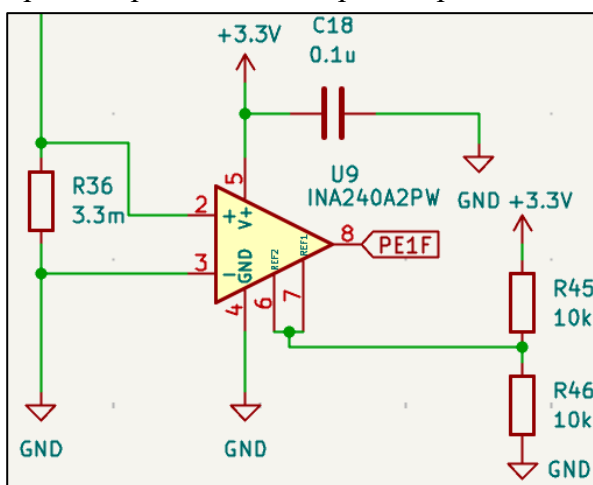
### 3.1.9 Zapojení měření elektrických veličin v několika klíčových bodech systému

Měření DC napětí je v systému realizováno pomocí odporových děličů. Ty v daném poměru snižují měřené napětí na hodnotu, která je měřitelná AD převodníkem na vstupu MCU. Připojení napětí z odporového děliče vyžaduje určitou ochranu, protože tyto piny jsou citlivé na přepětí i rušení. Ochrana je realizována více prvky, jedním z nich je Zenerova dioda s prahovým napětím 3 V, ta zajistí ochranu před vyšším napětím, než je maximální dovolené napětí na vstupu AD převodníku. Dále je zapojen sériově se signálem odpor pro omezení proudu do pinu AD převodníku. A pro vyhlazení napětí a odstranění vysokofrekvenčního šumu na vstupu AD převodníku je připojen kondenzátor mezi signálem a zemí. Takto ošetřený vstup je chráněn proti přepětí i rušení.



Obrázek 3.4: Příklad ochrany vstupu AD převodníku

Měření proudu v DC části systému je realizováno Shunt rezistorem, také označovaným jako bočník. Toto poměrně jednoduché řešení je velmi účinným způsobem pro nepřímé měření proudu. Úbytek napětí způsobený průchodem proudu přes odpor o malé hodnotě je zesílen diferenciálním zesilovačem. V této aplikaci byl použit operační zesilovač INA240A2PW, zesílený napěťový signál je přiveden na vstup AD převodníku. V MCU je proveden přepočítání napětí na hodnotu proudu pomocí Ohmova zákona.



Obrázek 3.5: Příklad měření proudu Shunt rezistorem

Pro měření AC napětí a proudu byl zvolen externí měřicí modul. Zavedení síťového napětí na společnou desku plošného spoje by bylo konstrukčně komplikované, z toho důvodu bylo využito měření externím modulem spotřeby s pevnou měřicí cívkou PZEM-004T. Tento modul komunikuje pomocí UART s MCU, kterému posílá hodnoty měřených veličin a to síťového napětí, proudu a činného výkonu. Napájení modulu je zajištěno STEP-DOWN modulem, který mění systémové napětí 24 VDC na modulem potřebných 5 VDC.

#### Měřič spotřeby PZEM-004T

Multifunkční měřicí modul pro měření síťového napětí, proudu, frekvence a činného výkonu. S komunikací po UART. [21]

Tabulka 3.3: Parametry měřicího modulu PZEM-004T [21]

Měřicí proudový rozsah	0-10 A nebo 0-100 A s měřicí cívkou
Pracovní napětí	80-260 V
Rozlišení voltmetru	0,1 V
Rozlišení měření proudu	1 mA
Rozsah měření činného výkonu	0-23 kW
Rozlišení měření činného výkonu	0,1 W
Napájecí napětí	5 VDC



Obrázek 3.6: Ilustrační obrázek měřicího modulu PZEM-004T (bez měřicí cívky) [21]

### 3.1.10 Hardwarové zapojení mikrokontroleru a jeho periférií

Vybraným mikrokontrolérem je TM4C1294NCPDT z řady Tiva C Series od společnosti Texas Instruments. Tento mikrokontrolér je dodáván v pouzdře typu Low-profile Quad Flat Package se 128 vývody (LQFP-128). Při návrhu zapojení mikrokontroléru na desku plošného spoje bylo přihlédnuto ke specifikacím a doporučením uvedeným v oficiální dokumentaci výrobce, zejména v datasheetu a hardware design guidelines. Tyto dokumenty obsahují důležité informace týkající se požadavků na napájení, resetovací obvod, hodinový signál, připojení programovacího rozhraní, blokovací kondenzátory a další konstrukční zásady, které byly při návrhu důsledně dodrženy.

Mikrokontrolér je napájen napětím 3,3 V, které je generováno stabilizátorem napětí z hlavního napájecího zdroje systému. Napájení je přivedeno na piny VDD a VDDA. Pro filtraci šumu v napájecím napětí co nejbližší ke vstupům jsou umístěny filtrovací kondenzátory, přičemž všechny odpovídající GND piny jsou připojeny na společnou zemní referenci.

K zajištění přesného hodinového signálu je použit externí oscilátor s frekvencí 25 MHz připojený k OSC0. Alternativně lze použít pouze krystal, ale použitím externího oscilátoru dosáhneme stabilního výstupu bez nutnosti dodatečného ladění.

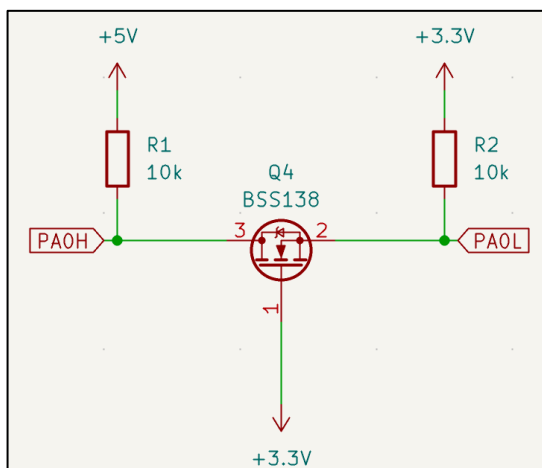
Resetovací obvod je realizován pomocí tlačítka připojeného na pin nRESET. Tento pin je zároveň přes pull-up rezistor připojen k napájecímu napětí, aby byl zajištěn správný výchozí stav.

Pro nahrávání firmwaru a ladění mikrokontroléru je využito rozhraní JTAG, jehož signály (TCK, TMS, TDI, TDO) jsou vyvedeny na standardní 10pinový konektor kompatibilní s programátorem TI ICDI nebo jiným ladicím nástrojem.

Mikrokontrolér dále komunikuje se senzory a výkonovými prvky prostřednictvím digitálních i analogových vstupů/výstupů. Například ADC vstupy jsou využity pro měření napětí a proudu, GPIO výstupy pro řízení tranzistorů a UART rozhraní pro komunikaci s externím měřicím modulem. Dalším komunikačním rozhraními jsou Ethernet a USB. Přehled využitých pinů je uveden v příloze C–Tabulka přiřazení pinů MCU.

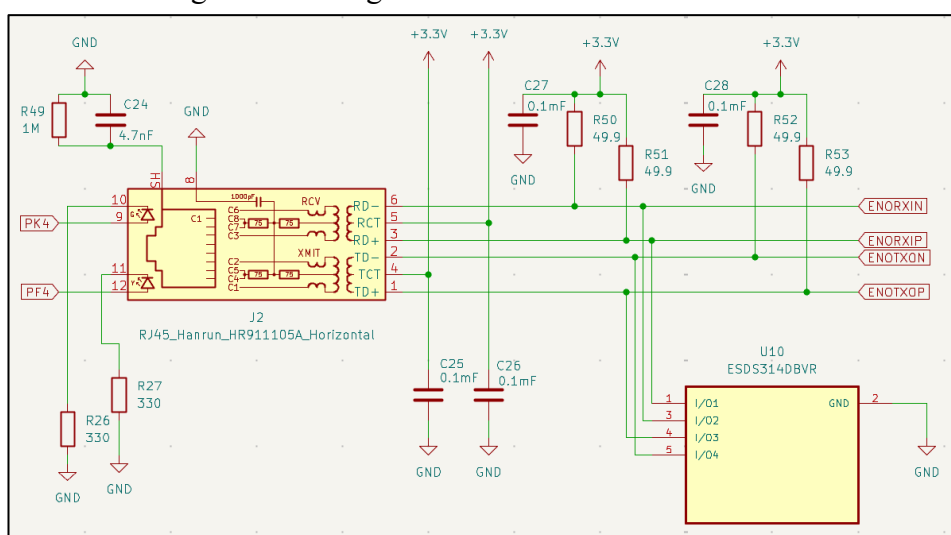
Pro sériovou komunikaci s externím měřicím modulem je v návrhu využito rozhraní UART, které je integrováno v mikrokontroléru. V dané aplikaci bylo nutné řešit rozdíl v logických úrovních mezi mikrokontrolérem a připojeným externím modulem. Mikrokontrolér pracuje s úrovní 3,3 V, zatímco externí měřicí zařízení využívá logiku na úrovni 5 V. Přímé propojení by mohlo vést k poškození vstupů mikrokontroléru. Z tohoto důvodu byl mezi obě zařízení zařazen obousměrný převodník úrovní (level shifter), který je realizován pomocí N-kanálových MOSFET tranzistorů BSS138. Tento způsob převodu je běžně využíván v případech, kdy je třeba zajistit jednoduché a levné obousměrné přizpůsobení logických úrovní na komunikační sběrnici. Zapojení využívá principu otevřeného kanálu tranzistoru, kdy je jeho gate připojena k nižšímu napětí (3,3 V) a source k zařízení s nižší úrovní (MCU). Drain je připojen k zařízení s vyšší úrovní (5 V) přes pull-up rezistor. Toto zapojení umožňuje bezpečné přenášení signálů v obou směrech bez potřeby dalších aktivních obvodů. Díky tomuto řešení je zajištěna

spolehlivá sériová komunikace mezi mikrokontrolérem a měřicím modulem bez ohledu na rozdílné napěťové úrovně jejich logiky.



Obrázek 3.7: Příklad zapojení level shifter

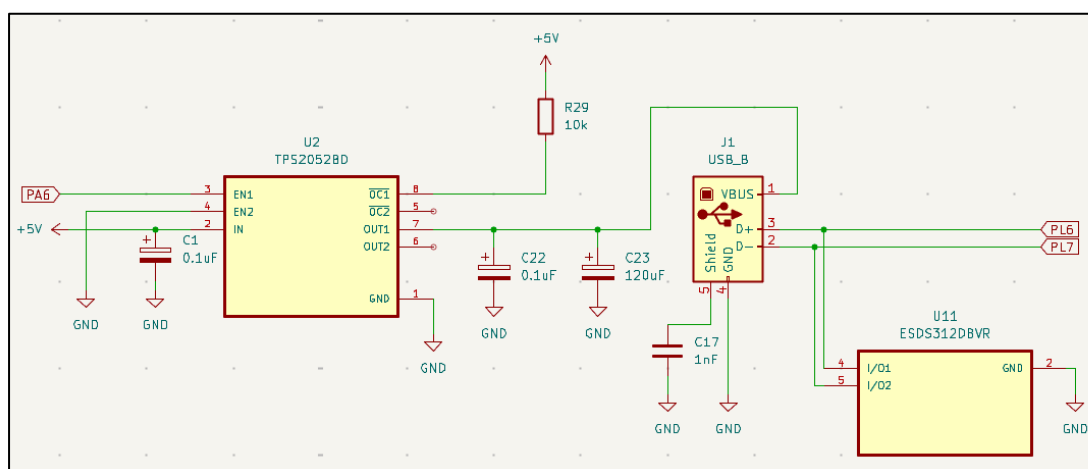
Ethernetové připojení mikrokontroléru TM4C1294NCPDT je realizováno prostřednictvím rozhraní 10/100 Mbps Ethernet MAC, které je integrováno přímo v čipu. Pro připojení k fyzické síti (tzv. PHY vrstva) je použit externí Ethernetový konektor (RJ45) s integrovaným magnetickým oddělením (magnetics). Tento konektor zajišťuje galvanické oddělení síťového vedení od vnitřních obvodů zařízení, čímž zvyšuje elektrickou bezpečnost a odolnost proti rušení. Vzhledem k požadavku na ochranu signálových vedení proti elektrostatickým výbojům a přepětovým špičkám je na diferenční linky připojen ochranný obvod ESDS314DBVR od společnosti Texas Instruments. Tento integrovaný ochranný prvek poskytuje vícenásobnou ESD a přepětovou ochranu pro vysokorychlostní diferenční signály až do  $\pm 15$  kV, aniž by negativně ovlivňoval signálovou integritu.



Obrázek 3.8: Zapojení Ethernetového rozhraní

Pro účely další možnosti komunikace je v návrhu využito rozhraní USB 2.0 typu Device (přijímací zařízení), které je integrováno v mikrokontroleru. Fyzické připojení

k hostitelskému zařízení (např. počítači) je realizováno pomocí konektoru typu USB-B, který je standardně používán pro zařízení s funkcí periferií. Konektor zajišťuje přívod datových signálů (D+ a D-). Pro zajištění ochrany datových linek vůči elektrostatickým výbojům a přepětovým špičkám je na tyto signály připojen ochranný obvod ESDS312DBVR od společnosti Texas Instruments. Tento obvod je navržen speciálně pro ochranu vysokorychlostních USB 2.0 signálů. Kromě datových linek je zajištěna i kontrola a ochrana napájecí větve VBUS. Pro tento účel je použit integrovaný proudově omezený přepínač TPS2052BD rovněž od Texas Instruments. Tento obvod umožňuje řízení toku napájení do zařízení včetně ochrany proti zkratu, nadproudu a tepelného přetížení. Díky tomuto zapojení je možné bezpečně detekovat přítomnost napájecího napětí ze sběrnice USB a podle toho řídit interní napájecí logiku systému. Tato kombinace prvků zajišťuje, že USB připojení je zabezpečeno vůči poruchám a přepětí.



Obrázek 3.9: Zapojení USB rozhraní

## 3.2 Návrh elektrického schéma DPS

Pro návrh schématu elektronického systému byl zvolen open-source nástroj KiCad, který nabízí širokou knihovnu elektronických součástek, možnost tvorby vlastních symbolů a plnou integraci s návrhem desky plošného spoje. Další výhodou je dostupnost 3D náhledu, validace návrhu pomocí elektrických pravidel (ERC) a export výrobních dat ve formátu Gerber.

Návrh schématu byl rozdělen do několika hierarchických listů, podle funkčních celků zařízení, jako jsou spínací prvky a měření, napájecí obvod, mikrokontrolér a komunikační rozhraní. Každá část byla navržena samostatně a byla propojena pomocí pojmenovaných signálů (tzv. net labels), které zajišťují přehledné a jednoznačné spojení jednotlivých bloků.

V případě, že některé specifické součástky nebyly dostupné v knihovnách KiCadu, byly vytvořeny vlastní knihovní symboly s odpovídajícími footprints. Tyto nové prvky byly následně integrovány do schématu. Kompletní elektrické schéma je uvedeno v elektronické příloze.

### 3.2.1 Návrh DPS a rozvržení součástek

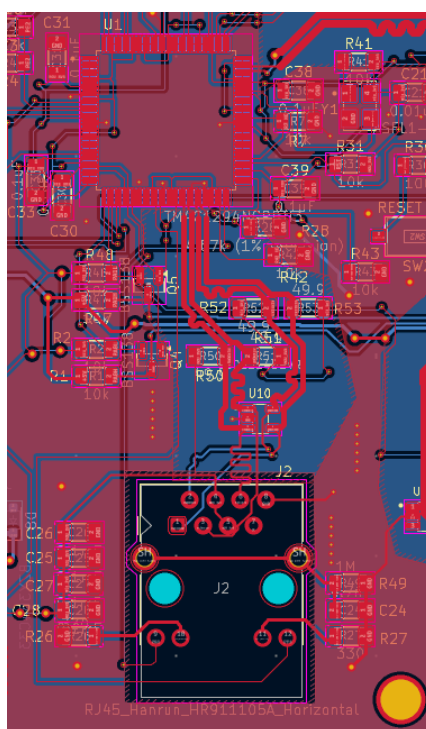
Návrh desky plošných spojů byl realizován v návrhovém prostředí KiCad. Cílem bylo vytvořit DPS řídící elektroniky, které bude optimální pro danou aplikaci s rozmístěním konektorů pro dobrou přístupnost.

Pro tento návrh byla zvolena dvouvrstvá deska s vrchní a spodní měděnou vrstvou. Na vrchní straně je umístěn čip MCU a konektory pro komunikaci s mikrokontrolerem, na spodní straně jsou pak umístěny napájecí moduly a spínací prvky. Konektory pro připojení baterie, solárních panelů a nabíječek jsou také umístěny na spodní straně. Zemní vrstva je vylitá na obou stranách pro snížení rušení.

Rozvržení součástek bylo navrženo na základě uspořádání ve schématu, kde jsou součástky ze společného funkčního bloku pohromadě. Mikrokontroler a jeho periferie byly situovány do centrální části desky proto, aby kolem něho bylo dostatek prostoru pro vedení cest a pro součástky na něj napojené.

V rámci směrování (routing) spojů byly využity rozdílné šířky vodivých cest podle různého proudového zatížení. Napájecí cesty byly navrženy se zvýšenou šířkou. Cesty vedoucí napětí 24 V mezi solárním panelem, MPPT nabíječkou, síťovou nabíječkou, baterií a napájeným zařízením jsou vedeny širokou cestou. Šířka cesty byla dimenzována na proud až 15 A a je vedena z obou stran desky pro zajištění potřebné šířky. Šířka cesty počítá s maximálním oteplením cesty o 13 °C. Cesty vedoucí signály pro Ethernetovou a USB komunikaci musejí kvůli vysokým přenosovým rychlostem těchto sběrnic být speciálně přizpůsobeny.

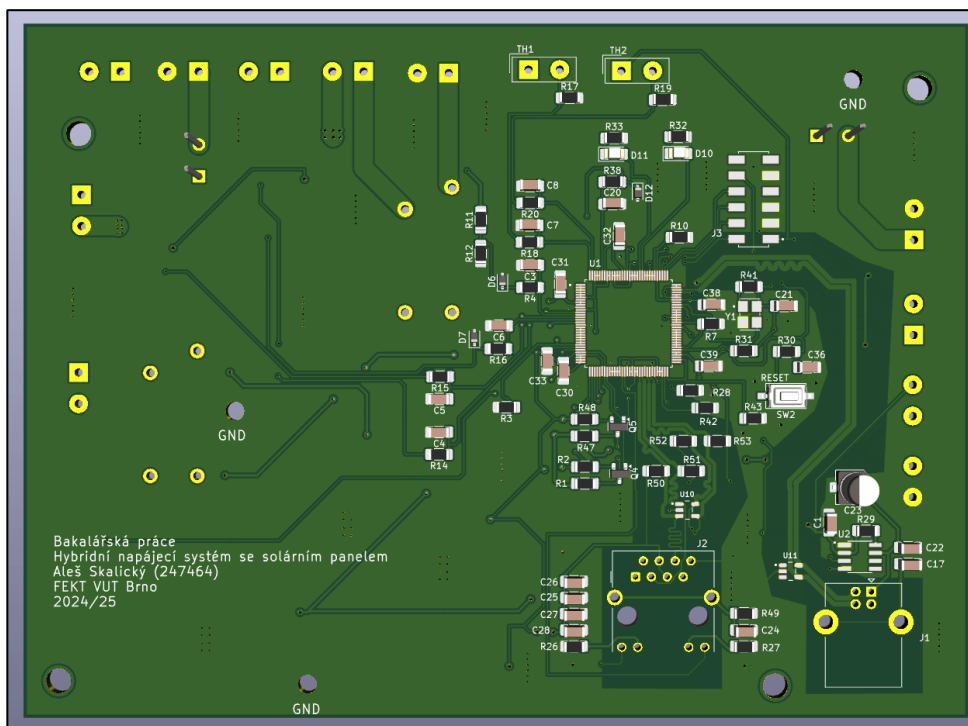
Cesty vedoucí od Ethernetového konektoru s magnetickým oddělením k příslušným pinům mikrokontroleru musejí být impedančně přizpůsobeny, aby nedocházelo k odrazům signálu na konci vedení. Tyto odrazy by mohli způsobit až nefunkčnost komunikace. Impedančního přizpůsobení se dá dosáhnout správnou šířkou cesty tzv. microstripline. Při výpočtu se zohledňuje výška a parametry dielektrika mezi vrchní vrstvou a spodní zemní vrstvou. Na desce plošného spoje je dielektrikum dáno materiálem desky. Dále je nutné dodržet mezeru mezi vodivou cestou a zemí na stejné vrstvě, a to alespoň pětinasobek šířky vypočítané cesty, pro omezení nechtěné kapacitní impedance. Délky cest jednotlivých diferenciálních párů musí být stejně dlouhé proto, aby měli stejné elektrické vlastnosti a nedocházelo ke zpoždění příchodu signálů a následné nesprávné detekce logických úrovní. Pro USB komunikaci platí stejná pravidla. Na obrázku níže je zobrazeno, jak bylo provedeno impedanční přizpůsobení pro ethernetovou komunikaci v dané aplikaci.



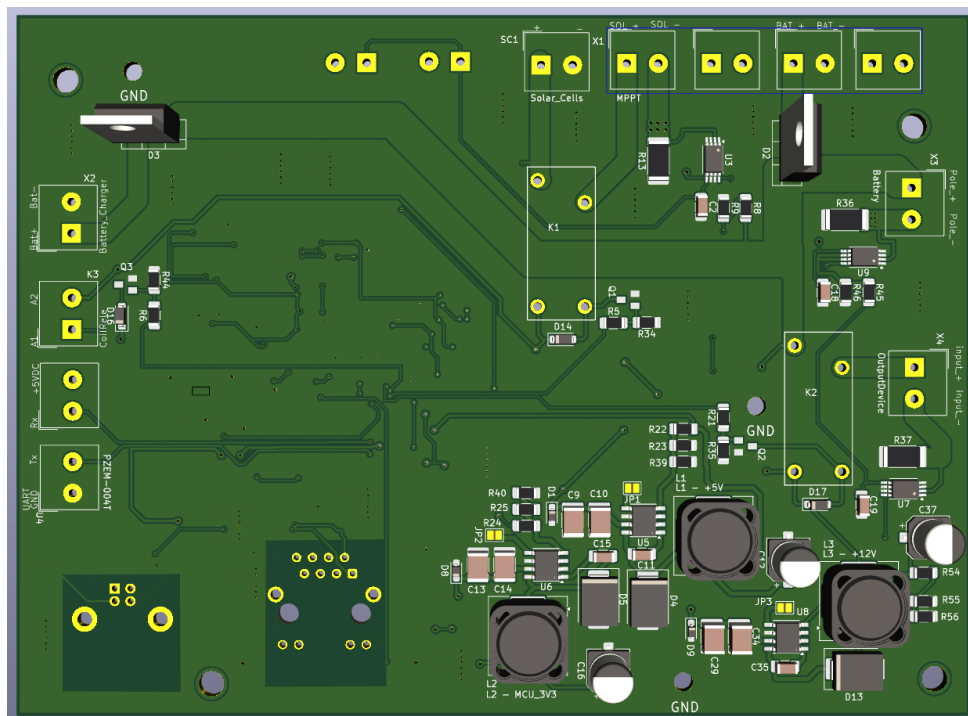
Obrázek 3.10: Obrázek zobrazující provedení impedančního přizpůsobení

### 3.2.2 Výsledná podoba DPS ve 3D pohledu

Návrhový software KiCad nabízí 3D pohled na výslednou podobu desky plošného spoje, tato možnost pohledu je přínosná při návrhu DPS. Tento pohled usnadňuje vizuální kontrolu rozmístění součástek a přispívá k optimalizaci celkového uspořádání DPS.



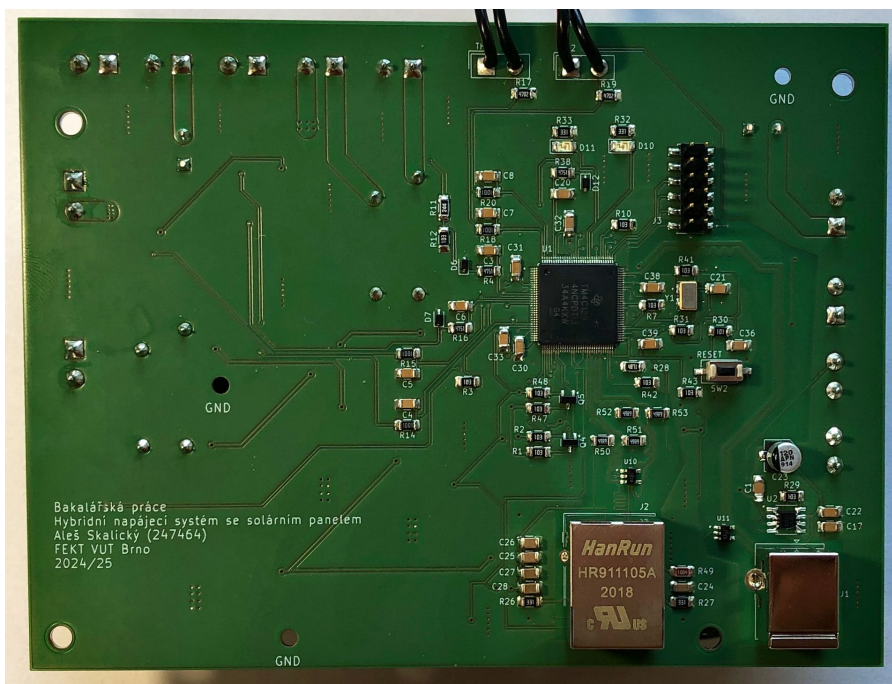
Obrázek 3.11: 3D pohled na přední stranu DPS



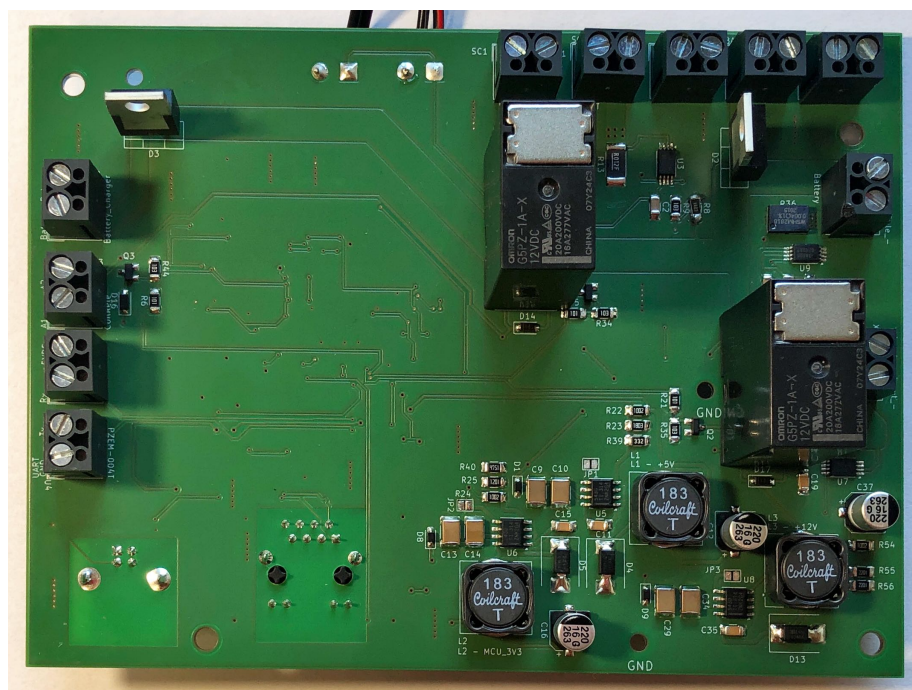
Obrázek 3.12: 3D pohled na spodní stranu DPS

### 3.2.3 Výsledná podoba DPS po osazení

Výsledná podoba DPS po kompletním osazení, v porovnání s 3D pohledem nenajdeme mnoho rozdílů.



Obrázek 3.13: Osazené DPS vrchní strana



Obrázek 3.14: Osazené DPS spodní strana

### 3.3 Měření nabíjecích a vybíjecích charakteristik

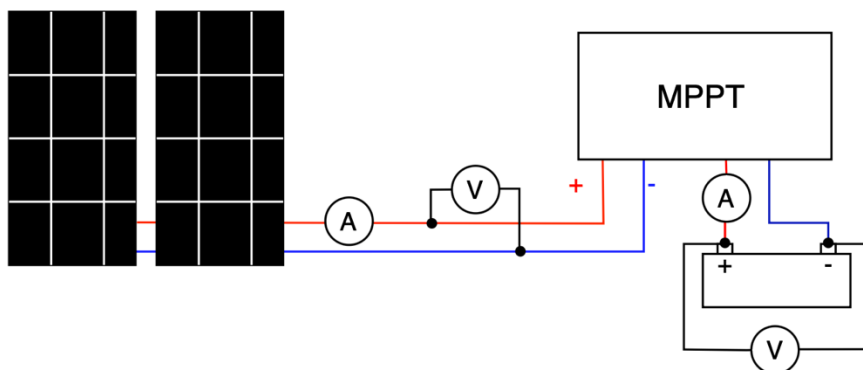
Cílem této části je experimentálně ověřit chování bateriového systému při různých způsobech nabíjení. Měření slouží ke stanovení nabíjecí charakteristiky při nabíjení baterie prostřednictvím MPPT solárního regulátoru nabíjení a porovnání s nabíjecí charakteristikou při nabíjení prostřednictvím síťové nabíječky. Vybíjecí charakteristika baterie bude provedena prostřednictvím simulace zátěže se srovnatelným odběrem jako při plánovaném využití. Při složení baterie ze sériového spojení dvou 12V LiFePO<sub>4</sub> baterií, je minimální spodní práh napětí pro ochranu baterie 23 V. A plně nabitá baterie má celkové napětí 28,33 V. Použité přístroje jsou uvedeny v tabulce níže.

Tabulka 3.4: Použité přístroje

Typ přístroje:	Název:
Multimetr (měření proudu)	FLUKE 179
Multimetr (měření proudu)	FLUKE 111
Multimetr (měření napětí)	RETLUX RDM 9001

#### 3.3.1 Měření při nabíjení ze solárních panelů

Měření bylo provedeno při připojení solárních panelů prostřednictvím MPPT solárního regulátoru nabíjení. Na výstupu regulátoru bylo zaznamenáváno napětí a proud směrem do baterie stejně jako výstupní hodnoty ze solárního pole. Měření bylo prováděno s počátečním stavem nabití baterie na 26,5 V.



Obrázek 3.15: Přehledové schéma měření při nabíjení ze solárních panelů

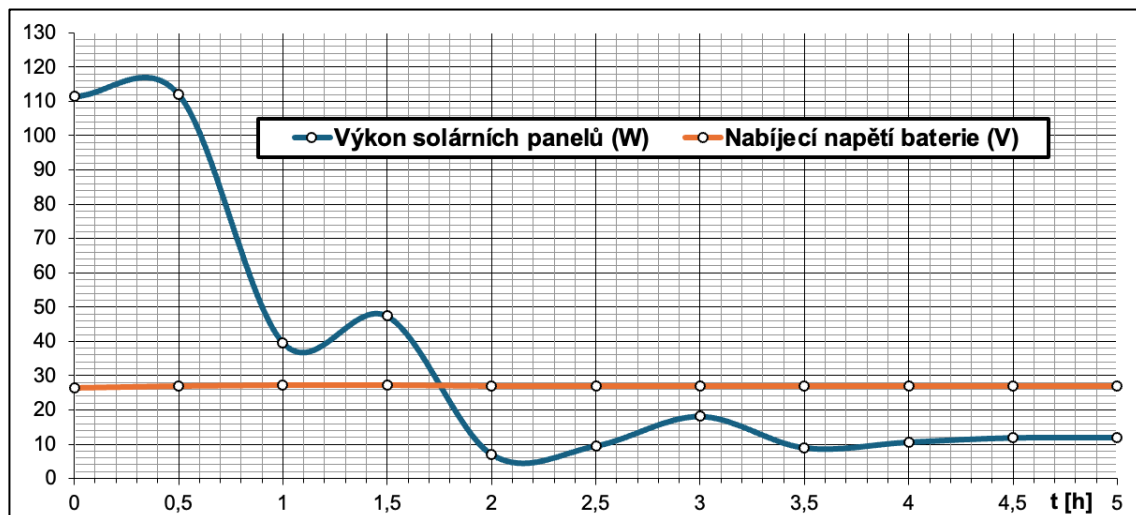
#### Postup měření

Po zapojení měřicí soustavy bylo zahájeno měření. Měření probíhalo za proměnlivých povětrnostních podmínek s převahou oblačnosti, typických pro květnové dny. Nejvhodnější sluneční podmínky byly zaznamenány během první hodiny měření, kdy bylo možné efektivně odebírat energii ze solárních panelů. Následný výskyt oblačnosti výrazně snížil intenzitu dopadajícího slunečního záření, tím došlo k výraznému poklesu výroby energie ze solárního pole. Odečítání měřených hodnot probíhalo každých 30

minut.

### Výsledky měření

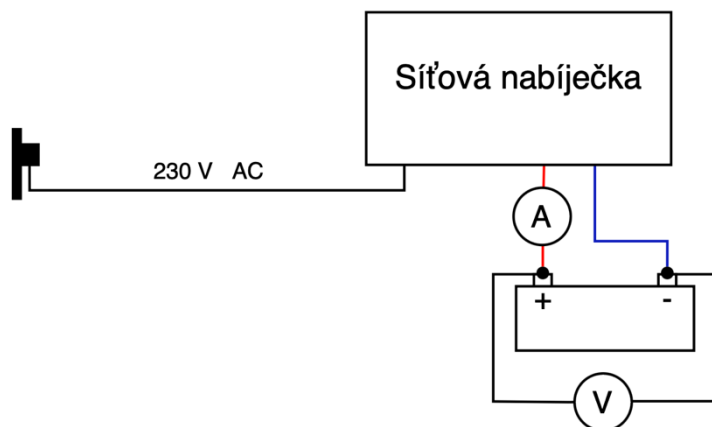
Na výsledném grafu je dobře patrné, jaký má vliv má intenzita osvětlení panelů na jejich výkon. V první hodině je nabíjecí výkon pohyboval okolo 100 W a konečný po příchodu oblačnosti byl přibližně desetinový.



Graf 3.1: Výkon solárního pole a nabíjecí napětí baterie

### 3.3.2 Měření při nabíjení ze sítě

Druhé měření bylo zaměřeno na stanovení nabíjecích charakteristik při nabíjení prostřednictvím síťové nabíječky. Bylo zaznamenáno napětí a proud směrem do baterie. Měření bylo prováděno s počátečním stavem nabití baterie na 25,8 V do plného nabití.



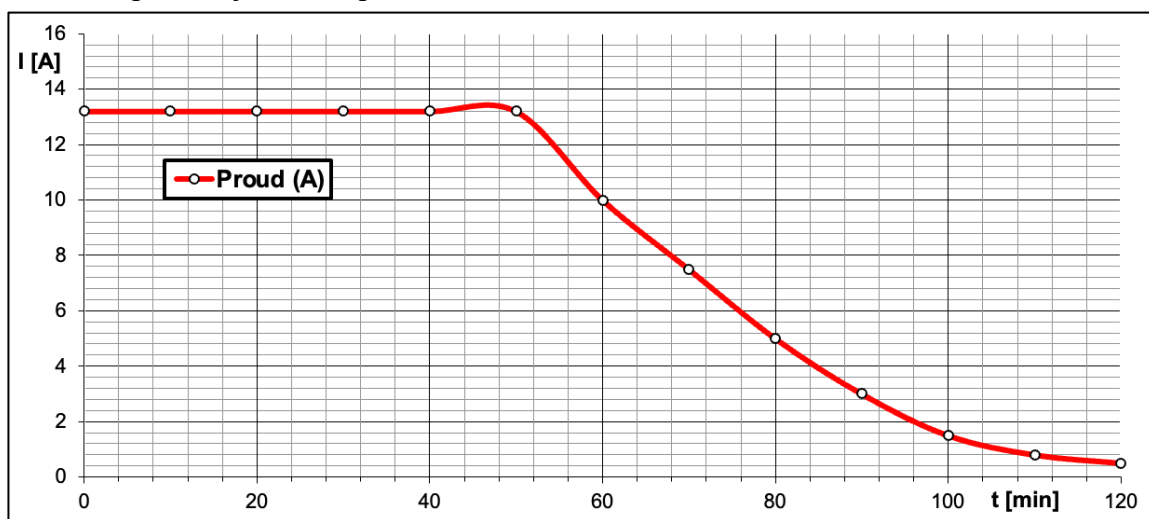
Obrázek 3.16: Přehledové schéma měření při nabíjení ze sítě

## Postup měření

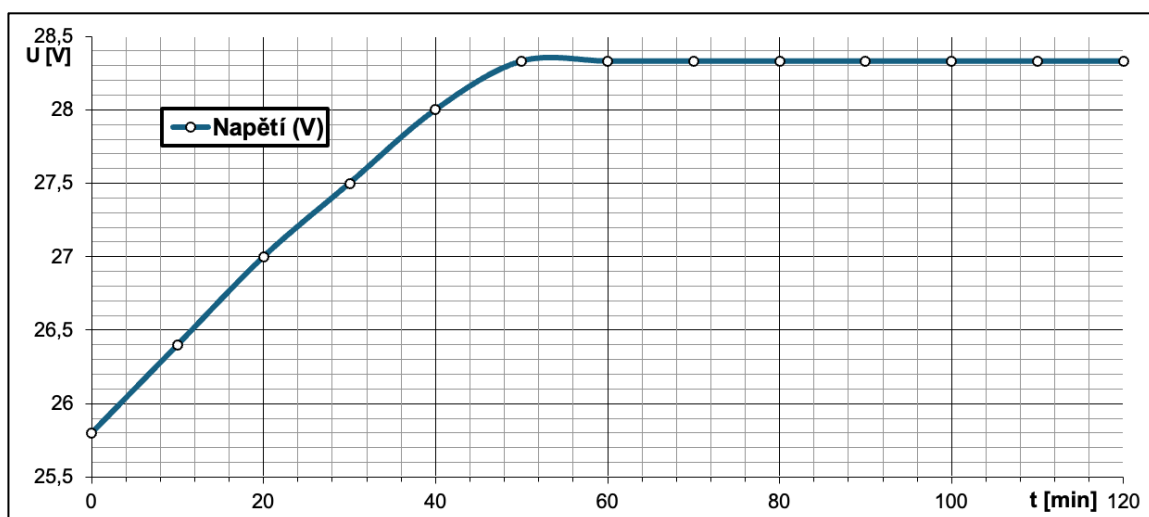
Po zapojení měřicí soustavy bylo zahájeno samotné nabíjení. V intervalu 10 minut bylo odečítáno napětí a proud, až do plného nabití baterie. Naměřené hodnoty byly zapsány do grafů.

## Výsledky měření

Z průběhů napětí a proudu při nabíjení je patrná dvoufázová nabíjecí charakteristika. V první fázi je baterie nabíjena konstantním proudem, přičemž napětí postupně narůstá. Změřený konstantní proud byl 13,2 A. Tato fáze obvykle představuje přibližně 50–60 % celkové doby nabíjení. Po dosažení cílového napětí přechází proces do druhé fáze, ve které je napětí udržováno na konstantní úrovni, zatímco nabíjecí proud postupně klesá. Tato fáze pokračuje až do úplného nabití baterie.



Graf 3.2: Nabíjecí charakteristika při nabíjení ze sítě (proud)



Graf 3.3: Nabíjecí charakteristika při nabíjení ze sítě (napětí)

### 3.3.3 Měření při vybíjení baterie

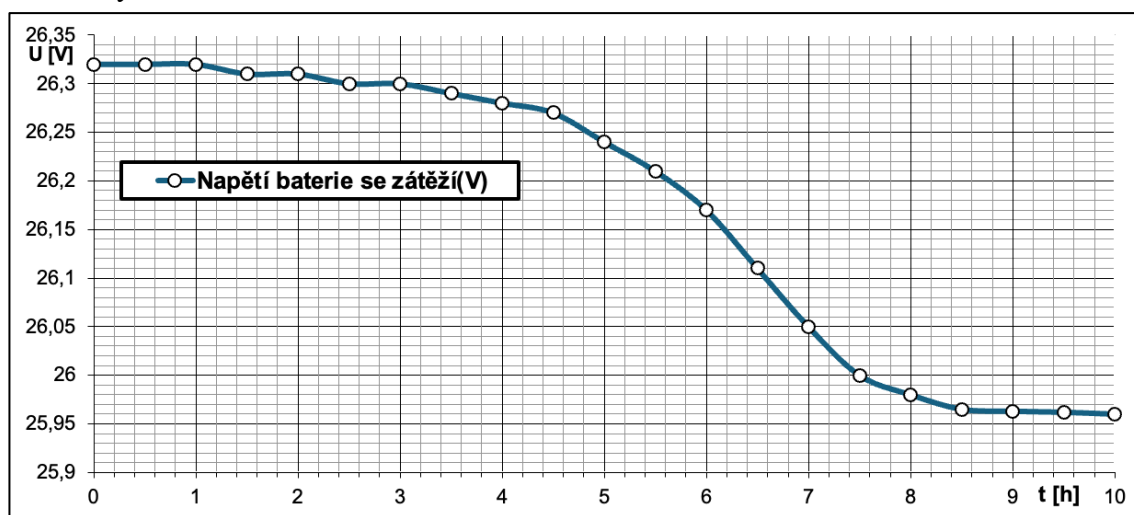
Pro účely simulace zatížení baterie byla použita odporová zátěž o stejném výkonu jako je typická zátěž systému tedy 25 W. Pomocí této zátěže byla stanovena vybíjecí charakteristika baterie. Během vybíjení byly zaznamenávány hodnoty napětí a proudu, ze kterých byla následně vypočtena odebraná energie. Měření bylo ukončeno po deseti hodinách měření.

#### Postup měření

Po zapojení měřicí soustavy byla připojena zátěž. Odečítání měřených hodnot probíhalo každých 30 minut.

#### Výsledky měření

Z průběhu vybíjecí křivky je patrné, že při konstantní zátěži dochází zpočátku k pomalému poklesu napětí baterie. V průběhu vybíjení se však pokles napětí postupně zrychluje. Celková odebraná energie při tomto měření byla přibližně 270,7 Wh, což představuje přibližně 56,3 % nominální kapacity testované baterie. Konečné napětí baterie bylo 25,96 V.



Graf 3.4: Vybíjecí charakteristika při konstantní zátěži

### 3.3.4 Vyhodnocení výsledků měření

Měření ukázalo výrazný rozdíl mezi nabíjením baterie ze solárního pole a ze síťové nabíječky. Zatímco výkon solárního systému byl silně závislý na intenzitě slunečního záření a za zhoršených podmínek výrazně klesal, síťové nabíjení probíhalo stabilně. Z tohoto důvodu systém kombinuje tyto dva zdroje energie.

Dodané komponenty odpovídají svými změřenými charakteristikami katalogovým hodnotám. Charakteristika nabíjení síťové nabíječky, měla stejný průběh jako udávaný v katalogu. Měření ověřilo vhodnou kombinaci vybraných komponent, během testování nebyly na žádném z komponent zaznamenány provozní hodnoty překračující jejich jmenovitá nebo mezní technická specifika.

## 3.4 Osazení DPS a ověření funkčnosti

Po dokončení návrhu desky plošného spoje a jeho výrobě byla deska osazena. Cílem bylo vytvořit funkční prototyp řídicí elektroniky. Po osazení byl proveden základní test funkčnosti klíčových obvodů, zejména napájení a mikrokontroleru.

### 3.4.1 Postup při osazování DPS

Deska byla osazována ručně. V první fázi byl osazen samotný mikrokontroler, poté byly osazeny součástky typu SMD, pro osazení byla použita pájecí pasta. Pájení probíhalo i pomocí horkovzdušné pájecí stanice. Po osazení SMD součástek následovalo osazení a zapájení THT komponent jako jsou konektory a relé.

### 3.4.2 Beznapěťový test funkčnosti DPS

Před připojením napájení byla provedena vizuální kontrola spojů a polarit součástek s danou polaritou. Multimetrem byla ověřena nepřítomnost zkratu mezi napájecími větvemi a správné propojení zemní a napájecí sítě podle schématu.

### 3.4.3 Napěťový test funkčnosti DPS a inicializace mikrokontroleru

Napájecí napětí bylo na desku přivedeno přes laboratorní zdroj s nastaveným proudovým omezením pro minimalizaci rizika poškození v případě chyby. Po ověření správného napájení byl připojen JTAG programátor, přes který byl mikrokontroler inicializován a nahrán základní testovací firmware.

## 3.5 Naprogramování mikrokontroleru – základní testovací firmware

Pro ověření správného připojení mikrokontroleru a funkčnosti vývojového prostředí byl použit jednoduchý testovací firmware, jehož úkolem je periodicky rozsvěcet a zhasínat LED diodu připojenou k jednomu z digitálních výstupů. Tento test zároveň ověřuje, že mikrokontroler je správně napájen, inicializován a že funguje základní konfigurace hodinového systému a GPIO portů.

Programování bylo realizováno pomocí vývojového prostředí Code Composer Studio od Texas Instruments. Pro přístup k periferním registrům a zjednodušení vývoje byl použit modelový příklad od Texas Instruments. Pro nahrání firmware a ladění byl využit programátor XDS110.

Jak je implementována daná funkce. V programu je nejprve povolen hodinový signál pro port PN1, na který je dioda připojena. Následně je pin nastaven na digitální výstup. V hlavní smyčce programu je pak výstupní pin střídavě přepínán do stavu logické jedničky a nuly s časovým zpožděním, čímž vzniká efekt blikání LED diody.

Po nahrání programu a spuštění mikrokontroleru byla LED dioda úspěšně rozblikána s periodou přibližně jedné sekundy. Tento výsledek potvrzuje, že mikrokontroler je funkční, GPIO port je správně nakonfigurován a celý řetězec programování a připojení pracuje bezchybně.

## 4. ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout a realizovat řídicí elektroniku pro hybridní napájecí systém kombinující různé zdroje energie. Dalším cílem bylo navrhnout vhodnou sestavu dílčích komponentů podle požadavků na konkrétní hybridní napájecí systém.

V první části se práce zabývá teoretickým popisem jednotlivých komponentů hybridního napájecího systému, solárními panely, bateriemi, solárními regulátory nabíjení, nabíječkami baterií a řídicí elektronikou v podobě MCU. V druhé části se práce zabývá výběrem vhodných komponentů podle požadavků na konkrétní hybridní napájecí systém.

Ve třetí části se práce zabývá vlastní realizací a návrhem elektrického zapojení řídicí elektroniky. Návrhem elektrického schématu pro desku plošného spoje s implementací řídicího MCU. A následným návrhem fyzické podoby desky plošného spoje. Měřeními dílčí části systému, která zprostředkovává nabíjení baterie, a to v rozsahu stanovení základních nabíjecích charakteristik v režimu nabíjení ze solárního panelu i ze sítě. Provedením měření vybíjecích charakteristik při zapojené zátěži. Postupem při osazování desky plošného spoje a testem funkčnosti mikrokontroleru. Realizované části odpovídají všem požadavkům stanoveným zadáním.

Navržená sestava solárního panelu, síťové nabíječky, MPPT solárního regulátoru nabíjení a baterie na základě testů plní funkci hybridního napájecího systému. Pro zvolenou konfiguraci komponent solární panel o výkonu 100 Wp, baterii s kapacitou 20 Ah a zátěží 25 W je systém schopný plně dobít baterii z okruhu VO přibližně za 2 hodiny. Při optimálních podmínkách osvětlení trvá nabití baterie ze solární energie přibližně 5 hodin. Při provozu čistě z baterie dokáže napájet zvolenou zátěž po dobu 16 hodin. Uvedené parametry se mohou měnit v závislosti na konkrétní volbě použitých solárních panelů, akumulátoru a nabíječek. Tyto komponenty je nutné dimenzovat s ohledem na požadavky na systém, zejména na výkonovou náročnost připojené zátěže a požadovanou dobu provozu v jednotlivých režimech.

V rámci dalšího rozvoje systému je možné implementovat pokročilý řídicí software s rozšířenými funkcemi, který by umožnil efektivnější správu a monitorování celého zařízení. Mezi plánované funkcionality může patřit například vzdálený dohled nad provozními parametry, záznam a vizualizace historických dat, notifikace v případě poruch nebo překročení mezních hodnot, či optimalizace provozu na základě prediktivních algoritmů. Hardware systému je již připraven na rozšíření o pokročilé řídicí a monitorovací funkce. Disponuje dostatečným výpočetním výkonem i potřebnými komunikačními rozhraními.

## LITERATURA

- [1] MPPT Solar Charge Controllers Explained. CleanEnergyReviews [online]. 12 ŘÍJEN, 2022 [cit. 2024-11-29]. Dostupné z: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/mppt-solar-charge-controllers>
- [2] *FAQ informace o bateriích*. Online. In: BCH-Battery. C2042. Dostupné z: [https://www.bch-battery.cz/BATERIE-INFORMACE-a11\\_0.htm](https://www.bch-battery.cz/BATERIE-INFORMACE-a11_0.htm). [cit. 2024-12-25].
- [3] *LiFePO4 vs. Li-ion VS. Kompletní průvodce Li-Po bateriemi*. Online. In: Keheng Battery. C2024. Dostupné z: <https://www.lithiumbatterytech.com/cs/lifepo4-vs-li-ion-vs-li-po-battery-complete-guide/>. [cit. 2024-12-23].
- [4] *Nabíječky - princip funkce a rozdělení*. Online. In: O energetice. C2024. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/nabijecky-princip-funkce-a-rozdeleni>. [cit. 2024-12-25].
- [5] *HYBRIDNÍ SOLÁRNÍ INVERTOR 3000VA 2400W, ČISTÁ SINUSOVÁ VLNA*. Online. BShopy.cz. C2024. Dostupné z: [https://www.bshopy.cz/spd/X001O0SBMH/Hybridni-solarni-invertor-3000VA-2400W-cista-sinus?gad\\_source=1&gbraid=0AAAAApDWYbh07p6t3Y5IVReGRo\\_wXXwqA&gclid=Cj0KCQiAsaS7BhDPARIsAAX5cSCyz-ITGs7PKnfFDCmI7EYUChJMNYmTFI-s5HtOTULHp2VBxqA\\_QRoAn33EALw\\_wcB](https://www.bshopy.cz/spd/X001O0SBMH/Hybridni-solarni-invertor-3000VA-2400W-cista-sinus?gad_source=1&gbraid=0AAAAApDWYbh07p6t3Y5IVReGRo_wXXwqA&gclid=Cj0KCQiAsaS7BhDPARIsAAX5cSCyz-ITGs7PKnfFDCmI7EYUChJMNYmTFI-s5HtOTULHp2VBxqA_QRoAn33EALw_wcB). [cit. 2024-12-23].
- [6] *EasySolar-II GX*. Online. In: VictronEnergy. C2024. Dostupné z: <https://www.victronenergy.cz/inverter-charger-mppt/easysolar-ii-gx>. [cit. 2024-12-23].
- [7] *SmartSolar MPPT 75/10*. Online. In: Victronenergy.cz. C2024. Dostupné z: <https://www.victronenergy.cz/solar-charge-controllers/smartsolar-mppt-75-10-75-15-100-15-100-20>. [cit. 2024-12-25].
- [8] *XTRA Series(10~40A) MPPT Charge Controller*. Online. In: Epever.com. C2024. Dostupné z: [https://www.epever.com/product/xtra-10-40a-mppt-solar-charge-controller/?\\_gl=1\\*175pnco\\*\\_up\\*MQ..\\*\\_gs\\*MQ..&gclid=Cj0KCQiA9667BhDoARIsANnamQbNPNmXTrxw89YJw5gaKtHKSkbGYySAaw0wcjuoZ6JTmPK6AZUwBLAaAikMEALw\\_wcB&gbraid=0AAAAAojSyJmUhr0MekxJboj41752kQvj](https://www.epever.com/product/xtra-10-40a-mppt-solar-charge-controller/?_gl=1*175pnco*_up*MQ..*_gs*MQ..&gclid=Cj0KCQiA9667BhDoARIsANnamQbNPNmXTrxw89YJw5gaKtHKSkbGYySAaw0wcjuoZ6JTmPK6AZUwBLAaAikMEALw_wcB&gbraid=0AAAAAojSyJmUhr0MekxJboj41752kQvj). [cit. 2024-12-25].
- [9] *Carspa MPPT 20A 12/24V*. Online. In: Carspa.cz. C2024. Dostupné z: <https://www.carspa.cc/mppt-mppt-series-12v24v-10a-80a/mppt1224-20-20a-12-24v-auto-mppt-solar-charge-controller>. [cit. 2024-12-26].
- [10] *Mean Well NPB-450-24 Nabíječka*. Online. In: Czech-Meanwell.cz. C2024. Dostupné z: <https://www.czech-meanwell.cz/npb-450-24-mean-well>

- [nabijecka?srsId=AfmBOopBrnootvwljY5nleGoTNNlw3nXAKHjc36CMLjHGkfhbrN-zT2](#). [cit. 2024-12-25].
- [11] *Blue Smart IP22 Charger*. Online. In: Victronenergy.cz. C2024. Dostupné z: <https://www.victronenergy.cz/chargers/blue-smart-ip22-charger>. [cit. 2024-12-25].
- [12] *GOOWEI ENERGY baterie CNLFP100-25.6*. Online. In: Battery.cz. C2024. Dostupné z: <https://www.battery.cz/goowei-energy-trakcni-baterie--lifepo4--cnlfp100-25-6--100ah--25-6v/>. [cit. 2024-12-25].
- [13] *ELERIX EX-24VL100AH-SET*. Online. In: I4wifi.cz. C2025. Dostupné z: [https://www.i4wifi.cz/cs/299612-elerix-24v-100ah-2-4kwh-lifepo4-sada-s-clanky-ex-1100?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.i4wifi.cz/cs/299612-elerix-24v-100ah-2-4kwh-lifepo4-sada-s-clanky-ex-1100?utm_source=chatgpt.com). [cit. 2025-01-02].
- [14] *STM32L496xx: Datasheet - production data. Online PDF*. C2024. C2024. Dostupné také z: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32l496rg.html>.
- [15] *TM4C1294NCPDT*. Online. In: Ti.com. C2024. Dostupné z: [https://www.ti.com/product/TM4C1294NCPDT?utm\\_source=google&utm\\_medium=cpc&utm\\_campaign=epd-null-null-GPN\\_EN-cpc-pf-google-wwe&utm\\_content=TM4C1294NCPDT&ds\\_k=%7B\\_dssearchterm%7D&DCM=yes&gad\\_source=1&gclid=aw.ds#params](https://www.ti.com/product/TM4C1294NCPDT?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=epd-null-null-GPN_EN-cpc-pf-google-wwe&utm_content=TM4C1294NCPDT&ds_k=%7B_dssearchterm%7D&DCM=yes&gad_source=1&gclid=aw.ds#params). [cit. 2024-12-25].
- [16] *100W Poly*. Online. In: BTgreen.cz. C2024. Dostupné z: <https://www.btgreen.cz/solarni-fotovoltaiicke-panely/1019-solarni-panel-100w-2-pin-velky.html>. [cit. 2024-12-26].
- [17] *Solární panely BlueSolar*. Online. In: Victronenergy.cz. C2024. Dostupné z: <https://www.victronenergy.cz/solar-pv-panels/bluesolar-panels>. [cit. 2024-12-26].
- [18] *SolarPro Mono 60W-12V*. Online. In: Mivvyenergy.cz. C2025. Dostupné z: [https://www.mivvyenergy.cz/cs/fotovoltaika/fotovoltaiicke-panely/fotovoltaiicky-panel-60wp-solarpro-mono-12v.html?gad\\_source=1&gbraid=0AAAAAoJyE5AGgWLNWU8C5aCpdaOfVvEHI&gclid=CjwKCAiAzvC9BhADEiwAEhtlN3Q5uMLmJDjiXWcRndlYdJwxOMuxIJjBh4rSRoJVjxY9kEG30jrUEhoCWMsQAvD\\_BwE](https://www.mivvyenergy.cz/cs/fotovoltaika/fotovoltaiicke-panely/fotovoltaiicky-panel-60wp-solarpro-mono-12v.html?gad_source=1&gbraid=0AAAAAoJyE5AGgWLNWU8C5aCpdaOfVvEHI&gclid=CjwKCAiAzvC9BhADEiwAEhtlN3Q5uMLmJDjiXWcRndlYdJwxOMuxIJjBh4rSRoJVjxY9kEG30jrUEhoCWMsQAvD_BwE). [cit. 2025-05-17].
- [19] *Relé G5PZ-1A-X DC12 Omron*. Online. In: Mouser.com. C2025. Dostupné z: [https://cz.mouser.com/ProductDetail/Omron-Electronics/G5PZ-1A-X-DC12?qs=TCDPyi3sCW3larIfSel9iA%3D%3D&srsId=AfmBOop3\\_z7ZtCZ6Ky98JN2uVOhwCZYxXmZJppwim2a3e-VynttSB6li](https://cz.mouser.com/ProductDetail/Omron-Electronics/G5PZ-1A-X-DC12?qs=TCDPyi3sCW3larIfSel9iA%3D%3D&srsId=AfmBOop3_z7ZtCZ6Ky98JN2uVOhwCZYxXmZJppwim2a3e-VynttSB6li). [cit. 2025-05-17].
- [20] *Relé sada 39.11.0.012.0060 FINDER*. Online. In: TME.eu. C2025. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/details/39.11.0.012.0060/elektromagneticka-rele-sady/finder/>. [cit. 2025-05-17].

- [21] *Měřič spotřeby PZEM-004T*. Online. In: Hadex.cz. C2025. Dostupné z: [https://www.hadex.cz/m570-meric-spotreby-pzem-004t-80-260vac-100a-pevna-merici-civka/?utm\\_source=google&utm\\_medium=cpc&utm\\_campaign=17937749015&gad\\_source=1&gad\\_campaignid=17347780553&gclid=EAiaIQobChMI9s-m9usjQMVeKODbx3LxDhpEAQYAiABEgJi4PD\\_BwE](https://www.hadex.cz/m570-meric-spotreby-pzem-004t-80-260vac-100a-pevna-merici-civka/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=17937749015&gad_source=1&gad_campaignid=17347780553&gclid=EAiaIQobChMI9s-m9usjQMVeKODbx3LxDhpEAQYAiABEgJi4PD_BwE). [cit. 2025-05-18].

# SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

## Zkratky:

24/7	dvacet čtyři hodin denně, sedm dní v týdnu
STC	standartní testovací podmínky pro testování solárních panelů
$V_{mp}$	maximální výkonové napětí solárního panelu
$V_{oc}$	napětí solárního panelu na prázdko
$W_p$	maximální výkon solárního panelu
$LiFePO_4$	lithium-železo-fosfátový akumulátor
Ah	Ampérhodina
Wh	Watt-hodina
PWM	Pulzně šířková modulace
MPPT	Hledání bodu maximálního výkonu
MCU	mikrokontroler
ARM	Pokročilá RISC architektura
AVR	8bitové mikrořadiče od firmy Atmel
PIC	Programovatelný integrovaný obvod pro řízení
RAM	Paměť s náhodným přístupem
Flash	Nevolatilní paměť pro uchovávání dat
IoT	Internet věcí
ADC	Analogově-digitální převodník
DAC	Digitálně-analogový převodník
UART	Univerzální asynchronní přijímač a vysílač
SPI	Sériová periferní sběrnice
I2C	Sériová sběrnice
GPIO	Univerzální vstupy/výstupy
AC	Střídavý elektrický proud
DC	Stejnoseměrný elektrický proud
RS232	Standart pro sériovou komunikaci
BMS	Systém správy baterií
VO	Veřejné osvětlení
DPS	Deska plošného spoje

## Symboly:

$U$	napětí	(V)
$I$	proud	(A)
$P$	výkon	(W)
$t$	teplota	(°C)
$f$	frekvence	(Hz)

## SEZNAM ELEKTRONICKÝCH PŘÍLOH

- Příloha A**–Schéma zapojení řídicí elektroniky.....přiložené paměťové médium
- Příloha B**–Kompletní projekt z návrhového programu KiCad.....přiložené paměťové médium
- Příloha C**–Tabulka přiřazení pinů MCU.....přiložené paměťové médium
- Příloha D**–Seznam součástek BOM.....přiložené paměťové médium