

**Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Přírodovědecká fakulta**

Problematika řešení ostrovního napájecího systému

Bakalářská práce

Karel Macek

školitel: Ing. Michal Šerý, Ph.D.

České Budějovice 2017

Bibliografické údaje

Macek K., 2017: Problematika řešení ostrovního napájecího systému [Approaches to solutions of grid-off photovoltaic system. Bc. Thesis, in Czech.] – 42 p., Faculty of Science, The University of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic.

Abstrakt

V této práci je podán přehled problematiky ostrovních fotovoltaických systémů. Praktická část se zabývá řešením mobilního ostrovního systému pro napájení vědeckých přístrojů v terénu s důrazem na jeho snadný transport. Klíčová slova: ostrovní systém, fotovoltaický článěk, nabíjecí regulátor, lithium-iontový akumulátor.

Abstract

This thesis presents a description of grid-off photovoltaic systems. The practical part is dedicated to the construction of the mobile grid-off system, powering scientific machines in the field, where the ability to be easily transported is of high importance. Keywords: grid-off system, photovoltaic cell, solar charge controller, lithium-ion battery.

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejich internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznamu o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích dne 13.12.2017

.....

Karel Macek

Poděkování

Rád bych poděkoval zejména mému školiteli Ing. Michalu Šerému, Ph.D. za jeho cenné rady a celkové směřování.

1	Úvod	1
2	Teorie.....	1
2.1	Sluneční záření.....	1
2.2	Polovodiče	4
2.3	Polovodičový přechod	7
2.4	Fotoelektrický jev	8
2.5	Fotovoltaický článek.....	9
2.6	Druhy fotovoltaických článků.....	10
2.7	Zvyšování účinnosti fotovoltaických článků	14
2.8	Elektrické vlastnosti fotovoltaických článků	15
2.9	Teplotní závislost fotovoltaických článků	16
2.10	Modelování fotovoltaických článků.....	17
2.11	Druhy fotovoltaických systémů a jejich části	17
2.12	Navrhování ostrovních systémů	25
2.13	Software pro návrh fotovoltaických systémů.....	28
3	Výsledky.....	29
3.1	Návrh systému	29
3.2	Výběr komponentů	30
3.3	Realizace systému.....	33
3.4	Měření výkonu systému.....	35
3.5	Provoz a obsluha systému.....	38
4	Závěr.....	40
5	Reference.....	40

1 Úvod

Fotovoltaika získala v České republice špatnou pověst díky nepromyšlenému postupu vlády při podpoře obnovitelných zdrojů. Státní kroky k zamezení zneužívání podpory ke kriminální činnosti vedly k tomu, že se rozvoj v této oblasti prakticky zastavil. V současné době nově rozběhnutá státní podpora, zejména pro malé zdroje, způsobuje opět zvýšený zájem veřejnosti o fotovoltaické systémy. V důsledku poklesu cen komponentů začíná být elektřina, vyrobená těmito systémy, konkurenceschopná i bez dotací.

Výběr tématu práce byl ovlivněn dlouhodobým zájmem o tuto problematiku, možností prohloubení znalostí a snahou o získání praktických zkušeností. Cílem práce byl návrh a výroba mobilního fotovoltaického systému pro napájení vědeckých přístrojů v terénu, s důrazem na možnost snadného transportu.

2 Teorie

2.1 Sluneční záření

Sluneční záření je základem veškerého života na Zemi. Při využívání fotovoltaiky je potřebné znát charakteristiky a dostupnost tohoto záření. V jádru Slunce probíhá jaderná fúze, při které vzniká ze čtyř jader atomu vodíku jedno jádro atomu hélia. Během reakce se uvolňuje teplota okolo $15 \cdot 10^6$ K. Toto teplo se postupně dostává k povrchu Slunce, jehož teplota je 5778 K a odtud je vyzařováno do okolního vesmíru ve formě elektromagnetického záření. Celkový výkon slunce je asi $3,845 \cdot 10^{26}$ W. Pro výpočet, jak velká část tohoto množství je k dispozici na Zemi, použijeme představu koule o poloměru vzdálenosti Země – Slunce, na jejímž povrchu je záření rovnoměrně rozprostřeno. [1]

$$E_S = \frac{P_S}{4 \cdot \pi \cdot r_{SZ}^2} = \frac{3,845 \cdot 10^{26}}{4 \cdot \pi \cdot (1,496 \cdot 10^{11})^2} = 1367 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \quad (2.1)$$

Kde:

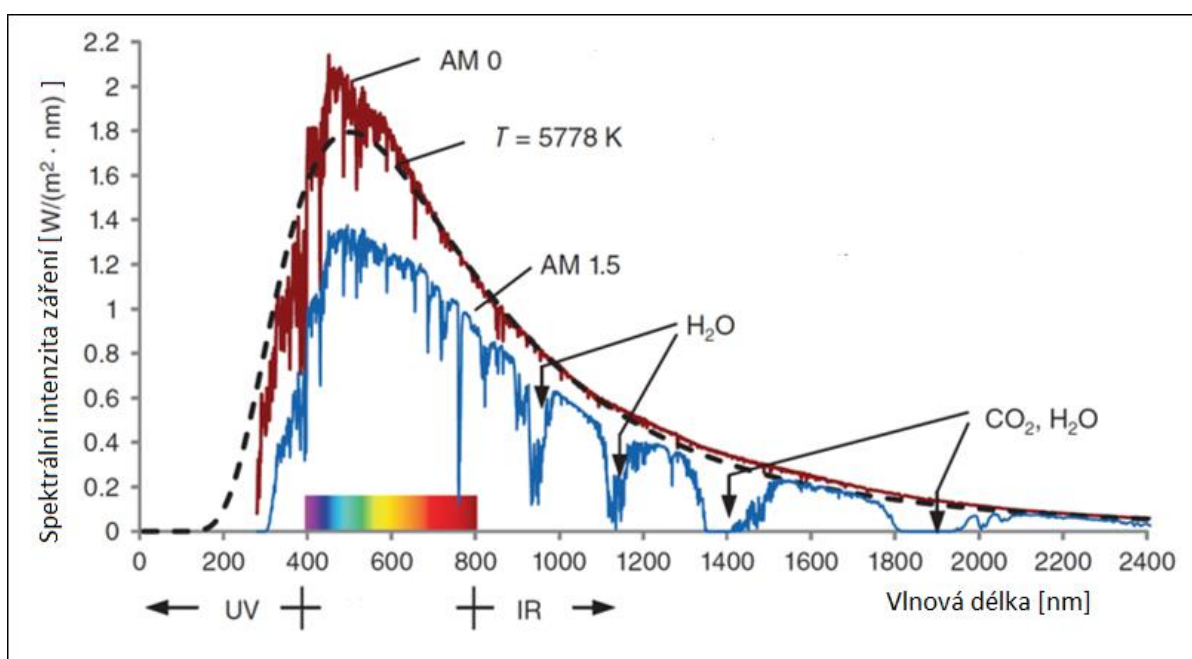
E_S sluneční konstanta [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]

P_S výkon slunce [W]

r_{SZ} vzdálenost Země – Slunce [m]

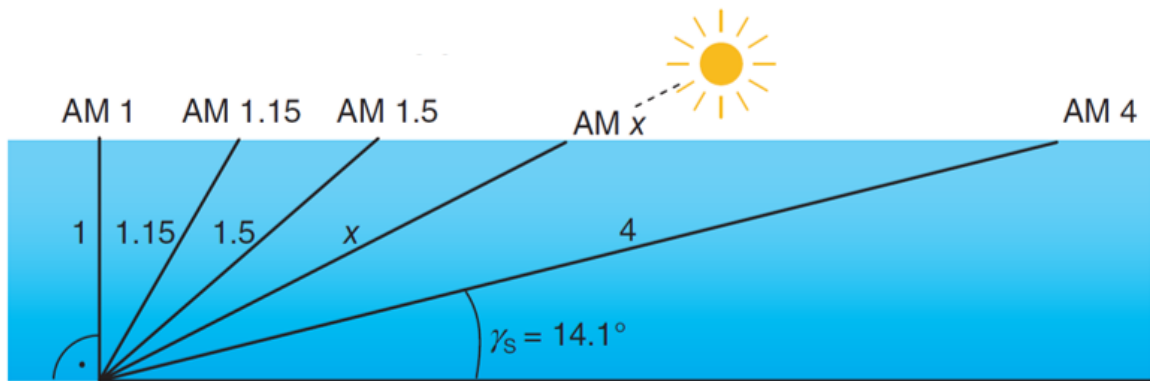
Vypočtená hustota výkonu $1367 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ se nazývá **sluneční konstanta**. Tato hodnota zahrnuje celé spektrum slunečního záření měřeného mimo zemskou atmosféru. Při průchodu atmosférou dochází ke změnám spektra záření, a to vlivem několika faktorů:

- odraz záření od vrchní vrstvy atmosféry
- absorpce části záření v molekulách (O_2 , O_3 , H_2O , CO_2 , ...), nacházejících se v atmosféře
- Rayleighův rozptyl záření na molekulách atmosféry
- Mieův rozptyl záření na částicích v atmosféře (znečištění atmosféry silně závislé na místě)



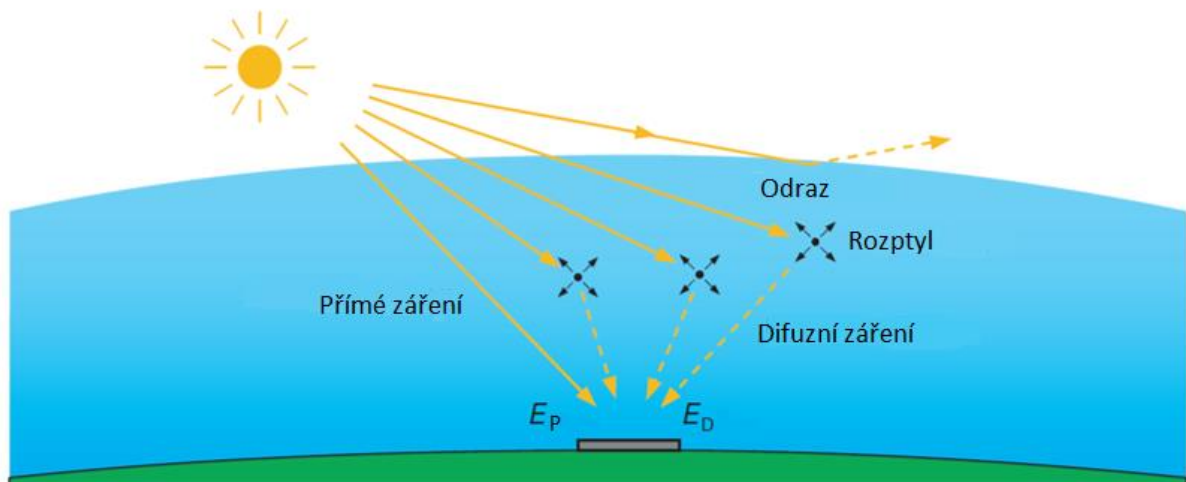
Obrázek 2.1: Spektrum slunečního záření před a po průchodu atmosférou. [2]

Účinky jsou tím větší, čím delší je dráha záření v atmosféře. Ta se mění v závislosti na denní a roční době. Pro vyjádření její velikosti se používá hodnota AM (Air Mass), udávající tzv. optickou tloušťku atmosféry. Hodnota AM 0 znamená, že záření ještě neprošlo atmosférou, AM 1 udává záření po průchodu kolmo výškou atmosféry, AM 1,5 popisuje záření prošlé pod úhlem, 1,5násobkem výšky atmosféry. Hodnota AM 1,5 se používá při určování parametrů solárních panelů. [1], [3]



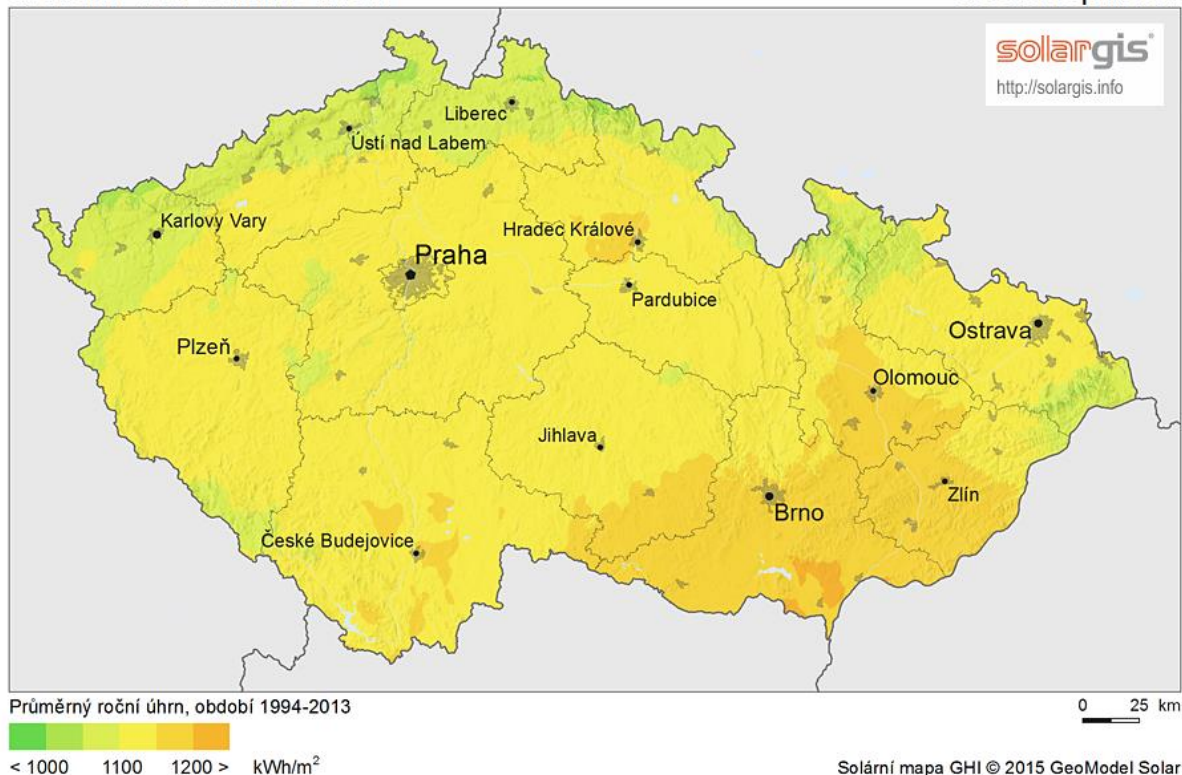
Obrázek 2.2: Znázornění termínu AM. [2]

Po započtení výše uvedených zeslabujících účinků při AM1,5 dostaneme na povrchu Země hodnotu pouze $835 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, což je výkon tzv. **přímého záření**. K této hodnotě ještě musíme přidat výkon **difuzního záření**, vznikajícího vlivem rozptylu a přicházejícího ze všech směrů. Celková hodnota je pak $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Tento součet přímého a difuzního záření se nazývá **globální záření** a používá se při stanovování maximálního výkonu solárních panelů. [1], [3]



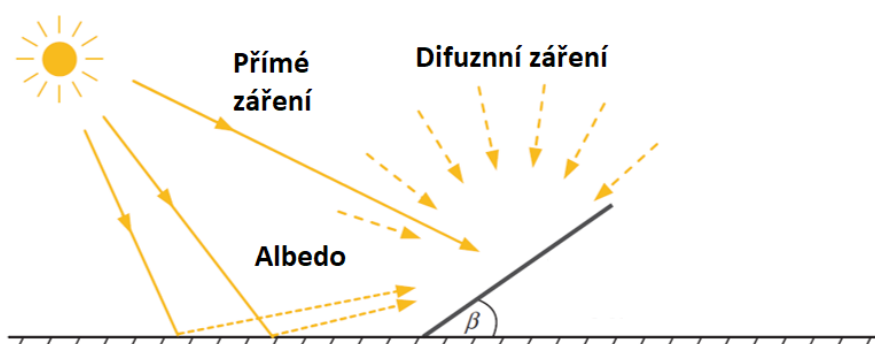
Obrázek 2.3: Struktura globálního záření. [2]

Pro plánování výnosu z fotovoltaického systému v určitém místě se používají mapy průměrného ročního úhrnu globálního záření, sestavené na základě dlouhodobých normálů naměřených v konkrétním místě.



Obrázek 2.4: Mapa ročního úhrnu globálního slunečního záření České republiky. [4]

Hodnoty globálního záření vyjadřují hustotu výkonu na horizontálně umístěné ploše. Proto se pro zvýšení výnosu používá vhodné natočení solárních panelů. Při natočení panelů se ke globálnímu záření přidává další složka, a to záření odražené od země tzv. **Albedo**. V České republice jsou nejvýnosnější panely natočené k jihu se sklonem 35° . [5], [1], [3]

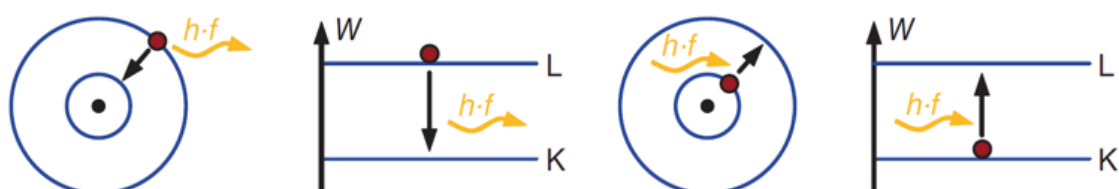


Obrázek 2.5: Ozařování nakloněného fotovoltaického modulu. [2]

2.2 Polovodiče

Pro pochopení funkce fotovoltaického článku je důležité popsat polovodiče, ze kterých je vyroben. Podle Bohrova modelu atomu se každý atom skládá z jádra, obsahujícího kladně nabitě protony a elektricky neutrální neutrony, a obalu tvořeného záporně nabitými elektrony.

Počet protonů a elektronů je shodný, proto je atom navenek elektricky neutrální. Elektrony se mohou nacházet jen v pevně daných energetických stavech tzv. orbitalech. Přechod z nižší do vyšší energetické hladiny je možný pouze při pohlcení kvanta elektromagnetického záření, zvaného foton. Při přechodu na nižší energetickou úroveň je naopak foton vyzářen. Toto bude dále podrobněji popsáno při objasnění fotoelektrického jevu. [6], [1]



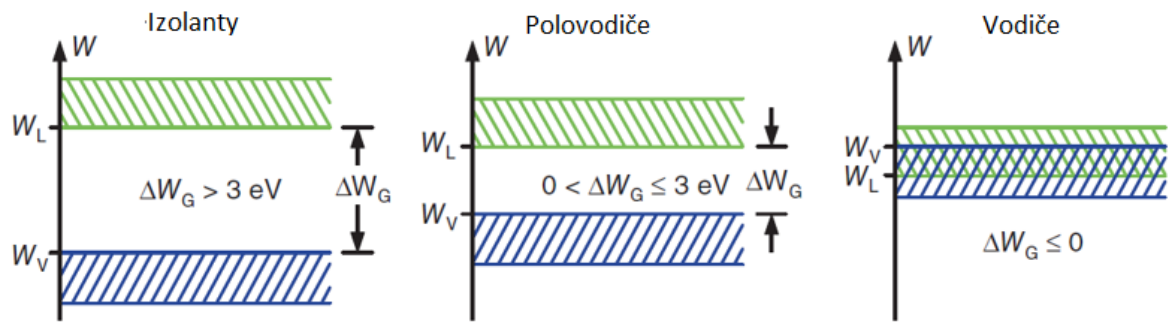
Obrázek 2.6: Přechod elektronu na nižší nebo vyšší energetickou hladinu v elektronovém obalu atomu. [2]

Elektrony zaplňují orbitály postupně. Elektrony z posledního orbitalu, nazývané valenční elektrony, vytvářejí vazby mezi atomy.

Z hlediska schopnosti vést elektrický proud, rozdělujeme pevné látky na:

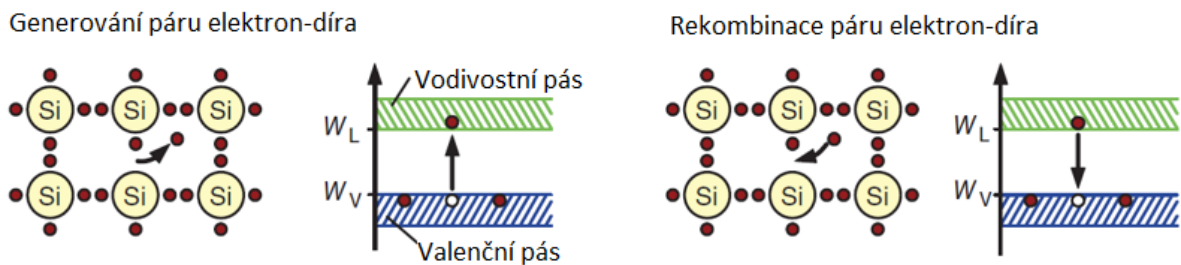
- izolanty
- polovodiče
- vodiče

Na obrázku 2.7 vidíme pásové struktury jednotlivých látek, rozdíl je ve velikosti zakázaného pásu. To je pás zakázaných energií, ve kterém se nemohou nacházet žádné elektrony. Nalézá se mezi valenčním (pás valenčních elektronů) a vodivostním pásem (pás volných elektronů). U izolantů je zakázaný pás široký a elektrony valenčního pásu by potřebovaly velkou energii pro „přeskok“ do vodivostního pásu. Polovodiče mají zakázaný pás úzký a elektrony v excitovaném stavu ho mohou překonat. Excitace elektronů nastává například zvyšováním teploty nebo absorpcí fotonů. U vodičů se valenční a vodivostní pás vzájemně překrývají a elektrony tak mohou snadno valenční pás opouštět. [1], [6]



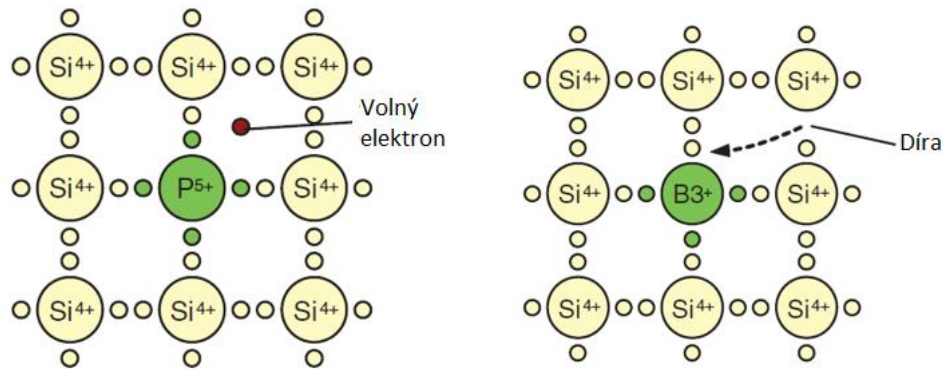
Obrázek 2.7: Pásové struktury pevných látek. [2]

Nejběžnějším a pro fotovoltaiku velmi důležitým zástupcem polovodičů je křemík (Si). Je to prvek ze čtvrté skupiny periodické soustavy prvků. Jeho 4 valenční elektrony vytvářejí při teplotě 0 K pevnou vazbu v krystalové mřížce. Neobsahuje tedy žádné volné elektrony a chová se jako izolant. Při zvyšování teploty dochází k excitaci některých elektronů a jejich uvolnění z vazeb. Tím se zvyšuje schopnost vedení elektrického proudu. V atomu bez uvolněného elektronu převažují protony a místo po tomto elektronu, které se nazývá díra, má kladný náboj. Zatím hovoříme o čistém křemíku a pro tento způsob vzniku vodivosti používáme termín vlastní vodivost. [1], [6]



Obrázek 2.8: Vznik vlastní vodivosti křemíku. [2]

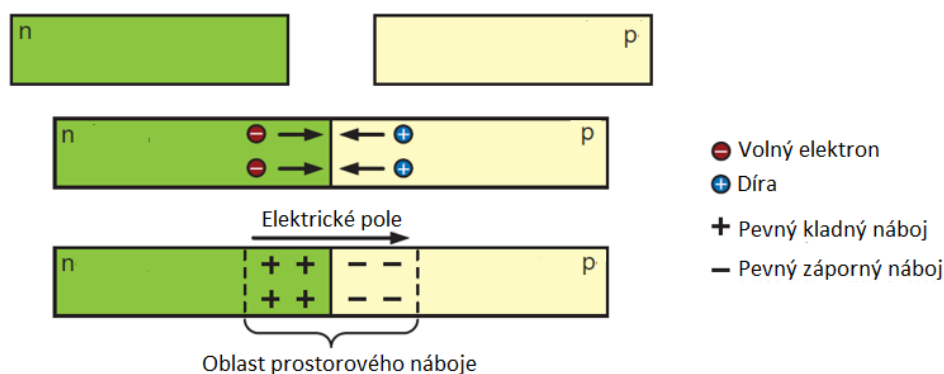
Pro ovlivnění vodivostních vlastností se používá zavádění příměsí, tzv. dopování. Při doplnění atomů s pěti valenčními elektrony, např. fosforu, se čtyři elektrony uplatní ve vazbě s křemíkem a jeden elektron přebývá. Tyto přebývající elektrony jsou natolik slabě vázány, že je můžeme považovat za volné. Vzniká tak převaha volných záporných nosičů a hovoříme o polovodiči typu N. Doplněním příměsí se třemi valenčními elektrony naopak jeden elektron ve vazbě chybí, nastává převaha kladných děr a tento typ polovodiče nazýváme P. [1], [6]



Obrázek 2.9: Dotování křemíku příměsemi, vlevo typ N, vpravo typ P. [2]

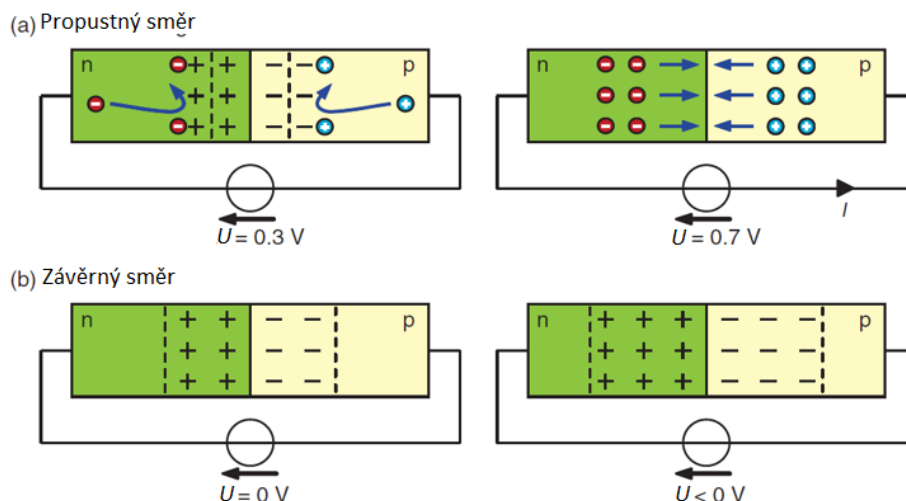
2.3 Polovodičový přechod

Spojením dvou typů polovodičů, nejčastěji P a N (ale může se jednat i o dva různě dotované polovodiče stejného typu nebo polovodič-kov), vznikne tzv. polovodičový přechod, který je pro svoje unikátní vlastnosti používán v elektronických součástkách. Pro názornost použijeme přechod P-N. V části N je převaha volných elektronů a v části P převažují díry. V místě styku dojde k difuzi elektronů z oblasti N do oblasti P a obsazení děr elektrony (tzv. rekombinace). Díry difundují opačně (ve skutečnosti se pohybují elektrony, pohyb děr je pouze zdánlivý). Vznikne tak oblast prostorového náboje bez volných majoritních nosičů, na jejichž okrajích se objeví tzv. difuzní napětí. [1], [6]



Obrázek 2.10: Vznik polovodičového přechodu P-N a chování volných nosičů el. náboje [2]

Po přiložení vnějšího napětí se stejnou polaritou jako má difuzní napětí dojde ke zvětšování vyprázdněné oblasti v místě přechodu a proud neprochází. V případě připojení napětí s opačnou polaritou, většího, než je difuzní, vyprázdněná oblast vymizí a proud protéká. [1] [6]



Obrázek 2.11: Chování polovodičového přechodu po přiložení externího napětí. [2]

2.4 Fotoelektrický jev

Pokusy bylo zjištěno, že při ozařování kovového povrchu zářením s určitou vlnovou délkou, dochází k uvolňování elektronů z tohoto povrchu. Energie záření musí mít jistou minimální hodnotu, jinak k vyražení nedojde. Energie vyražených elektronů přitom nezávisí na intenzitě záření, ale pouze na jeho frekvenci. Klasická fyzika na vysvětlení tohoto jevu nestačí. Vysvětlení poskytl Albert Einstein svojí teorií fotonů. Předpokládal, že energie záření není elektronu předávána spojitě, ale po částech tzv. kvantech. Tato kvanta záření nazýváme fotony. [6] Energie fotonu je dána vztahem:

$$E = h \cdot f \quad (2.2)$$

Kde:

- E energie fotonu
- h Planckova konstanta
- f frekvence záření

Aby došlo k vyražení elektronu, musí být absorbovaná energie větší než výstupní práce potřebná k uvolnění. Foton předá celou svou energii elektronu a přitom zanikne. Kinetická energie uvolněného elektronu se tedy rovná energii fotonu zmenšené o výstupní práci. [6]

$$h \cdot f = E_{k,max} + \Phi \quad (2.3)$$

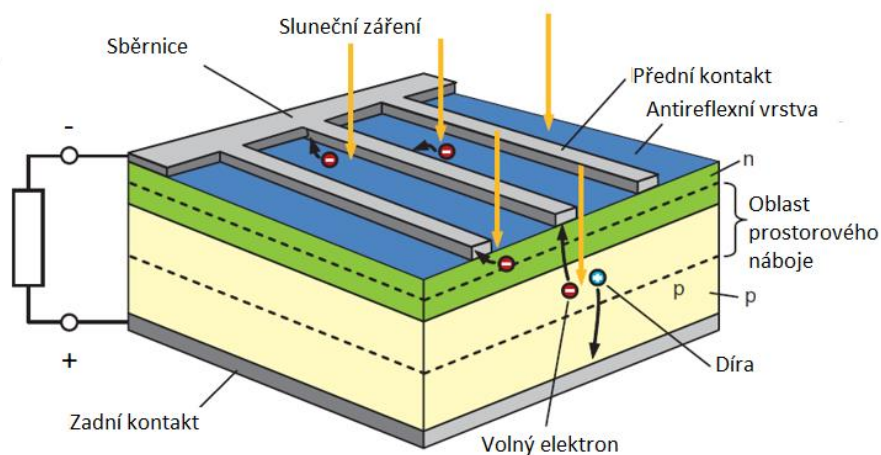
Kde:

- h Planckova konstanta
- f frekvence záření
- $E_{k,max}$ maximální kinetická energie
- Φ výstupní práce

Tím je vysvětleno, že při zvyšování intenzity záření dochází pouze ke zvýšení počtu vyražených elektronů, ale jejich kinetická energie zůstává stejná. Toto se nazývá fotoelektrický jev a rozdělujeme jej na **vnitřní**, uvolněné elektrony zůstávají uvnitř materiálu a zvyšují jeho vodivost a **vnější**, kdy jsou elektrony vyraženy mimo materiál. Pro fotovoltaiku je důležitý právě vnitřní fotoelektrický jev. [6]

2.5 Fotovoltaický článek

Princip fungování fotovoltaického článku je znázorněn na obrázku 2.12. Jedná se o polovodičový přechod, u kterého dochází absorpcí dopadajícího záření ke zvyšování počtu volných nosičů náboje. Ty jsou separovány elektrickým polem prostorového náboje v místě přechodu a to tak, že elektrony jsou přitahovány do oblasti N a díry se hromadí v oblasti P. Tím vzniká na přípojných kontaktech elektrické napětí o velikost přibližně 0,5V. Po připojení zátěže obvodem začne protékat elektrický proud. Obrázek 2.12 ukazuje složení krystalického křemíkového článku. Skládá se ze spodní vrstvy polovodiče typu P, na němž je vytvořena horní vrstva typu N. Horní vrstva je opatřena přívodním kontaktem, který má mřížkovou strukturu z důvodu propuštění co největšího množství slunečního záření. Na spodní straně je umístěn obvykle celoplošný přívodní kontakt. [1], [7]



Obrázek 2.12: Princip křemíkového krystalického článku. [2]

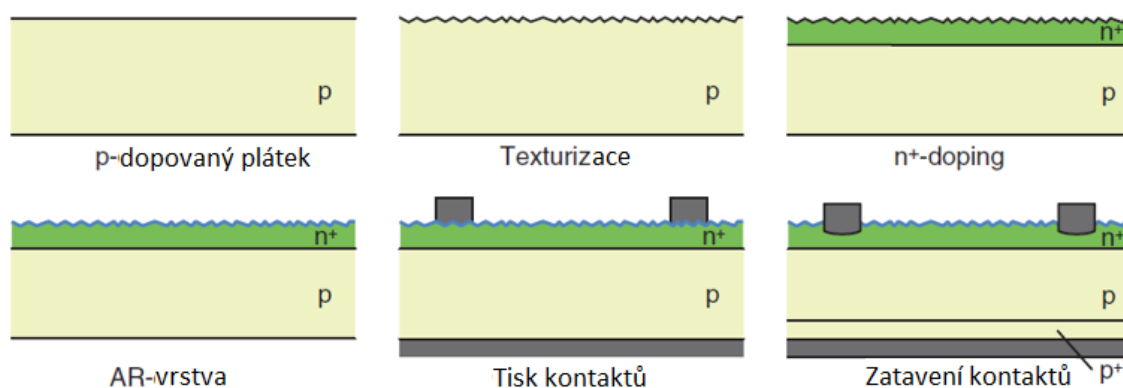
2.6 Druhy fotovoltaických článků

Podle technologie můžeme fotovoltaické články rozdělit na:

- Krystalické křemíkové články – plátky nařezané z krystalů křemíku pospojované do modulů.
- Tenkovrstvé články – slabé vrstvy polovodičů nanesené na čelním skle modulu.

2.6.1 Monokrystalické křemíkové články

Plátky o tloušťce přibližně 0,2 mm, nařezané drátovými pilami z monokrystalů křemíku dotovaných borem, tedy typu P. Monokrystal je vyráběn Czochralskéhoho metodou, kdy se krystal vytahuje za pomalého otáčení z polykřemíkové taveniny roztavené v kelímku. Poté jsou válcové krystaly ořezány na čtvercový nebo pseudočtvercový tvar pro lepší využití místa ve fotovoltaickém modulu. Nařezané plátky jsou očištěny a z jedné strany dotovány fosforem, čímž vznikne polovodičový přechod. Následně je nanášena antireflexní vrstva a přívodní kontakty. Sítotiskem zhotovené přední kontakty jsou zataveny, aby antireflexní vrstvou prošly. [3]



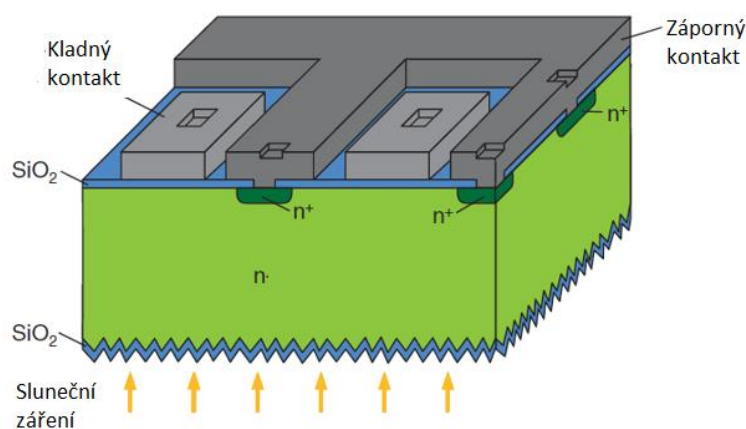
Obrázek 2.13: Postup výroby krystalických článků. [2]

Nevýhodou těchto článků je vysoká cena z důvodu potřeby vysoce čistého křemíku, jehož výroba je energeticky náročná a velkého procenta odpadu při zpracování krystalů. Výhodou je jedna z největších účinností, která se pohybuje v rozmezí 15-19,3 %. Dobré zpracování přímého slunečního záření, vhodné pro systémy se sledováním dráhy slunce. [3]

2.6.2 Monokrystalické vysokovýkonné křemíkové články se zadním kontaktem

Jsou to články bez kontaktů na přední straně. Vyrábí se z plátků s N dotací. Polovodičový přechod je vytvářen dotací P a N po pružích na zadní straně. Tyto pruhy jsou opatřeny

přívodními kovovými kontakty. Články mají vysokou spektrální citlivost přes celé spektrum slunečního záření. Dosahují účinnosti až 22,4 %. [3]



Obrázek 2.14: Popis monokrystalického článku se zadním kontaktem. [2]

2.6.3 Multikrystalické křemíkové články

Místo monokrystalů se používají polykrystalické ingoty vyrobené z křemíkové taveniny řízeným tuhnutím. Postup výroby je poté stejný jako u monokrystalických článků. V plátcích přítomné hranice krystalových zrn jsou zdrojem defektů a snižují účinnost. Výhodou jsou nižší výrobní náklady. Lepší zpracování difuzního záření, vhodné pro pevné instalace. Účinnost 13-17,1 %. [3]

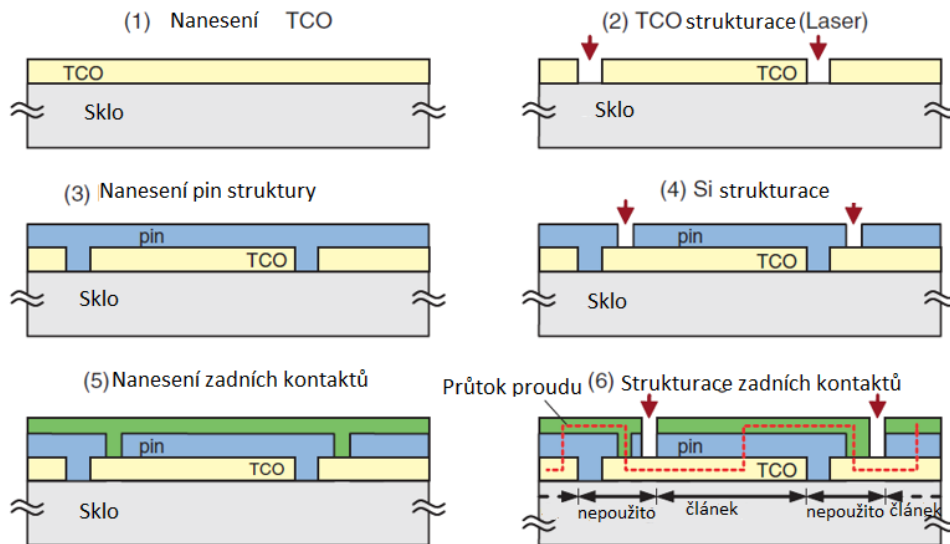
2.6.4 Polykrystalické UMG křemíkové články

Články vyrobené z polykrystalického UMG křemíku. (UMG = upgraded metallurgical grade Silicon). Nižší čistota vyloučením energeticky náročného čištění. Další snížení výrobních nákladů za mírného snížení účinnosti. Nižší průrazné napětí, nutnost použití většího počtu ochranných diod. Účinnost 14-16 %. [3]

2.6.5 Tenkovrstvé články z amorfního křemíku

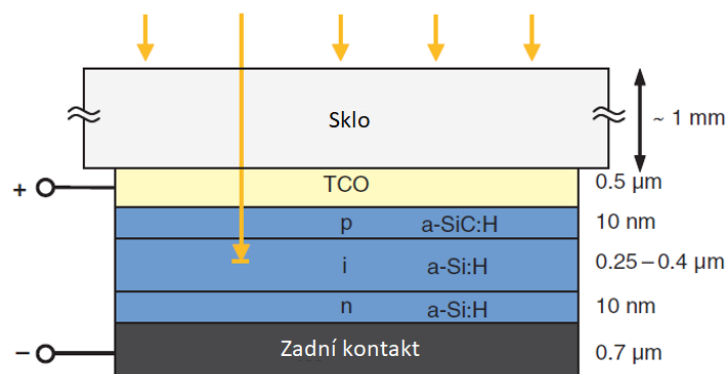
Při tenkovrstvé technologii se používá nanášení polovodiče, v tomto případě amorfního křemíku, na nosný materiál, nejčastěji leptáním zdrsňené sklo, jenž je opatřen čelním kontaktem z vysoce transparentního oxidu kovu tzv. TCO (Transparent Conductive Oxide). Tento je laserem nařezán na proužky přibližně 5 mm. Výroba probíhá chemickým odloučením plynného skupenství z plynného silanu v plazmovém reaktoru. Dotování se provádí přimícháním plynů s požadovanou příměsí. Dotované vrstvy musí být od sebe odděleny nedotovanou i-vrstvou, aby nedocházelo k okamžité rekombinaci. Následně probíhá nařezání

polovodičových vrstev laserem odsazeně od řezů TCO. Nakonec je naprašováním proveden zadní kontakt a opět trochu odsazeně prořezán laserem, čímž se zároveň vyrobí propojení mezi články. [3]



Obrázek 2.15: Postup výroby tenkovrstvých článků z amorfního křemíku. [2]

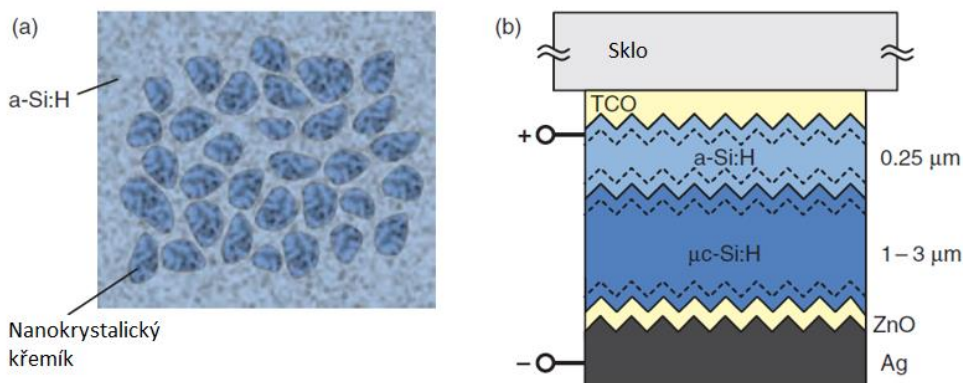
Při výrobě se používají nižší teploty než u krystalických článků i spotřeba materiálu je mnohem menší (tloušťka vrstvy pouze 0,001 mm). Díky tomu jsou levnější. Další výhodou je menší ztráta výkonu při vyšších teplotách a lepší zpracování difuzního záření. Nevýhodou je nižší účinnost 5-7 % a tím potřeba větší plochy modulů pro stejný výkon. [3]



Obrázek 2.16: Složení článku z amorfního křemíku. [2]

2.6.6 Tenkovrstvé mikromorfnní články

Tandemový článek vzniklý spojením mikrokrytalického a amorfnního křemíku. Zvýšení spektrální účinnosti (zpracování širšího spektra slunečního záření). Účinnost 7-12 %. [3]

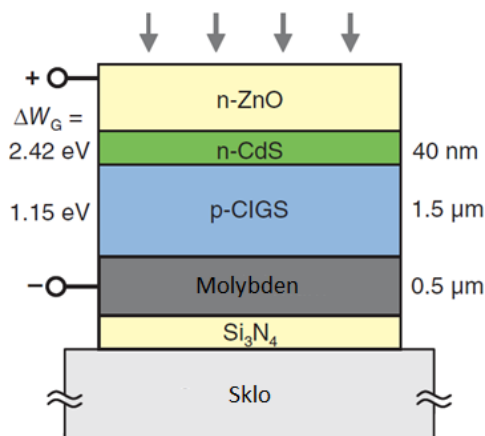


Obrázek 2.17: Složení mikromorfního článku. [2]

2.6.7 Tenkovrstvé články z diselenidu mědi a india (CIS)

Při výrobě se nejprve nosné sklo opatří molybdenovou vrstvou tvořící zadní kontakt. Vrstva CIS s vodivostí typu N je vyrobena z prvků měď indium a selen. Následně je nanasena mezivrstva i-ZnO, a nakonec oxid zinečnatý dotovaný hliníkem (ZnO:Al) s vodivostí P, tvořící transparentní čelní kontakt. Kvůli citlivosti ZnO na vlhkost je nutné dbát na dobré utěsnění modulů. Použitím pružného nosného materiálu lze vyrobit pružné články, dobře přizpůsobitelné montážnímu podkladu. Z tenkovrstvých článků nejvyšší účinnost 7-14,5 %.

[3]

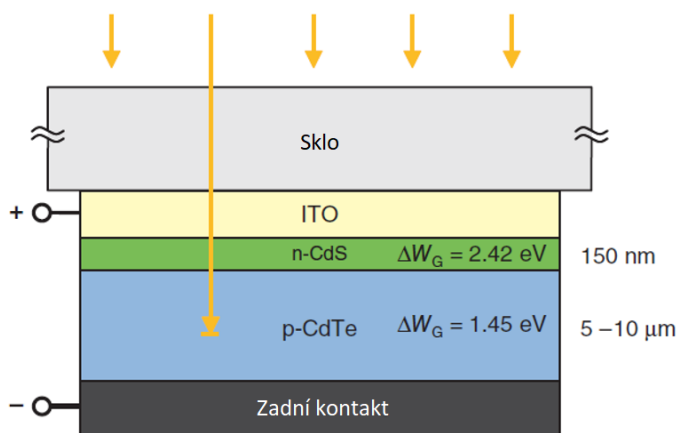


Obrázek 2.18: Složení CIGS článku. [2]

2.6.8 Tenkovrstvé články s telurčitánem kademnatým (CdTe)

Výroba začíná nanesením čelní TCO vrstvy na nosné sklo. Pokračuje se vrstvou CdS s vodivostí typu N a poté vrstvou CdTe s vodivostí typu P. Cíleným zahříváním v chlоровé

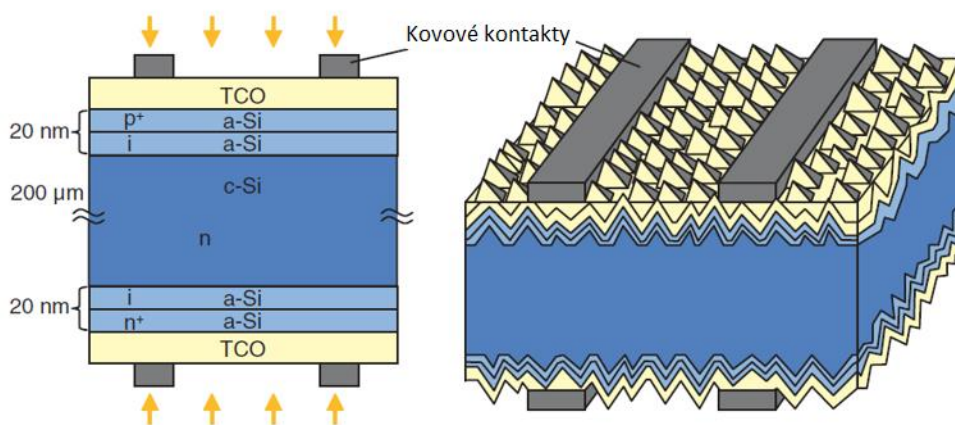
atmosféře se provede rekrytalizace. Nakonec je naprášen zadní kovový kontakt. Tato technologie má nejmenší výrobní náklady. Účinnost 7-13,5 %. [3]



Obrázek 2.19: Složení CdTe článku. [2]

2.6.9 Hybridní články HIT

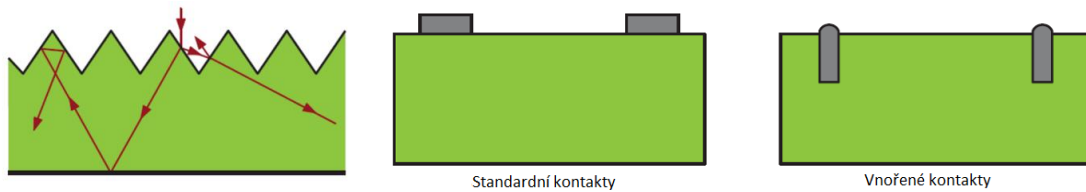
Kombinace krystalického a tenkovrstvého článku. Polovodičový přechod není tvořen dotací nosného materiálu, jako u krystalických článků, ale nanesením tenké vrstvy strukturálně jiného polovodiče. Účinnost 20-21,6 %. [3]



Obrázek 2.20: Složení článku HIT. [2]

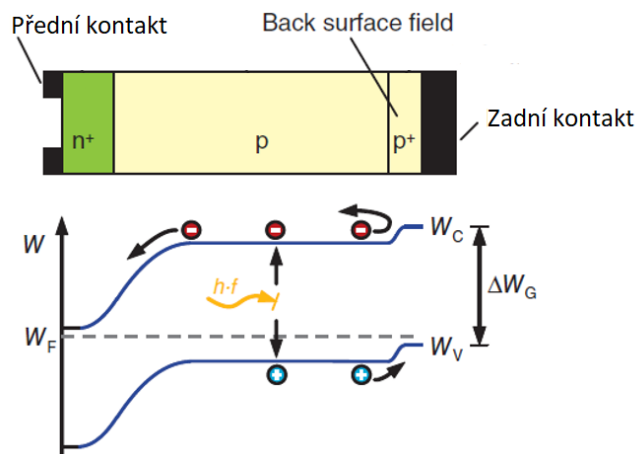
2.7 Zvyšování účinnosti fotovoltaických článků

Pro snížení ztrát odrazem se používá nanášení antireflexní vrstvy a strukturování povrchu, což vede ke zvýšení množství pohlceného slunečního záření. Další možností je použití tzv. vnořených kontaktů, které při zachování stejného průřezu mnohem méně stíní. [1]



Obrázek 2.21: Metody zvyšování účinnosti fotovoltaických článků. [2]

Snížení rekombinací nosičů náboje na zadním kontaktu je dosahováno přidáním vysoce dotované P vrstvy, která vytvoří tzv. pole BSF (Back Surface Field). Toto pole působí jako zrcátko a vrací volné nosiče zpět směrem od zadního kontaktu. [1]



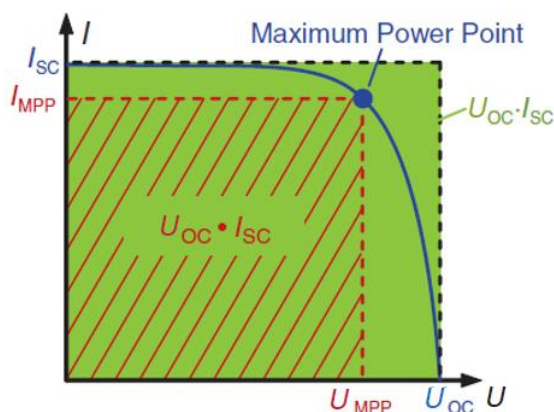
Obrázek 2.22: Princip Back surface field. [2]

2.8 Elektrické vlastnosti fotovoltaických článků

Pro porovnání různých typů fotovoltaických článků slouží jejich V-A charakteristiky. Aby toto bylo možné, byly definovány standardní podmínky STC (standart test condition) pro měření veličin potřebných pro jejich sestavení. Podle normy EN 60904 nebo EIC 60904 se používá hodnota kolmé intenzity slunečního záření $E 1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, teplota $T 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ a AM 1,5. [3]

- **Zkratový proud I_{sc}** (short circuit) [A]
Maximální možný zkratový proud při $U = 0$. U standardních krystalických článků se pohybuje okolo 3 A.
- **Napětí naprázdno U_{oc}** (open circuit) [V]
Maximálního napětí článku, pokud není připojena žádná zátěž, tedy $I = 0$.
Krystalické články 0,5-0,6 V, amorfni články 0,6-0,9 V.

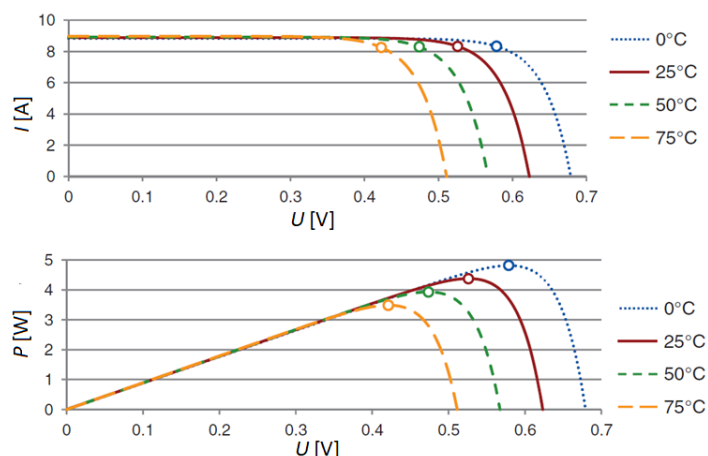
- **Bod maximálního výkonu MPP (Maximum Power Point)**
Bod na V-A charakteristice, v kterém článek dosahuje maximálního výkonu.
Hodnoty napětí a proudu v tomto místě nazýváme U_{mpp} a I_{mpp} .
- **Maximální výkon P_{mpp} [W_p] (Watt peak)**
Součin I_{mpp} a U_{mpp} špičkový výkon v bodě MPP.
- **Činitel plnění FF (Fill Factor)**
Poměr mezi maximálním výkonem, tedy výkonem v bodě MPP a výkonem daným součinem napětí naprázdno a proudu nakrátko. Faktor plnění je měřítkem kvality článku, typické hodnoty pro krystalické články jsou 0,75-0,85 a pro tenkovrstvé články 0,6-0,75.
- **Účinnost - (η)**
Udává, jak velká část výkonu dopadajícího slunečního záření je přeměněna na elektrickou energii. Typická účinnost krystalických křemíkových článků je 15-22 %.
[1], [3]



Obrázek 2.23: V-A charakteristika fotovoltaického článku s hlavními veličinami. [2]

2.9 Teplotní závislost fotovoltaických článků

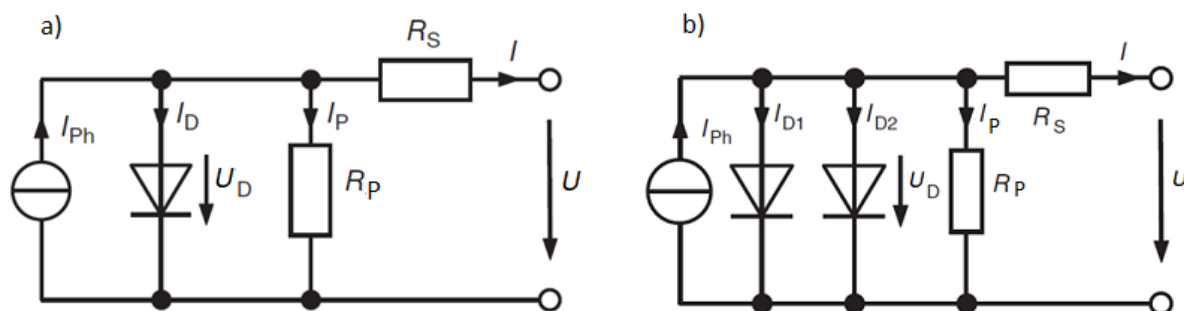
Při zvyšování teploty dochází v polovodiči ke zvyšování počtu volných nosičů, růstu saturačního proudu a ke zmenšování zakázaného pásu. To má za následek snižování napětí a tím i výkonu. U krystalických křemíkových článků toto snížení činí asi 0,4-0,5 % na °C. Při velkém oslunění v létě je teplota modulů mnohem vyšší než 25 °C, při kterých je udáván výkon v datasheetech a je proto potřeba počítat s nižším výkonem. [1]



Obrázek 2.24: Teplotní závislost krystalických fotovoltaických článků. [2]

2.10 Modelování fotovoltaických článků

Pro pochopení, matematické modelování charakteristik nebo jako základ pro navrhování měřicích a regulačních zařízení, se ve fotovoltaice používají náhradní schémata zapojení. Na obrázku 2.25-a je znázorněno nejpoužívanější náhradní schéma článku. Je nazýváno jednodiodový model. Sériový odpor R_s vyjadřuje ohmické ztráty na předních kontaktech a paralelní odpor R_p slouží ke znázornění tzv. svodových proudů. Tento model není pro některé použití dostatečně přesný, proto se pro zvýšení přesnosti používají další modely. Například dvoudiodový model 2.25-b nebo model efektivního článku. [1], [3]



Obrázek 2.25: a) jednodiodový model, b) dvoudiodový model. [2]

2.11 Druhy fotovoltaických systémů a jejich části

Z hlediska připojení fotovoltaického systému k rozvodné síti rozdělujeme systémy na připojené k síti tzv. grid-on a na ostrovní, samostatné bez síťového připojení tzv. grid-off.

Fotovoltaické systémy se skládají z těchto hlavních částí:

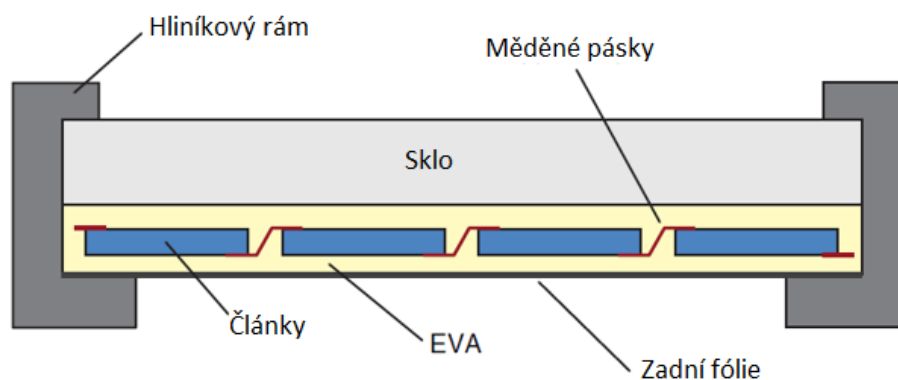
- Fotovoltaické moduly
- Střídače
- Nabíjecí regulátory
- Akumulátory

2.11.1 Střídače

Střídače jsou nutné pro systémy grid-on a zajišťují přeměnu stejnosměrného proudu dodávaného panely na střídavý, používaný v rozvodné síti. Používají se též ve větších ostrovních systémech pro napájení spotřebičů konstruovaných na síťové napětí. V této práci je řešen malý ostrovní systém se stejnosměrným napětím 12 V, a proto střídače nebudou podrobněji popsány.

2.11.2 Fotovoltaické moduly

Moduly se skládají z jednotlivých fotovoltaických článků navzájem spojených sériově a paralelně tak, aby bylo dosaženo požadovaného napětí. Nejčastěji spojením 36, 48, 60 nebo 72 článků s U_{mpp} 18-36 V. Spojené články jsou zatavené do EVA (etyl-vinyl-acetát) folie, opatřeny spodní vícevrstvou ochrannou fólií nebo sklem, překryty vrchním sklem s antireflexní úpravou a zasazeny do utěsněného hliníkového rámu. [1], [3]



Obrázek 2.26: Konstrukce fotovoltaického modulu. [2]

Při sériovém propojení článků dochází v případě zastínění k značným výkonovým ztrátám. Zastíněný článek se chová jako spotřebič, začne se přehřívat a hrozí jeho zničení. Proto se antiparalelně ke článkům umísťují překlenovací diody. Ideálně by bylo vhodné umístit překlenovací diodu ke každému článku, toto se ale v praxi nepoužívá. Obvykle se překlenovací

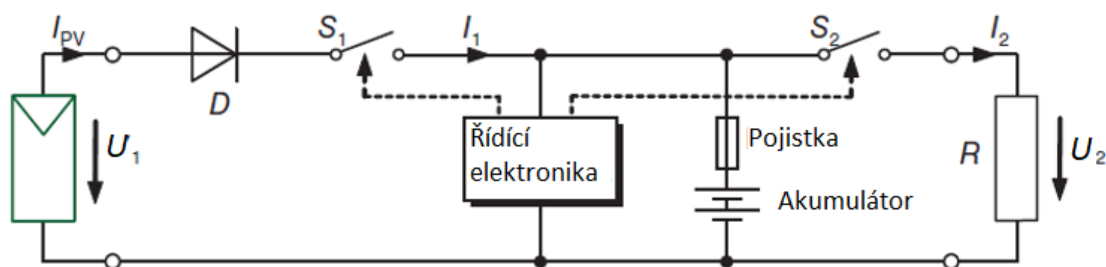
diody umísťujú do prípojných skříní přes 12, 18 nebo 24 článků, čímž je zajištěn přístup pro případ opravy. [1], [3]

2.11.3 Nabíjecí regulátory

Na nabíjecí regulátory jsou v ostrovních systémech kladeny vysoké požadavky. Hlavní funkce regulátoru je ochrana akumulátoru před přebíjením a před hlubokým vybitím. Dále musí zabezpečit optimální nabití akumulátoru, indikovat stav nabití a zamezit nežádoucímu vybíjení. Důležitá je také ochrana proti zkratu a přepólování. Ochrana před přebíjením regulátor provádí odpojením fotovoltaického generátoru od akumulátoru pomocí výkonových elektronických spínačů typu MOSFET a IGBT. Odpojením zátěže je naopak realizována ochrana před hlubokým vybitím. Opětovné připojení zátěže je provedeno po dosažení definovaného minimálního nabití akumulátoru. Nežádoucím vybíjením se rozumí zpětný proud do neosvětleného fotovoltaického modulu, který se v tomto případě chová jako spotřebič. Ochrana je provedena sériovou diodou v závěrném směru nebo anti-sériově zapojeným MOSFET. [3], [7]

2.11.3.1 Sériový regulátor

Schéma sériového regulátoru je znázorněno na obrázku. Spínač S_2 odpojuje zátěž při dosažení minimálního napětí akumulátoru a po dobití opět spíná. Spínač S_1 provádí připojování a odpojování fotovoltaického modulu v závislosti na stavu nabití akumulátoru. Regulace nabíjecího proudu je dosahována pomocí změny šířky spínacích pulzů (pulzně šířková modulace) PWM. Odtud jsou tyto regulátory označovány jako PWM regulátory. [3], [7]

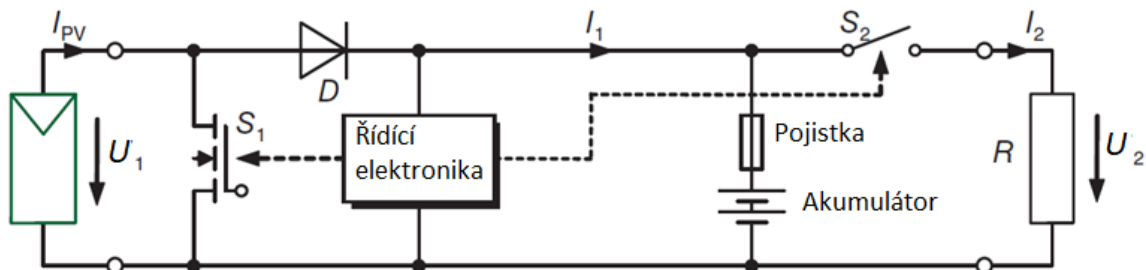


Obrázek 2.27: Schéma sériového nabíjecího regulátoru. [2]

2.11.3.2 Bočníkový (paralelní) regulátor

Dalším typem PWM regulátoru je bočníkový regulátor. Zde je regulace a odpojení nabíjecího proudu realizováno zkratováním fotovoltaického modulu. Zkratování modulům příliš nevádí,

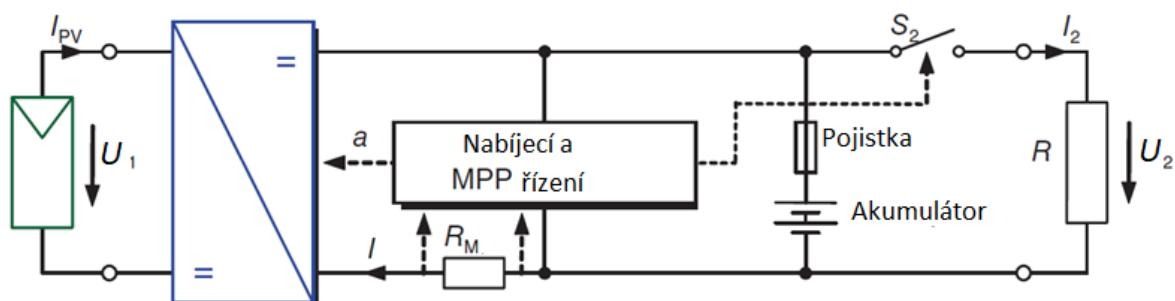
snášejí jej velmi dobře. Je zde však zvýšené riziko vzniku Hot-spotů, a proto jsou používány méně často než regulátory sériové. Ještě méně častěji jsou používány regulátory kombinující oba typy regulace. [3], [7]



Obrázek 2.28: Schéma paralelního nabíjecího regulátoru. [2]

2.11.3.3 MPPT regulátory

U PWM regulátorů určuje napětí akumulátoru pracovní bod na V-A charakteristice modulu. Většina fotovoltaických modulů má ovšem napětí v bodě MPP vyšší, než je napětí akumulátoru, a proto tyto regulátory často nepracují optimálně. Tato výkonová ztráta se pohybuje v rozmezí 10-40 %. Pro využití maximálního výkonu dodávaného fotovoltaickým modulem, se používají regulátory využívající technologii MPPT (Maximum Power Point Tracking), sledování maximálního bodu výkonu. Bod MPP se totiž neustále mění, vlivem změny intenzity osvětlení a teploty. MPPT regulátory pracují na principu DC/DC měniče, který neustále sleduje charakteristiku panelu a reguluje nabíjecí proud tak, aby byl vždy využit maximální výkon panelu. Prakticky vyšší napětí panelu, než je napětí akumulátoru, nekrátí jako PWM regulátory, ale transformuje ho na zvýšení nabíjecího proudu. [3], [7]

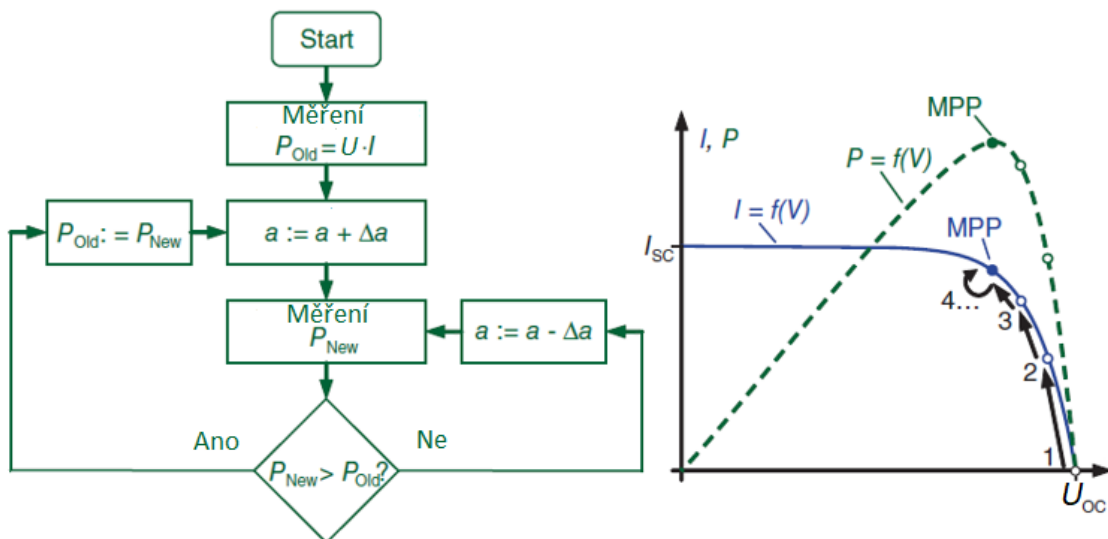


Obrázek 2.29: Schéma MPPT nabíjecího regulátoru. [2]

Algoritmů, podle kterých regulátory pracují při regulaci, je mnoho. Výrobci regulátorů z důvodu ochrany know-how zpravidla neuvádějí jaký algoritmus byl použit a už vůbec

nepopisují případný vlastní vývoj, a proto nelze podle tohoto kritéria regulátor vybírat. Pro představu zde bude popsána nejpoužívanější metoda.

Hill-Climbing, Pertub and Observe (P&O). V tomto algoritmu regulátor mění pracovní napětí a poté vyhodnocuje odchylku od skutečnosti. Je-li odchylka kladná, následující krok pokračuje stejným směrem, je-li záporná, směr úpravy napětí se obrátí. Nevýhodou je, že po nalezení bodu MPP se na něm napětí neustálí, ale neustále osciluje kolem a při rychlých změnách intenzity záření je možnost kroků špatným směrem. K eliminaci těchto nevýhod se používá například průměrování několika vzorků nebo proměnlivá délka kroku nastavování pracovního napětí. [1]



Obrázek 2.30: Vývojový diagram algoritmu Hill-Climbing, P&O. [2]

Dalšími metodami jsou například:

- Incremental Conductance (INC, IncCond)
- Fractional Open-Circuit Voltage
- Fractional Short-Circuit Current
- Fuzzy Logic
- Neural Networks [8]

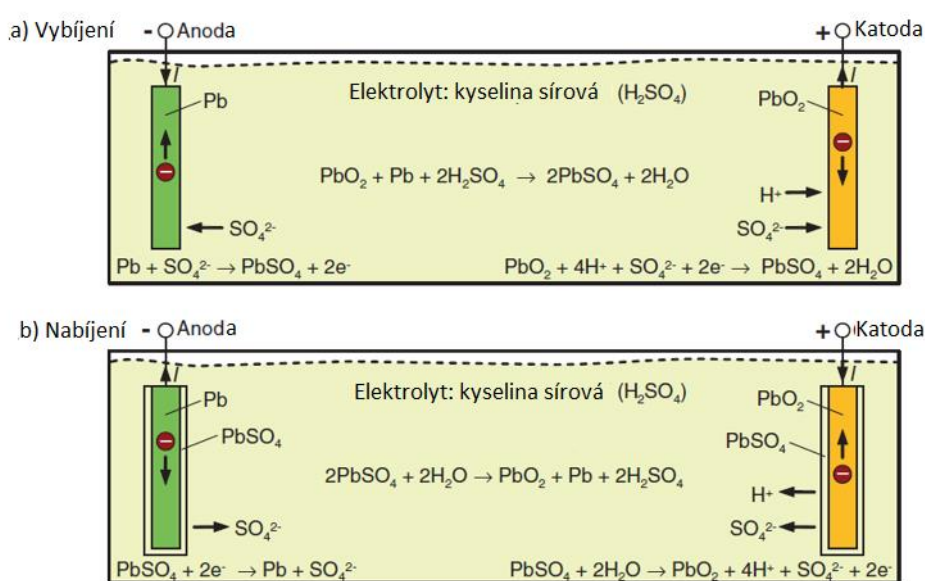
PWM regulátory jsou levné a hodí se spíše pro menší systémy, kde pokles výkonu nehraje takovou roli. Cena MPPT regulátorů byla výrazně vyšší a používaly se proto hlavně ve větších systémech, ale v poslední době cena klesá a jsou proto vhodné i do menších systémů.

2.11.4 Akumulátory

Ostrovní solární systémy mají hlavní nevýhodu, že vyrábí nejvíce elektrické energie v době její minimální potřeby a v době zvýšené spotřeby naopak nevyrábí vůbec, například v noci. Proto je v těchto systémech nutné energii vhodně uchovávat pro dobu kdy bude potřeba. K tomuto účelu se nejčastěji používají akumulátory. Akumulátorů je celá řada typů a jejich vývoj zvláště v poslední době zaznamenává prudký nárůst.

2.11.4.1 Olověné akumulátory

Olověné akumulátory byly osvědčenou a cenově výhodnou volbou, v současnosti jsou ovšem stále více nahrazovány lithiovou technologií. Skládají se z kladných a záporných elektrod ponořených do elektrolytu tvořeném kyselinou sírovou (H_2SO_4). Kladné elektrody jsou vyrobeny z oxidu olovičitého (PbO_2) a záporné tvoří houbovitě olovo. Při odběru proudu ze svorek, tedy při vybíjení, probíhá elektrochemická reakce, při které z jedné molekuly olova ze záporné elektrody a z jedné molekuly oxidu olovičitého z kladné elektrody spolu se dvěma molekulami kyseliny sírové z elektrolytu, vzniknou dvě molekuly síranu olovnatého (PbSO_4), dvě molekuly vody a dojde k uvolnění dvou elektronů. Zvyšuje se množství vody a hustota elektrolytu klesá. Při nabíjení probíhá reakce opačně. Dodávané elektrony jsou přijímány síranem olovnatým, který se přeměňuje zpět na oxid olovičitý, olovo a kyselinu sírovou. Hustota elektrolytu opět roste. Z hustoty elektrolytu lze velmi dobře zjistit stav nabití akumulátoru. [9], [1], [3]



Obrázek 2.31: Princip olověného akumulátoru. [2]

Síran olovnatý se při nabíjení nikdy nerozpustí úplně a jeho malé množství se pomalu hromadí na elektrodách. Tento proces zvaný sulfatace je příčinou postupné ztráty kapacity a ukončení životnosti akumulátoru. Sulfatace je tím větší, čím hlubší bylo vybití akumulátoru. [3], [9]

2.11.4.1.1 Olověné mřížkové akumulátory s kapalným elektrolytem

Olověné akumulátory se dělí na několik typů. Nejpoužívanější a nejlevnější jsou mřížkové akumulátory s kapalným elektrolytem v anglické literatuře označované Flooded. U této klasické konstrukce dochází při nabíjení po dosažení tzv. plynovacího napětí na elektrodách k vývinu plynu, následkem čehož se v elektrolytu snižuje obsah vody a musí být pravidelně doplňována. Nejrozšířenějším zástupcem této kategorie jsou automobilové startovací akumulátory, které nejsou pro fotovoltaiku vhodné z důvodu nízké odolnosti vůči cyklickému hlubšímu vybíjení. Proto se pro tyto účely vyrábí speciální solární akumulátory s upravenými zesílenými elektrodami, u kterých při vybíjení do 20 % dosahuje životnost až 1000 cyklů. [3]

2.11.4.1.2 Olověné akumulátory AGM

Jedná se o verzi akumulátorů s kapalným elektrolytem, který je však zasáknutý v mikroporézní skelné tkanině (Absorbed Glas Mat). Akumulátory jsou hermeticky uzavřené a není potřeba doplňovat destilovanou vodu. [9]

2.11.4.1.3 Olověné gelové akumulátory

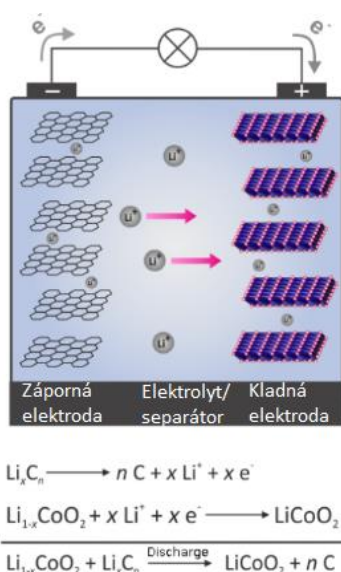
Tento typ akumulátoru používá elektrolyt zahuštěný do podoby gelu. To umožňuje jeho instalaci v jakékoli poloze. Mezi další výhody patří bezúdržbovost a vyšší odolnost vůči cyklování. Nevýhodou je menší odolnost vůči přebíjení, a proto je nutné zabezpečit, aby nebylo překračováno plynovací napětí, čímž by došlo k vysušení elektrolytu. Životnost při vybití 50 % dosahuje 1000 cyklů a při vybití 30 % až 2000 cyklů. [3]

2.11.4.1.4 Stacionární pancéřové deskové akumulátory

Ve velkých ostrovních systémech se používají robustní stacionární akumulátory. Jejich výhodou je velká životnost a odolnost vůči cyklům. Elektrody jsou u tohoto typu akumulátoru opláštěny ochranným „pancěrem“, který mechanicky chrání aktivní materiál, což má za následek prodloužení životnosti, ale také větší rozměry a hmotnost. Životnost se pohybuje při vybití 50 % okolo 3500 cyklů a při vybití 45 % dosahuje 5000 cyklů. [3]

2.11.4.2 Lithium-iontové akumulátory

Označení lithium-iontový akumulátor se používá pro akumulátory založené na lithiu, kterých je podle použitých anodových materiálů několik druhů a mají různé vlastnosti. Jsou složeny z anody, tvořené oxidem lithia, oddělené separátorem od grafitové katody a elektrolytu obsahujícího soli lithia s fluorem a organická rozpouštědla. Při vybíjení protékají vnějším obvodem elektrony uvolněné z atomů lithia přítomných na anodě a současně vzniklé lithiové ionty procházejí skrz separátor elektrolytem na katodu. Při nabíjení se proces obrátí. [10]



Obrázek 2.32: Princip lithium-iontového akumulátoru. [11]

Lithiové akumulátory nabízejí řadu výhod. Vysoká hustota energie, bezúdržbovost, vyšší napětí článků, nízké samovybíjení, absence paměťového jevu, velký počet cyklů. Mezi nevýhody patří potřeba bateriového managementu (BMS), monitorujícího každý článek a vyšší cena. Při nabíjení nesmí být překročeno maximální napětí článku, i vybíjecí napětí nesmí klesnout pod minimální mez, jinak hrozí nevratné zničení. Vyrábí se ve formě jednotlivých článků, které lze spojit na požadované napětí a kapacitu s použitím přídavného BMS nebo ve formě hotových bateriových bloků s vestavěným BMS. [10] V současné době dochází k nárůstu světové výrobní kapacity a nastává pokles cen.

Název	Napětí článku [V]	Pracovní limity [V]	Životnost cyklů	Hustota energie [Wh · kg ⁻¹]	Vybíjecí proud
LiCoO ₂ (LCO)	3,6	3,0-4,2	500-1000	150-200	1C
LiMn ₂ O ₄ (LMO)	3,8	3,0-4,2	300-700	100-150	10C
LiFePO ₄ (LFP)	3,2-3,3	2,5-3-65	1000-2000	90-120	25C
LiNiMnCoO ₂ (NMC)	3,6-3,7	3,0-4,2	1000-2000	150-220	2C
LiNiCoAlO ₂ (NCA)	3,6	3,0-4,2	4000-8000	200-260	1C
Li ₄ Ti ₅ O ₁₂ (LTO)	2,4	1,8-2,85	3000-7000	50-80	10C

Tabulka 2.1 Přehled některých typů lithiových akumulátorů [10]

2.11.4.2.1 LiFePO₄ (LFP)

Ve fotovoltaice se v poslední době prosazují akumulátory lithium-fosfát LiFePO₄. Mají sice oproti ostatním li-ion technologiím nižší hustotu energie a napětí článku, nepatrně vyšší samovybitení, ale jsou bezpečné, při poruše nehoří ani nevybuchují, jsou odolnější vůči případnému přebíjení, dobře snášejí velké vybíjecí proudy a dovolují větší hloubku vybíjení při zachování dobré životnosti. [10]

2.11.4.2.2 Li₄Ti₅O₁₂ (LTO)

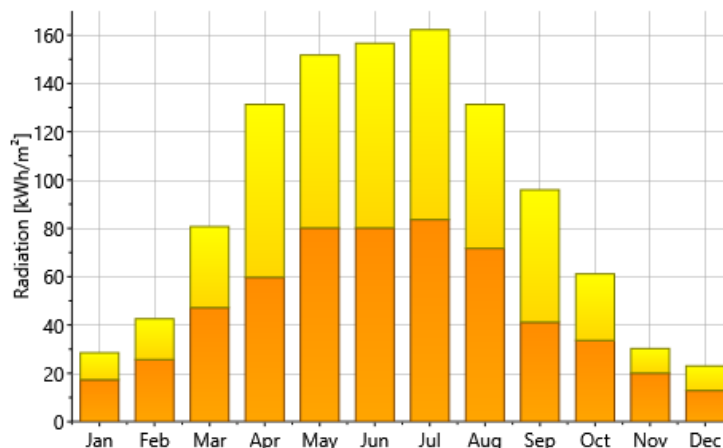
Novou technologií přicházející na trh je LTO (Lithium Titanate Oxide). Tyto články mají ještě menší energetickou hustotu a napětí než LFP, vynikají ovšem extrémní životností a lepším výkonem za nízkých teplot. [10]

2.12 Navrhování ostrovních systémů

2.12.1 Dimenzování fotovoltaických modulů

Při návrhu a dimenzování fotovoltaického systému je nutné uvést do souladu požadované množství elektrické energie a možnosti pro její výrobu. Nejprve se provede kvantifikování požadavků na množství potřebné energie. Denní spotřeba energie [Wh] se získá jako součin příkonu spotřebičů [W] a jejich denní provozní doby [h]. Dále je nutno navrhnout systém, který bude schopen požadované množství energie vyrobit. Při návrhu se vychází z dlouhodobých normálů množství slunečního záření v daném místě. Vzhledem k velkým rozdílům mezi letním a zimním množstvím slunečního záření v naší zeměpisné šířce je nutné při požadavku na celoroční provoz systému, použít množství z nejslabšího období s tím, že

v ostatních obdobích bude přebytek. Údaje, které lze získat např. pomocí programu Meteonorm, představují průměrný denní výkon dopadajícího slunečního záření v $\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2}$. [3]



Obrázek 2.33: Graf globálního záření pro oblast České Budějovice, zdroj: Meteonorm 7.2.

Víme, že STC počítají s hodnotou $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$, znamená proto tento údaj, kolik hodin denně bude panel vyrábět energii. Potřebný nominální výkon modulů se zjistí jako podíl denní spotřeby energie [Wh] a počtu hodin slunečního záření [h] vynásobeného korekčními koeficienty faktorů ovlivňujících výkon. Tyto faktory jsou sklon modulů, teplota modulů a ztráty v systému. Vliv náklonu modulu je v době záření dopadajícího pod menším úhlem značný z důvodu koncentrace stejného výkonu na menší plochu. Výkon modulů se také mění s jejich teplotou, kterou ovlivňuje okolní teplota a způsob uložení. [3]

Měsíc	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.
Průměrné denní sluneční záření Z_2 [$\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2}$]	0,90	1,54	2,61	4,37	4,90	5,23	5,23	4,23	3,20	1,97	1,00	0,74
Koeficient Z_3 pro náklon 35°	1,86	1,49	1,30	1,15	1,00	0,96	0,99	1,06	1,25	1,43	1,63	2,00
Koeficient Z_4 vliv nízké teploty (krystalický křemík na volné ploše)	1,07	1,06	1,03	1,00	0,97	0,95	0,94	0,95	0,98	1,01	1,04	1,06
Z_4 vliv střední teploty (krystalický křemík na střeše)	1,06	1,05	1,02	0,98	0,94	0,93	0,92	0,93	0,96	1,00	1,04	1,06
Z_4 vliv vysoké teploty (krystalický křemík na střeše bez zadní ventilace)	1,05	1,04	1,00	0,96	0,92	0,90	0,90	0,91	0,94	0,98	1,03	1,05

Tabulka 2.2 Hodnoty průměrného denního záření a koeficientu náklonu pro oblast České Budějovice – zdroj Meteonorm 7.2, koeficienty pro vliv teploty – zdroj DGS 2010

Dále je nutno počítat se ztrátami ve vedení ve výši 6 %. Vedení by mělo být dimenzováno tak, aby ohmické ztráty nebyly větší než 3 % a počítají se dvakrát, jednou od modulů k baterii a podruhé od baterie ke spotřebiči. 10 % ztrát je způsobeno transformací elektrické energie na chemickou a zpět v akumulátoru. Dalších 10 % tvoří ztráty z nesouladu způsobené rozdílem napětí baterie a napětí modulů v bodě MPP. Ztráty z nesouladu se neuvažují při použití MPPT regulátoru. [3] Hledaný výkon modulů je tedy možno vypočítat podle vztahů:

$$P_{FV} = \frac{W}{Z_2 \cdot Z_3 \cdot Z_4 \cdot V} \quad (2.4)$$

$$V = V_L \cdot V_U \cdot V_M \quad (2.5)$$

$$W = P_1 \cdot T_1 + P_2 \cdot T_2 + P_n \cdot T_n \quad (2.6)$$

Kde:

P_{FV} výkon fotovoltaických modulů [Wp]

W denní spotřeba energie [Wh]

Z_2 průměrná denní doba slunečního záření v nejslabším měsíci [h]

Z_3, Z_4 korekční koeficienty z tabulky

V_L ztráty ve vedení 6 %

V_U ztráty transformací 10 %

V_M ztráty z nesouladu (Mismatching) 10 %

$P_1 - P_n$ jmenovitý výkon spotřebičů [W]

$T_1 - T_n$ denní provozní doba spotřebičů [h], [3]

2.12.2 Dimenzování akumulátoru

Při návrhu akumulátoru se počítá s tzv. autonomní dobou, tj. dobou, po kterou je plně nabitý akumulátor schopen bez dobíjení zásobovat spotřebiče. Podle požadavků na systém se tato doba pohybuje v rozmezí 2–10 dnů. Dále je nutno zabezpečit, aby úroveň nabití akumulátoru neklesala pod mez hlubokého vybití, která podstatně zkracuje jeho životnost. Například u olověných gelových akumulátorů se pro zachování dobré životnosti doporučuje nepřekračovat vybití pod 50 %. To znamená, že po zvolené autonomní době musí mít akumulátor k dispozici 50 % kapacity. [3] Potřebná kapacita akumulátoru se tedy vypočítá podle vzorce:

$$C = \frac{W \cdot A}{k} \quad (2.7)$$

Kde:

C kapacita akumulátoru [Wh]

W denní spotřeba energie [Wh]

A počet autonomních dní

k koeficient vybití akumulátoru (50 % = 0,5, 80 % = 0,8, atd.), [3]

2.12.3 Dimenzování vodičů

Elektrická instalace musí být provedena v souladu s ČSN 33 2000-7-712. S ohledem na výše uvedený požadavek maximálních ztrát 3 %, lze průřez vodičů vypočítat podle vztahu:

$$S = \frac{L \cdot P}{0,03 \cdot U^2 \cdot \gamma} \quad (2.8)$$

Kde:

S průřez vodičů [mm²]

L délka vedení [m]

P přenášený výkon [W]

U systémové napětí [V]

γ měrná elektrická vodivost, měď = 56 [m · Ω^{-1} · mm⁻²], [3]

2.13 Software pro návrh fotovoltaických systémů

Pro návrh a modelování fotovoltaických systémů lze využít celou řadu softwarových nástrojů. Od programů přepočítávajících hodnoty záření pro libovolné místo na Zemi, jako je již zmíněný Meteonorm 7.2 nebo pro Evropu a Afriku PVGIS, až po komplexní profesionální programy umožňující 3D modelování zastínění. [3] V praxi je nutné počítat s tím, že Při návrhu ostrovního fotovoltaického systému se pracuje s velmi proměnlivými průměrnými hodnotami, a proto občas energie dojde.

3 Výsledky

3.1 Návrh systému

V této práci je řešen systém, sloužící k napájení vědeckých přístrojů v terénu, dle požadavků Katedry botaniky Přírodovědecké fakulty Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích. Bylo rozhodnuto, že bude realizován formou mobilního fotovoltaického systému s flexibilní kapacitou akumulátorů.

Při návrhu bylo postupováno podle metodiky uvedené v teoretické části práce, s přihlédnutím ke specifikům mobilního systému. Většina ostrovních fotovoltaických systémů je konstruována pro pevné trvalé uložení. To znamená, že trvale umístěný fotovoltaický modul má k dispozici vždy celodenní množství slunečního záření. Proto je možné použít menší modul, který dobíjí delší dobu větší akumulátor, z něhož lze nárazově odebírat vyšší výkon. U mobilního systému s trvale připojenou zátěží je nutné fotovoltaický modul dimenzovat tak, aby jeho výkon byl vyšší, než výkon připojených spotřebičů a výkonový přebytek mohl dobíjet akumulátor.

Nejprve bylo zjištěno množství energie potřebné pro napájení přístrojů. Bylo vycházeno z požadavku na minimálně 6 hodin provozu. Napájené přístroje jsou:

- Notebook, napájecí zdroj 65 W
- Mikroskop Olympus s prosvětlovací LED diodou 2,5 W

Reálný příkon notebooku se pohybuje v rozmezí 35–65 W, v závislosti na stavu nabití jeho akumulátoru. Při plně nabitém vnitřním akumulátoru je to 35–40 W. S touto hodnotou bylo počítáno v kalkulaci, s tím, že notebook bude používán plně nabitý a případný větší výpadek bude pokryt z jeho akumulátoru.

$$W = P_1 \cdot T_1 + P_2 \cdot T_2 = 40 \cdot 6 + 2,5 \cdot 6 = 255 \text{ Wh} \quad (3.1)$$

Dalším krokem bylo stanovení výkonu fotovoltaického modulu. U stacionárních systémů se jako základ pro výpočet používá průměrná doba plného slunečního záření z nejslabšího období. Bylo rozhodnuto, že systém bude dimenzován pro období od dubna do září, kdy se průměrná délka plného záření pohybuje od 3 do 5 hodin denně. Nejslabším obdobím je září s hodnotou 3,2. Zde řešený mobilní systém však nebude v provozu celodenně, ale již

zmíněných 6 hodin. Průměrná délka dne v září, je po odečtení jedné hodiny po východu a jedné hodiny před západem slunce, kdy je výkon záření velmi malý, přibližně 10 hodin. [12] Plné sluneční záření tedy trvá průměrně 32 % z této doby. Pro výpočet by bylo možné použít hodnotu 32 % ze 6 hodin, tj. 1,92, a to v případě každodenního provozu. Lze ale předpokládat, že systém nebude v době nepříznivého počasí používán, čímž dojde k navýšení doby plného záření. Přesnou dobu bylo proto velmi obtížné určit, a byla tedy odhadem zvolena hodnota 2,5 hodiny. S použitím koeficientů z tabulky 2.2 byl pomocí vzorce 2.4 vypočítán potřebný výkon modulu. Nebyly uvažovány ztráty z nesouladu, z důvodu použití MPPT regulátoru a byl použit koeficient pro nízkou teplotu.

$$P_{FV} = \frac{W}{2,5 \cdot Z_3 \cdot Z_4 \cdot V_L \cdot V_U} = \frac{255}{2,5 \cdot 1,25 \cdot 0,98 \cdot 0,94 \cdot 0,9} = 98,4 \text{ Wp} \quad (3.2)$$

Při návrhu kapacity akumulátoru byl brán v úvahu požadavek na minimální velikost 160 Wh, s tím, že pro vývoj a otestování bude použita kapacita poloviční, s možností pozdějšího rozšíření. Výpočet podle vzorce nebyl prováděn z důvodu mobilního provedení systému s omezenou dobou použití. Přesná hodnota byla určena při výběru konkrétního typu, podle doporučené hloubky vybití DOD (Depth of Discharge).

3.2 Výběr komponentů

S ohledem na výpočet byl vybírán fotovoltaický modul s výkonem 100 Wp a vyšším. Dalším kritériem bylo mobilní použití, a tedy případná možnost složení a lepšího transportu. Po průzkumu možností byl zvolen skládací, 100 Wp modul, dodávaný firmou GWL/Power. Jedná se o modul složený z vysokovýkonných krystalických článků se zadním kontaktem.

Jeho parametry jsou:

Hmotnost (kg)	4,84
Jmenovitý výkon (Wp)	100
Napětí v bodě max. výkonu (V)	17,8
Proud v bodě max. výkonu (A)	5,62
Napětí na prázdko (V)	21,6
Zkratový proud (A)	5,97
Účinnost solárního panelu (%)	19,9

Jmenovité napětí (V)	18
Počet článků	32 [13]

Vysokovýkonné krystalické křemíkové články, ze kterých je složen, vynikají nadprůměrnou účinností a širokou spektrální účinností, takže panel je schopen, oproti jiným typům krystalických článků, dodávat minimální výkon i při zatažené obloze.



Obrázek 3.1: Skládací fotovoltaický modul GWL/Power 100 W_p. [13]

Jmenovité napětí 18 V by vedlo ke ztrátám z nesouladu, a proto bylo rozhodnuto v systému použít MPPT nabíjecí regulátor. Po porovnání různých typů byl vybrán regulátor Tracer1210A firmy EPsolar.

Základní parametry:

Maximální výkon (W)	130/240
Hmotnost (kg)	0,6
Max. výstupní proud (A)	10
Jenovité napětí (V)	12/24
Max. vstupní napětí (V)	100
Technologie	MPPT
Účinnost algoritmu MPPT (%)	99,5
Účinnost konverze (%)	95-98 [14]



Obrázek 3.2: MPPT nabíjecí regulátor Tracer 1210A. [15]

Regulátor je vybaven ochranou proti přepólování, nadproudu a zkratu vstupů a výstupů, ochranou proti přebíjení a hlubokému vybití akumulátorů, ochranou proti přehřátí regulátoru a akumulátoru. Dále disponuje stavovým displejem, zobrazujícím stav systému a umožňujícím programování regulátoru. Programování je také možné pomocí sběrnice RS-485 s Modbus komunikačním protokolem, k jejímuž připojení slouží konektor RJ45. Komunikace s obslužným software v PC nebo smartfone probíhá prostřednictvím kabelu RJ45-USB, tvořícím volitelné příslušenství. Regulátor také umožňuje připojení externího teplotního snímače pro monitoring, tepelnou kompenzaci a ochranu akumulátorů. Další důležitou vlastností je možnost uživatelského nastavení nabíjecích parametrů, což umožňuje použití prakticky jakéhokoli typu akumulátoru. Regulátor obsahuje 3 pevná nastavení typu akumulátoru pro olověné zaplavené (Flooded), gelové (Gel) nebo bezúdržbové AGM (Sealed) akumulátory. Poslední verze obslužného softwaru nabízí další předdefinované nastavení pro Li-ion LiFePO₄ (LFP) nebo LiNiCoMnO₂ (NMC) akumulátory. [16]

Výběr akumulátoru byl ovlivněn požadavkem na mobilitu systému a tím na rozumnou hmotnost, umožňující snadný transport. S ohledem na tento parametr byl vybrán LiFePO₄ akumulátor LP12V11AH-BT výrobce GWL/Power. Kapacita tohoto akumulátoru je 132 Wh a při výrobcem doporučené hloubce vybití DOD 80 % je k dispozici 105,6 Wh, což splňuje dříve danou podmínku na alespoň 80 Wh.

Parametry akumulátoru:

Hmotnost (kg)	1.6
Jmenovité napětí (V)	12
Kapacita (Ah)	11

Max. vybíjecí proud (A)	30
Optimální vybíjecí proud (A)	15
Max. nabíjecí proud (A)	15
Optimální nabíjecí proud (A)	6 [17]



Obrázek 3.3: akumulátor LP12V11AH-BT. [18]

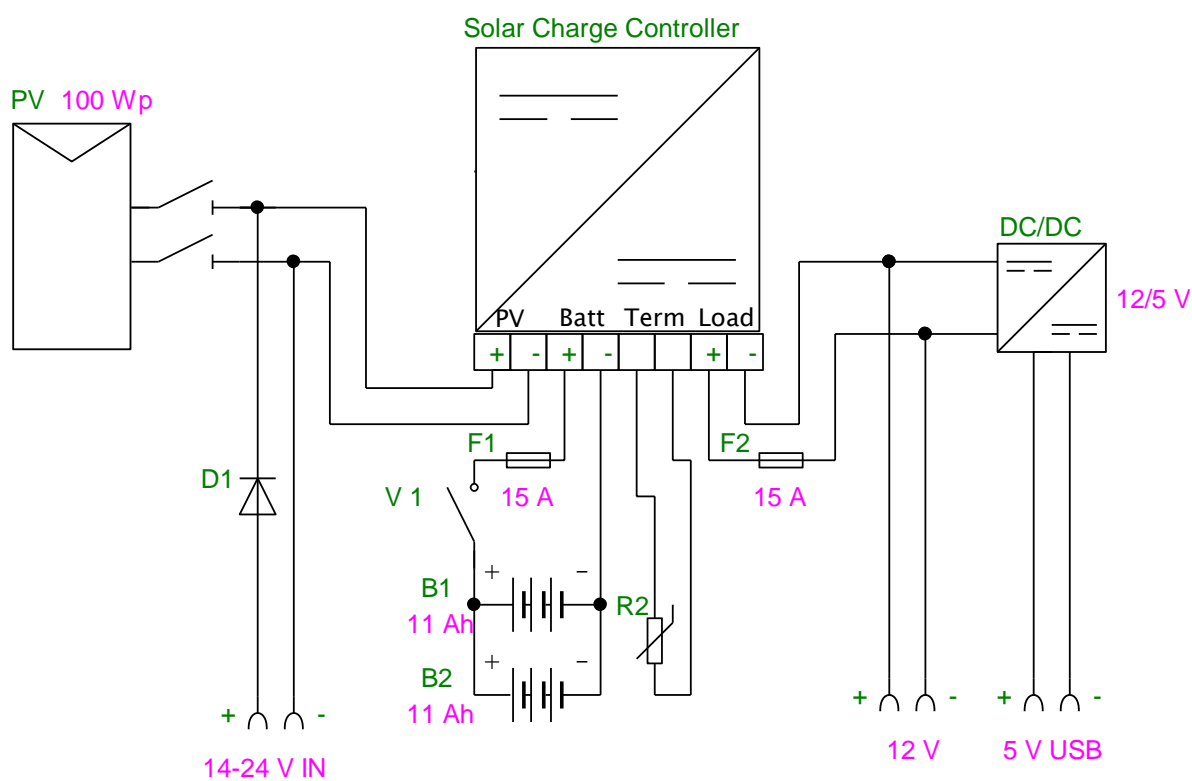
Akumulátor je v pouzdře standardizovaných rozměrů GEL baterií s vestavěným PCM (Protection Circuit Module). Toto PCM zabezpečuje ochranu před hlubokým vybitím nebo přebitím a umožňuje maximální vybíjecí proud 30 A. Akumulátor je také vybaven Bluetooth modulem, který zobrazuje prostřednictvím aplikace v chytrém telefonu, stav nabití SOC % (State of charge), celkové napětí akumulátoru, napětí každého článku, aktuální proud nabíjení i vybíjení, přibližný počet nabíjecích cyklů a vnitřní teplotu akumulátoru.

3.3 Realizace systému

Jedním z požadavků na systém byla možnost dobíjení akumulátorů i z jiného zdroje než fotovoltaického modulu. Z tohoto důvodu byl do zapojení přidán konektor pro připojení externího zdroje napájení na vstup nabíjecího regulátoru. Konektor je chráněn proti přítomnosti napětí modulu diodou v závěrném směru. Bylo uvažováno o ochraně diodou i pro modul, ale nebyla použita z důvodu napěťového úbytku, který by snižoval výkon modulu. Byl použit externí teplotní snímač pro tepelnou kompenzaci nabíjení. Výstup ze systému byl proveden pomocí automobilové zásuvky 12 V. Požadavek na výstup 5 V byl řešen použitím Step-down DC/DC měniče v kompaktním modulu opatřeném dvěma USB konektory. Dimenzování průřezu vodičů bylo přepočítáno podle vzorce 2.8 v souladu s požadavkem na minimální ztráty.

$$S = \frac{L \cdot P}{0,03 \cdot U^2 \cdot \gamma} = \frac{2 \cdot 100}{0,03 \cdot 12^2 \cdot 56} = 0,8 \text{ mm}^2 \quad (3.3)$$

Výsledku vyhovuje provedení přívodu použitého modulu ve formě kabelu $2 \times 1,5 \text{ mm}^2$, proto i u zbývající kabeláže na vstupu regulátoru byl použit tento průřez vodičů. V obvodu akumulátoru a výstupu byl zvolen průřez vodičů $2,5 \text{ mm}^2$ a vedení je jištěno pojistkami 15 A. Barevné provedení vodičů je: kladný pól – červená, záporný pól – černá. Zapojení systému bylo realizováno podle schématu na obrázku 3.4 a vestavěno do elektromontážní krabice. Nastavení regulátoru proběhlo prostřednictvím obslužného programu v PC s použitím hodnot pro LiFePO₄ akumulátory v souladu z datasheetem akumulátoru.



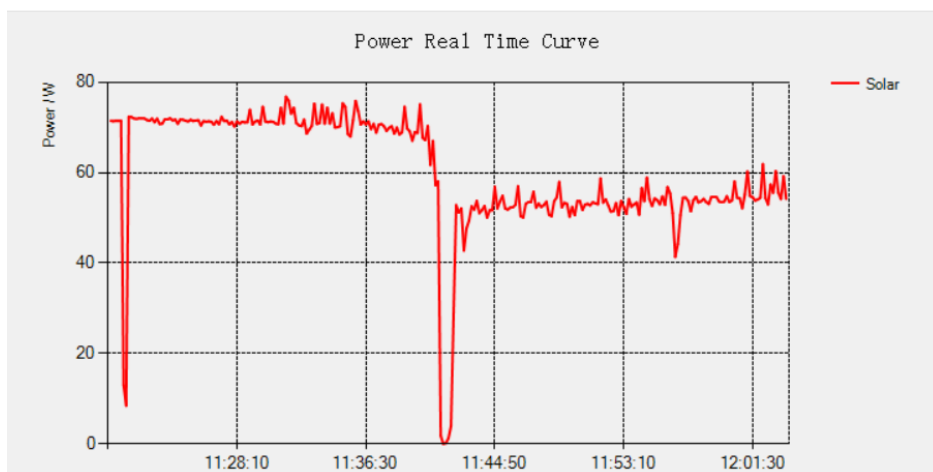
Obrázek 3.4: Schéma zapojení systému, nakresleno v programu ProfiCAD pro domácnost.



Obrázek 3.5: Zhotovený systém, foto autor.

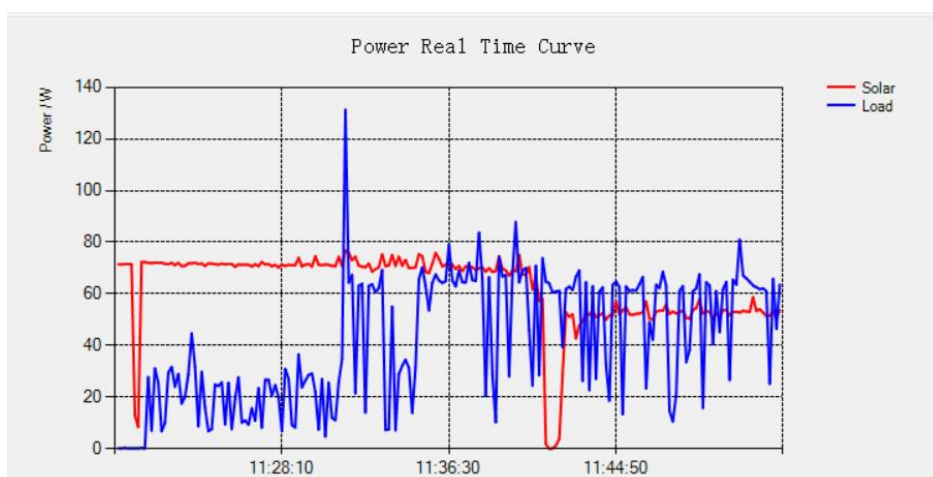
3.4 Měření výkonu systému

Předmětem měření výkonu bylo ověření vlivu náklonu fotovoltaického modulu na jeho výkon. Jelikož použitý modul je vyroben z monokrystalických článků, které nedokáží dobře zpracovávat difúzní sluneční záření, je náklon modulu v obdobích nízké výšky slunce nad obzorem velmi důležitý. Měření bylo provedeno pomocí obslužného softwaru, který umožňuje zobrazení a záznam prakticky všech provozních hodnot systému. Průběh těchto hodnot je přímo zobrazován v grafu. Měření se uskutečnilo na začátku dubna, kdy se koeficient náklonu modulů 35° podle Meteonormu 7.2, pohybuje okolo 1,2. Výsledky potvrdily pokles výkonu o 30 % při vodorovné poloze modulu.



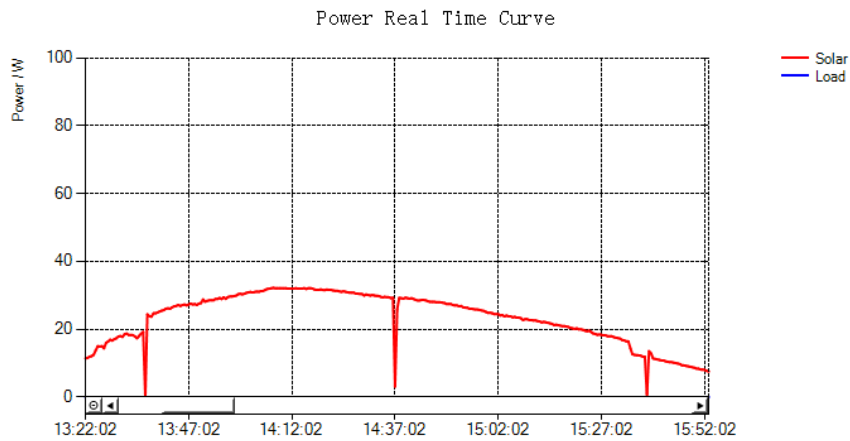
Obrázek 3.6: Graf poklesu výkonu ve vodorovné poloze fotovoltaického modulu.

V této poloze již modul nestačí pokrýt spotřebu notebooku, jak je znázorněno na dalším grafu. Bylo proto rozhodnuto o doplnění podpěrného systému, který umožní náklon modulu.

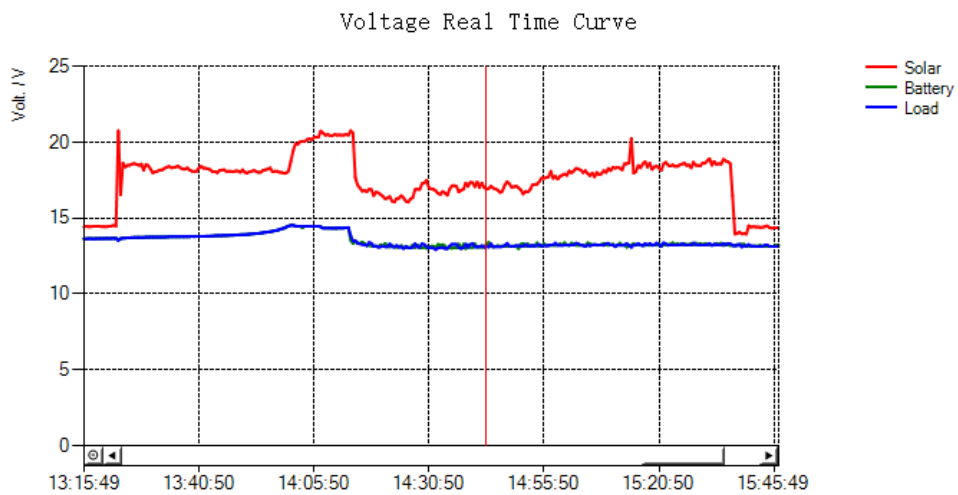


Obrázek 3.7: Graf průběhu výkonu fotovoltaického modulu – červená linie, průběh odběru notebooku – modrá linie.

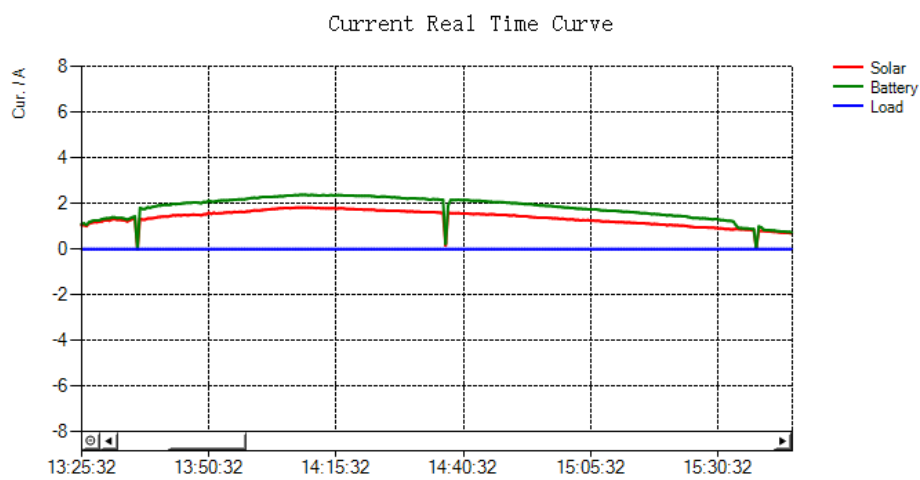
Dalším předmětem měření bylo ověření činnosti regulátoru při regulaci nabíjení v bodě MPP. Obrázek 3.8 znázorňuje průběh výkonu modulu v čase. Na obrázku 3.9 je vidět, jak při nízkém výkonu regulátor kopíruje napětí akumulátoru a při růstu výkonu nastavuje napětí U_{MPP} tj. cca 18 V. Obrázek 3.10 ukazuje ve stejném čase zvýšení nabíjecího proudu.



Obrázek 3.8: Průběh výkonu fotovoltaického modulu.



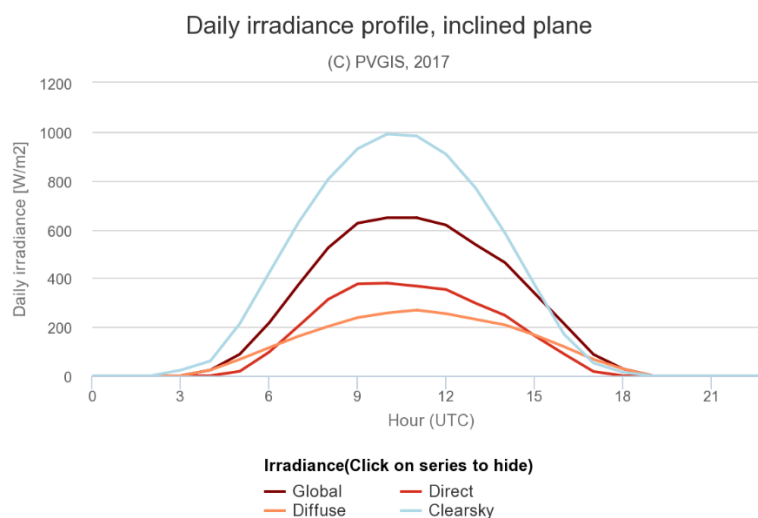
Obrázek 3.9: Průběh nastavení napětí regulátorem.



Obrázek 3.10: Průběh nabíjecího proudu.

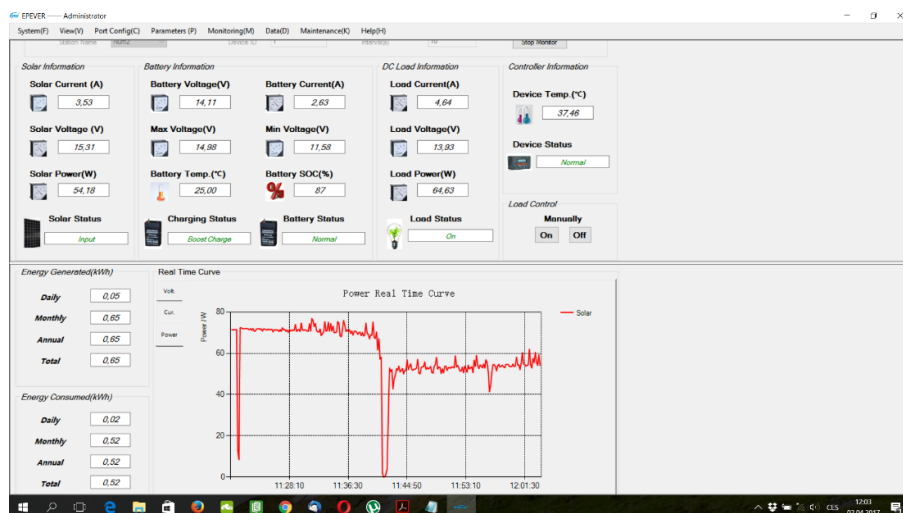
3.5 Provoz a obsluha systému

Při provozu od ranních hodin je nutné nabít akumulátor předem, pro pokrytí spotřeby přístrojů do doby dostatečného výkonu fotovoltaického modulu.



Obrázek 3.11: Graf denního průběhu výkonu slunečního záření, srpen, České Budějovice, zdroj: PVGIS 2017.

Činnost systému je vhodné monitorovat prostřednictvím softwaru pro chytré telefony nebo pro PC, dostupných na stránkách výrobce: www.epsolarpv.com.



Obrázek 3.12: Screenshot obslužného programu regulátoru.

Program zobrazuje veškeré provozní hodnoty a umožňuje jejich archivaci. Většina provozních hodnot i poruchových stavů je rovněž zobrazována na displeji regulátoru. Mezi

jednotlivými hodnotami lze přepínat pomocí ovládacích tlačítek. Těmito tlačítky se zároveň provádí programování regulátoru. Před manipulací s tlačítky je důrazně doporučeno prostudování manuálu, dostupného rovněž na stránkách výrobce, aby nedošlo k nechtěné změně nastavení regulátoru. Nesprávné nabíjecí hodnoty mohou vést k poškození akumulátoru. Nebezpečný stav by neměl nastat díky vestavěné ochraně akumulátoru.

Výstup regulátoru, na který jsou v tomto zapojení připojeny vývody pro napájení spotřebičů, je ovládán řídicím obvodem, umožňujícím programové spínání. Regulátor je nastaven na trvalé sepnutí, ale občas se po zapnutí výstup nesepe a je nutné ho zapnout ručně tlačítkem enter.

Po ukončení provozu je nutné vypnout hlavní vypínač. Vlastní spotřeba regulátoru je 3,5 W a v zapnutém stavu způsobí během krátké doby hluboké vybití akumulátoru. Nabíjení se provádí pomocí napájecího zdroje notebooku připojeného do konektoru pro externí zdroj. Pro spuštění nabíjení musí mít externí zdroj napětí nejméně 14 V. V době nabíjení nesmí být připojen fotovoltaický modul. Pokud systém nebude delší dobu používán, je nezbytně nutné, nejméně jednou měsíčně kontrolovat stav nabití akumulátoru a při poklesu pod 50 % akumulátor dobít. Kontrola se provádí pomocí aplikace pro chytrý telefon s názvem GWL/Greeneye, dostupné pro Android i Apple iOS.



Obrázek 3.13: Screenshot aplikace pro kontrolu akumulátoru. [19]

Při poklesu napětí akumulátoru pod 8 V, vnitřní PCM odpojí napětí na svorkách akumulátoru, ale Bluetooth dál vysílá, což může vést k nevratnému poškození akumulátoru.

4 Závěr

Cíle práce se podařilo naplnit. V teoretické části byl podán základní přehled problematiky malých ostrovních systémů. Byl navržen a vyroben napájecí systém kompaktních rozměrů, splňující zadávací podmínky. Zvolením lithiových akumulátorů bylo, oproti komerčně vyráběným systémům, využívajícím převážně olovené akumulátory, dosaženo výrazné snížení hmotnosti a prodloužení životnosti. Použitím MPPT regulátoru a vysokovýkonných krystalických křemíkových článků byl rovněž minimalizován rozměr potřebného fotovoltaického modulu. Konstrukce systému umožňuje případné další navýšení akumulátorové kapacity.

5 Reference

- [1] MERTENS, Konrad. *Photovoltaics: fundamentals, technology and practice*. 1 2014. Wiley, 2014. ISBN 9781118634165.
- [2] Konrad Mertens: Photovoltaics - Fundamentals, Technology and Practice. In: *K. Mertens: textbook-pv.org* [online]. Wiley, 2014 [cit. 2017-12-10]. Dostupné z: <http://www.textbook-pv.org./figures.html>
- [3] HASELHUHN, Ralf a Petr MAULE. *Fotovoltaické systémy: energetická příručka : pro elektrikáře, techniky, instalatéry, projektanty, architekty, inženýry, energetiky, manažery, stavitele, studenty, učitele, ostatní odborné a profesní soukromé nebo veřejné instituce a zájemce o fotovoltaický obor a energetickou nezávislost*. 1. české vydání, rev. 1. Přeložil Anna ROHÁČOVÁ, přeložil Pavel ROHÁČ, přeložil Anna ŽENÍŠKOVÁ, přeložil Eva HOŘEJŠÍ, přeložil Jana KLAMO, přeložil Jitka HICKOVÁ, přeložil Veronika MARTINOVSKÁ, přeložil Tomáš BAROCH. Plzeň: Česká fotovoltaická asociace, 2017. ISBN 978-80-906281-5-1.

- [4] *Global Horizontal Irradiation (GHI)* [online]. In: . b.r. [cit. 2017-12-10]. Dostupné z: <https://solargis.com/assets/graphic/free-map/GHI/Solargis-Czech-Republic-GHI-solar-resource-map-cz.png>
- [5] Optimální orientace a sklon fotovoltaických panelů. *Tzb-info* [online]. Křenova 438/3, 162 00 Praha 6: Topinfo, 2014 [cit. 2017-12-10]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/114865-optimalni-orientace-a-sklon-fotovoltaickych-panelu>
- [6] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Vyd. 1. Brno: VUTIUM, 2000. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 80-214-1869-9.
- [7] LYNN, Paul. *Electricity from sunlight: an introduction to photovoltaics*. Chichester: Wiley, 2010. ISBN 978-0-470-74560-1.
- [8] BENDIB, Boualem, Hocine BELMILI a Fateh KRIM. A survey of the most used MPPT methods: Conventional and advanced algorithms applied for photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2015, **45**, 637-648 [cit. 2017-11-15]. DOI: 10.1016/j.rser.2015.02.009. ISSN 13640321. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115000970?via%3Dihub#s0060>
- [9] *Konstrukce, provoz a údržba akumulátorů aneb prodlužte životnost vaší baterie* [online]. 2016 [cit. 2017-12-10]. Dostupné z: <https://www.stavebnitechnika.cz/clanky/konstrukce-provoz-a-udrzba-akumulatoru-aneb-prodluzte-zivotnost-vasi-baterie>
- [10] *Battery University* [online]. Richmond, British Columbia, Canada: Cadex Electronics Inc., 2017 [cit. 2017-12-10]. Dostupné z: <http://batteryuniversity.com/>
- [11] ADELHELM, Philipp, Pascal HARTMANN, Conrad BENDER, Martin BUSCHE, Christine EUFINGER a Juergen JANEK. From lithium to sodium: cell chemistry of room temperature sodium–air and sodium–sulfur batteries. *Beilstein Journal of*

Nanotechnology [online]. 2015, **6**, 1016-1055 [cit. 2017-12-10]. DOI: 10.3762/bjnano.6.105. ISSN 2190-4286. Dostupné z: <http://www.beilstein-journals.org/bjnano/content/6/1/105>

- [12] Východ západ slunce. Meteogram.cz [online]. b.r. [cit. 2017-12-11]. Dostupné z: <http://www.meteogram.cz/vychod-zapad-slunce/>
- [13] *GWL/Power Armádní* přenosný 100Wp solární panel. I4wifi.cz [online]. b.r. [cit. 2017-12-10]. Dostupné z: <https://www.i4wifi.cz/Alternativni-napajeni/Armadni-prenosny-100Wp-solarni-panel-tenkovrstvy-MPPT-18V.html>
- [14] Datasheet Tracer 1210A [online]. In: . b.r. [cit. 2017-12-10]. Dostupné z: https://files.i4wifi.cz/inc/_doc/attach/StoItem/4762/specification-tracerA.pdf
- [15] *GWL/Power Solární* MPPT regulátor. In: .i4wifi.cz [online]. b.r. [cit. 2017-12-10]. Dostupné z: <https://www.i4wifi.cz/index.php?cl=moredetails&cnid=955&anid=4762>
- [16] *Manual* Tracer 1210A [online]. In: . b.r. [cit. 2017-12-10]. Dostupné z: https://files.i4wifi.cz/inc/_doc/attach/StoItem/4762/tracerA-manual.pdf
- [17] Datasheet-LP12V11AH-BT [online]. In: . b.r. [cit. 2017-12-10]. Dostupné z: https://files.i4wifi.cz/inc/_doc/attach/StoItem/4897/Datasheet-LP12V11AH-BT.pdf
- [18] *GWL/Power LiFePO4* baterie 12V/11Ah. In: *I4wifi.cz* [online]. b.r. [cit. 2017-12-10]. Dostupné z: <https://www.i4wifi.cz/index.php?cl=moredetails&cnid=494&anid=4897>
- [19] *GWL/Power LiFePO4* baterie 12V/11Ah. In: *I4wifi.cz* [online]. b.r. [cit. 2017-12-10]. Dostupné z: https://files.i4wifi.cz/inc/_img/bt/app-530.jpg