

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

MOBILNÍ FOTOVOLTAICKÁ ELEKTRÁRNA

PORTABLE PHOTOVOLTAIC POWER PLANT

SEMESTRÁLNÍ PRÁCE

SEMESTER THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Klíč

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D.

BRNO 2018

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektroenergetika**
Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Tomáš Klíč

ID: 164871

Ročník: 2

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Mobilní fotovoltaická elektrárna

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Zmapování současného stavu v této oblasti na trhu
2. Návrh rámcové koncepce a výběr vhodných komponent
3. Vytvoření konstrukční dokumentace, výpočty a dimenzování jednotlivých částí
4. Realizace elektrárny v kufříkovém provedení
5. Měření na zrealizovaném vzorku, vyhodnocení technických parametrů

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Literatura je stanovena dle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 21.5.2018

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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 částí druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

KLÍČ, T. Mobilní fotovoltaická elektrárna. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 79 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D..

Jako autor uvedené diplomové (bakalářské) práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové 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.

.....

ABSTRAKT

Tato diplomová práce je rozdělena na dvě části, a to část teoretickou a praktickou.

V teoretické části je problematika rozebrána od současného stavu elektroenergetiky, podílu výroby jednotlivých zdrojů, trhu s fotovoltaickými a mobilními fotovoltaickými systémy přes popis teorie slunečního záření a všech potřebných komponentů k sestavení ostrovní fotovoltaické elektrárny.

Praktická část se zabývá dimenzováním, výběrem vyhovujících komponent a samotným vlastním návrhem a realizací mobilní fotovoltaické elektrárny.

KLÍČOVÁ SLOVA: elektrárna; fotovoltaika; mobilní elektrárna; mobilní fotovoltaická elektrárna; elektroenergetika, obnovitelné zdroje

ABSTRACT

This diploma thesis is divided into two parts, namely the theoretical and practical part.

In the theoretical part, the issue is dismantled from the current state of electric power, share the production of individual sources, the market for photovoltaic and mobile photovoltaic systems through the description of the theory of solar radiation and all the necessary components to build the isolated photovoltaic power plant.

The practical part deals with dimensioning, selection of suitable components and the actual one own design and implementation of a mobile photovoltaic power plant.

KEY WORDS: power plant; fovoltaics; portable power station; portable photovoltaic power plant; electricity, renewable sources

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	8
SEZNAM TABULEK	11
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	12
1 ÚVOD	14
2 SOUČASNÝ STAV ELEKTROENERGETIKY	15
2.1 VÝVOJ PODÍLU ZDROJŮ NA VÝROBĚ ELEKTRICKÉ ENERGIE BĚHEM LET	16
2.2 VÝVOJ INSTALOVANÉHO VÝKONU FV BĚHEM LET.....	18
2.3 VÝVOJ TRHU S FOTOVOLTAICKÝMI SYSTÉMY	20
2.4 MOBILNÍ FOTOVOLTAICKÁ ELEKTRÁRNA VE SVĚTĚ	22
2.4.1 PRVNÍ MYŠLENKA MOBILNÍ FOTOVOLTAICKÉ ELEKTRÁRNY	22
2.4.2 ROZDĚLENÍ	23
3 TEORIE ZÁŘENÍ, POPIS JEDNOTLIVÝCH KOMPONENT	26
3.1 SLUNEČNÍ ZÁŘENÍ	26
3.2 FOTOVOLTAICKÉ ČLÁNKY	27
3.2.1 NÁHRADNÍ SCHÉMA FOTOČLÁNKU	29
3.2.2 VOLAMPÉROVÁ CHARAKTERISTIKA	29
3.2.3 MATERIÁLY PRO FOTOVOLTAICKÉ ČLÁNKY	31
3.3 STRÍDAČE.....	34
3.3.1 ÚČINNOST	36
3.3.2 ZAPOJENÍ STRÍDAČŮ	37
3.3.3 ROZSAH MPP.....	37
3.4 REGULÁTORY	37
3.4.1 PRINCIPY NABÍJENÍ	38
3.5 AKUMULÁTORY.....	40
3.5.1 OLOVĚNÉ BATERIE.....	40
3.5.2 LITHIOVÉ AKUMULÁTORY	41
3.5.3 BATERIE LiFePO ₄	42
3.5.4 NIKL-KADMIOVÉ AKUMULÁTORY	42
3.5.5 BATERIE SODIUM-SULFUR.....	43
3.5.6 PRŮTOKOVÉ BATERIE	44
4 NÁVRH A REALIZACE MOBILNÍ FOTOVOLTAICKÉ ELEKTRÁRNY.....	45
4.1 NÁVRH RÁMCOVÉ KONCEPCE	45
4.2 DIMENZOVÁNÍ A VÝBĚR JEDNOTLIVÝCH KOMPONENTŮ.....	46
4.2.1 FOTOVOLTAICKÉ PANELE	46
4.2.2 AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE	47
4.2.3 STRÍDAČ	48
4.2.4 REGULÁTOR	50
4.2.5 MONITORING.....	53
4.2.6 KABELY A VODIČE	56
4.2.7 OCHRANY.....	62
4.2.8 BALANCOVÁNÍ NAPĚTÍ	65

4.3 REALIZACE MOBILNÍ FOTOVOLTAICKÉ ELEKTRÁRNY	66
4.3.1 PROPOJOVACÍ BOX	66
4.3.2 DRUHÁ ČÁST ELEKTRÁRNY	68
4.3.3 PRVNÍ ČÁST ELEKTRÁRNY	69
4.3.4 MĚŘENÍ A MONITORING - ARDUINO.....	72
4.4 ROZPOČET	75
5 ZÁVĚR.....	76
6 POUŽITÁ LITERATURA	77
PŘÍLOHY	79

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1. Struktura světové výroby elektřiny v zemích OECD v roce 2005[4]</i>	16
<i>Obrázek 2. Struktura světové výroby elektřiny v zemích OECD v roce 2015[4]</i>	16
<i>Obrázek 3. Současný a budoucí vývoj podílů zdrojů na výrobě elektrické energie[4]</i>	17
<i>Obrázek 4. Současný a budoucí vývoj podílu jednotlivých OZE na výrobě elektrické energie[4]</i>	17
<i>Obrázek 5. Vývoj instalovaného výkonu fotovoltaiky ve světě[5]</i>	18
<i>Obrázek 6. Celkový instalovaný výkon FV v jednotlivých zemích koncem roku 2016[5]</i>	19
<i>Obrázek 7. Rozložení produkce FV panelů během let [5]</i>	20
<i>Obrázek 8. Celosvětová roční produkce za poslední desetiletí[5]</i>	20
<i>Obrázek 9. Vývoj cen FV elektráren různých rozsahů během let[9]</i>	21
<i>Obrázek 10. Koncept mobilní fotovoltaické elektrárny podle patentu CMSEP[15]</i>	22
<i>Obrázek 11. Příklad nejmenší mobilní fotovoltaické elektrárny [17]</i>	23
<i>Obrázek 12. Solární generátor Goal Zero Yeti 1250[17]</i>	23
<i>Obrázek 13. Solární generátor SOLARE POWER™ CUBE 1500 [11]</i>	24
<i>Obrázek 14. Malá mobilní fotovoltaická elektrárna[11]</i>	24
<i>Obrázek 15. Solární generátor MS-375 [11]</i>	25
<i>Obrázek 16. Největší fotovoltaická elektrárna[16]</i>	25
<i>Obrázek 17. Rozdělení výkonu dopadající sluneční energie na zemi[14]</i>	26
<i>Obrázek 18. Znázornění principu fotoelektrického jevu[14]</i>	28
<i>Obrázek 19. Princip fotovoltaického článku[14]</i>	28
<i>Obrázek 20. Náhradní schéma fotovoltaického článku popsaný elementárními elektrickými součástkami[14]</i>	29
<i>Obrázek 21. Voltampérová charakteristika fotovoltaického článku[14]</i>	29
<i>Obrázek 22. Změna charakteristiky vlivem teploty[14]</i>	31
<i>Obrázek 23. Porovnání výtěžnost jednotlivých technologií prováděné při 25°C[13]</i>	33
<i>Obrázek 24. Ilustrační fotografie invertoru</i>	34
<i>Obrázek 25. Střídač s výstupním síťovým transformátorem [1]</i>	35
<i>Obrázek 26. Střídač bez výstupního transformátoru [1]</i>	35
<i>Obrázek 27. Rozdíl závislosti účinnosti na vstupním napětí u střídačů s a bez transformátorů[2]</i>	36
<i>Obrázek 28. Zapojení střídačů - a) centrální, b) řetězový, c) modulový [13]</i>	37
<i>Obrázek 29. VA charakteristika monokrystalického panelu 12V/100W[2]</i>	38
<i>Obrázek 30. Porovnání VA charakteristik dvou panelů [14]</i>	39
<i>Obrázek 31. Olověná baterie</i>	40

<i>Obrázek 32. LiFePo4 článek</i>	42
<i>Obrázek 33. NiCd článek</i>	42
<i>Obrázek 34. Schéma sodíkové baterie. [13]</i>	43
<i>Obrázek 35. Princip průtokové baterie [13]</i>	44
<i>Obrázek 36. KIS Clipper Box M černý-šedé víko 60l</i>	45
<i>Obrázek 37. Flexibilní fotovoltaický panel - Sunny Flexible Mono 100 Wp [19]</i>	46
<i>Obrázek 38. Akumulátorový článek LiFePo4, 40Ah</i>	47
<i>Obrázek 39. Střídač TRONIC TSW 300 A1 [18]</i>	48
<i>Obrázek 40. Regulátor</i>	51
<i>Obrázek 41. Schematicky znázorněné paralelní spojení všech FV panelů</i>	52
<i>Obrázek 42. Klon Arduino Mega 2560</i>	53
<i>Obrázek 43. Zobrazovací grafický displej 128x64</i>	53
<i>Obrázek 44. Tlačítka pro ovládání zobrazení na displeji</i>	54
<i>Obrázek 45. Zobrazení funkce Hallovy sondy</i>	54
<i>Obrázek 46. 5A,20A a 50A Hallův sensor</i>	55
<i>Obrázek 47. Potenciometr</i>	55
<i>Obrázek 48. Měnič napětí 12/5V</i>	56
<i>Obrázek 49. Průběh oteplení kabelu 2x2,5mm² při proudu 5,4A a teplotě okolí 40°C</i>	57
<i>Obrázek 50. . Průběh oteplení vodiče 1x10mm² při průchodu proudu 27A a teplotě okolí 40°C</i> .58	
<i>Obrázek 51. Průběh oteplení vodiče 1x10mm² při průchodu proudu 40A a teplotě okolí 50°C</i> ...59	
<i>Obrázek 52. Průběh oteplení vodiče 1x2,5mm² při průchodu proudu 15A a teplotě okolí 50°C</i> ..60	
<i>Obrázek 53. Průběh oteplení vodiče 1x1,5mm² při průchodu proudu 3,1A a teplotě okolí 50°C</i> .61	
<i>Obrázek 54. Jednopolový a třípólkový jistič značky Noark</i>	62
<i>Obrázek 55. Automobilová šroubovací pojistka MIDIVAL 50A s pouzdrem</i>	63
<i>Obrázek 56. Battery Management System (BMS) pro LiFePo4</i>	64
<i>Obrázek 57. Balancovací modul pro LiFePo4</i>	65
<i>Obrázek 58. Propojovací box pro panely</i>	66
<i>Obrázek 59. Propojovací box pro panely</i>	66
<i>Obrázek 60. Schottkyho diody MBR1545CTG</i>	67
<i>Obrázek 61. Anderson konektor pro připojení k elektrárně</i>	67
<i>Obrázek 62. Usazení regulátoru a střídače</i>	68
<i>Obrázek 63. Přizemní patro elektrárny</i>	69
<i>Obrázek 64. Přizemní patro elektrárny</i>	70

<i>Obrázek 65. Elektrárna během testování své funkčnosti před finálním usazením do přepravního boxu</i>	<i>70</i>
<i>Obrázek 66. Finální usazení elektrárny 1</i>	<i>71</i>
<i>Obrázek 67. Finální usazení elektrárny 2</i>	<i>71</i>
<i>Obrázek 68. Finální usazení elektrárny 3</i>	<i>71</i>
<i>Obrázek 69. Princip děliče napětí</i>	<i>72</i>
<i>Obrázek 70. Vzhled první obrazovky, která se objeví při stisknutí tlačítka 1</i>	<i>73</i>
<i>Obrázek 71. Vzhled druhé obrazovky, která se objeví při stisknutí tlačítka 2</i>	<i>73</i>
<i>Obrázek 72. Vzhled třetí obrazovky, která se objeví při stisknutí tlačítka 3</i>	<i>73</i>
<i>Obrázek 73. . Vzhled čtvrté obrazovky, která se objeví při stisknutí tlačítka 4.....</i>	<i>74</i>
<i>Obrázek 74. Schéma zapojení mobilní fotovoltaické elektrárny</i>	<i>79</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1. Vývoj instalovaného výkonu fotovoltaiky ve světě[5]</i>	<i>18</i>
<i>Tabulka 2. Definice jednotlivých systémů [6]</i>	<i>21</i>
<i>Tabulka 3. Příklady hodnot součinitele znečištění v závislosti na typu oblasti[14]</i>	<i>27</i>
<i>Tabulka 4. Účinnosti fotovoltaických článků jednotlivých technologií[13].....</i>	<i>33</i>
<i>Tabulka 5. Vlastnosti nejpoužívanějších baterií [13]</i>	<i>41</i>
<i>Tabulka 6. Rozpočet projektu.....</i>	<i>75</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

<i>G20</i>	Skupina největších ekonomik světa	(-)
<i>OSN</i>	Organizace spojených národů	(-)
<i>OZE</i>	Obnovitelné zdroje energie	(-)
<i>SO₂</i>	Oxid siřičitý	(-)
<i>NO_x</i>	Oxid dusíku	(-)
<i>OECD</i>	Mezinárodní organizace 35 ekonomicky velmi vyspělých zemí světa	(-)
<i>CPP</i>	Distribuční transformační stanice	(-)
<i>FV</i>	Fotovoltaika	(-)
<i>NASA</i>	Národní úřad pro letectví a kosmonautiku	(-)
<i>I₀</i>	Solární konstanta	(W.m ⁻²)
<i>Z</i>	Součinitel znečištění	(-)
<i>A</i>	Plocha	(m ²)
<i>I_{PN}</i>	Intenzita kolmého slunečního záření	(W.m ⁻²)
<i>I_P</i>	Intenzita slunečního záření dopadající obecně na plochu	(W.m ⁻²)
<i>P</i>	Výkon fotovoltaického článku	(W)
<i>U_{mp}</i>	Napětí v bodě maximálního výkonu	(V)
<i>I_{mp}</i>	Proud v bodě maximálního výkonu	(A)
<i>FF</i>	Činitel plnění	(-)
<i>U_{0C}</i>	Napětí naprázdno	(V)
<i>I_{SC}</i>	Proud nakrátko	(A)
<i>η</i>	Účinnost	(%)
<i>P_{in}</i>	Výkon slunečního záření	(W)
<i>AM</i>	Součinitel Vzduchové hmoty (Air Mass)	(-)
<i>R_s</i>	Sériový odpor	(Ω)
<i>R_p</i>	Paralelní odpor	(Ω)
<i>MPPT</i>	Maximum power point tracking	(-)
<i>P_{PV}</i>	Výkon vybraného fotovoltaického panelu	(W)
<i>U_{bat}</i>	Hraniční napětí baterie	(V)
<i>I₂</i>	Proud na výstupní straně regulátoru	(A)
<i>STC</i>	Standardní testovací podmínky	(-)
<i>U₀₋₂₅</i>	Napětí panelů při teplotě -25°C	(°C)

U_0	Napětí naprázdno při 25°C	(°C)
t_{STC}	Teplota STC (25°C)	(°C)
t	Dimenzovaná teplota	(°C)
I_l	Proud na vstupu regulátoru (výstupu panelů)	(A)
I_{PV}	Proud panelu v bodě maximálního přenášeného výkonu	(A)
U_{reg}	Maximální provozní napětí regulátoru	(V)
I_{reg}	Maximální provozní proud regulátoru	(A)
U_H	Hallovo napětí	(V)
I_{ez1}	Ekvivalentní proud vyváděný z panelu respektující okolní teplotu	(A)
k_l	Přepočítávací součinitel respektující změnu teplotu od 30°C na vzduchu	(-)
$\Delta\vartheta$	Maximální oteplení způsobené proudem I_{ez}	(°C)
$\Delta\vartheta_1$	Oteplení v čase t od počátku průchodu proudem	(°C)
$\Delta\vartheta_z$	Maximální dovolené provozní oteplení	(°C)
ϑ	Celková teplota vodiče	(°C)
I_{ez}	Proud působící maximální oteplení	(A)
I_z	Proudová zatížitelnost vodiče	(A)
I_z	Proudová zatížitelnost vodiče	(A)
τ	Časová oteplovací konstanta	(s)
ϑ_0	Teplota okolí	(°C)
PVC	Polyvinylchlorid	(-)
I_{ez2}	Ekvivalentní proud vyváděný z regulátoru respektující okolní teplotu	(A)
P_{12V}	Předpokládaný výkon 12V spotřebiče	(W)
I_{ez3}	Ekvivalentní proud vyváděný z baterie do 12V výstupu	(A)
I_{ez4}	Ekvivalentní proud vyváděný z baterie do 5V výstupu	(A)
I_{poj}	Jmenovitý proud pojistky	(A)
I_{jis}	Jmenovitý proud jističe	(A)
SOC	Stav nabití (State of charge)	(%)
DOD	Hloubka vybití (Depth of discharge)	(%)

1 ÚVOD

Směr vývoje lidské společnosti je charakteristický vysokými nároky na spotřebu energií, zejména v průmyslově a ekonomicky vyspělých zemích. Tento trend byl zaznamenán ve všech zemích G20, což je skupina největších ekonomik světa. Podle studie britské energetické společnosti BP vzrostla spotřeba elektrické energie v roce 2015 o 1%, podobně jako v roce 2016, kde byl nárůst 1,1%. Nicméně se jedná o podprůměrné hodnoty ve srovnání s desetiletým průměrem 1,9% za rok. Podle predikce Energy Information Administration, amerického Ministerstva pro energii, má spotřeba elektrické energie vzrůst o cca 30%-40% do roku 2030. Jelikož je spotřeba z cca 60% pokrývána neobnovitelnými zdroji, jako je uhlí, ropa, plyn, což jsou neobnovitelné produkty a jejich vyčerpání se odhaduje do konce tohoto století v případě ropy a zemního plynu a v případě uhlí v průběhu dvou set let. Další nevýhoda neobnovitelných zdrojů je, že paralelně s produkcí elektrické energie produkuje vysoké emise, které tvoří 50% celkových emisí vytvářené člověkem, které negativně ovlivňují klima na zemi. S tímto zjištěním byla, během Klimatické konference v Paříži v roce 2015, dojednána Pařížská dohoda v rámci Rámcové úmluvy OSN o změně klimatu. Účelem dohody je udržení nárůstu globální průměrné teploty výrazně pod hranicí 2 °C oproti hodnotám před průmyslovou revolucí a úsilí o to, aby nárůst teploty nepřekročil hranici 1,5 °C oproti hodnotám před průmyslovou revolucí.[10]

V současné době se nabízí tři možnosti, jak bojovat s klimatickými změnami, a to:

- Zvýšit podíl výroby elektrické energie jaderných elektráren
- Zvyšovat účinnost klasických zdrojů
- Zvýšit podíl výroby obnovitelných zdrojů

Širšímu využití jaderné energie v současné době brání stále přetrvávající nedůvěra k bezpečnosti provozu těchto zařízení, spojená například s havárií v Černobylu. Další velkou nevýhodou jsou obrovské náklady na stavbu jaderné elektrárny a také odpadní materiál, který je radioaktivní po desítky tisíc let a musí se tedy skladovat v hlubinných úložištích.

Zvyšováním účinnosti klasických zdrojů je jeden z kroků směrem ke snížení emisí v energetice, nicméně zvyšování účinnosti je extrémně nákladné a má své hranice. Stále se nejedná o bezemisní energetiku a zásoby neobnovitelných zdrojů jsou stále vyčerpátné.

Ideálním řešením se může zdát aplikace OZE, jako je solární energie, energie vody, energie větru a další. Nicméně i OZE má svá úskalí, zejména jejich nepravidelnou dodávku elektrické energie a negativní vliv na elektrizační soustavu, která zatím nejsou vyřešena, a proto není možné, aby pokrývala celou spotřebu. O těchto úskalích tato práce nepojednává, protože se jí netýká.

Mobilní fotovoltaická elektrárna je něco, jako diesel generátor s tím, že využívá čistou a obnovitelnou energii ze slunce. [5] [10]

2 SOUČASNÝ STAV ELEKTROENERGETIKY

Obnovitelné zdroje elektrické energie se stávají stále větší částí globálního energetického mixu. Za posledních deset let některé technologie zaznamenaly až dvouciferný růst a počítá se, že tento růst bude pokračovat za předpokladu, že budou dodržena nevyhnutelná podporná opatření.

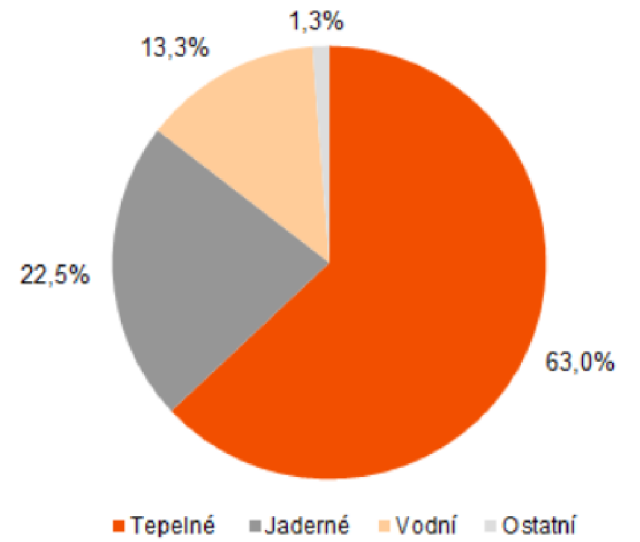
Za benefity OZE pro energetiku státu můžeme považovat:

- Energetickou bezpečnost a diverzitu. Obnovitelné zdroje energie se podílejí na energetické bezpečnosti omezením závislosti jednotlivých států na fosilních palivech a jiných nerostných surovin, které se mohou nacházet v politicky nestabilních částech světa, potřebných pro výrobu elektrické energie.
- Ochranu životního prostředí. Za předpokladu vzrůstající poptávky po elektrické energii, může lidstvo v energetickém sektoru v roce 2035 omezit tvorbu CO₂ použitím obnovitelných zdrojů energie o 3,6 gigatun v porovnání s případem, kdyby se na výrobu elektřiny v roce 2035 použil současný energetický mix. Obnovitelné zdroje energie rovněž přispívají k omezení jiných znečišťujících látek a skleníkových plynů, které se generují zejména spalováním uhlí v klasických tepelných elektrárnách. Tyto látky zhoršují kvalitu ovzduší, negativně ovlivňují lidské zdraví a způsobují množství environmentálních problémů, jako jsou kyselé deště, ničení ozónové vrstvy země, oteplování povrchu planety a jiné. Patří sem například oxid siřičitý (SO₂) případně oxidy dusíku (NO_x).
- Ekonomické výhody. Rozvoj a aplikace obnovitelných zdrojů energie s sebou přináší tvorbu pracovních míst, prostor pro podnikání a investice. Mohou se podílet na ozdravování ekonomik a mohou být součástí rozsáhlé strategie zaměřené na udržitelný ekonomický růst (nazývaný jako "zelený růst").
- Energetická dostupnost. Obnovitelné zdroje energie mohou poskytnout přístup k elektrické energii přibližně 1,3 miliardě lidem v méně rozvinutých nebo odlehlých oblastech světa a podílet se tak na zkvalitnění jejich každodenního života. Mini-Grid a off-grid systémy mohou být levnější, než výstavba sítí do takových oblastí. [5] [10][12]

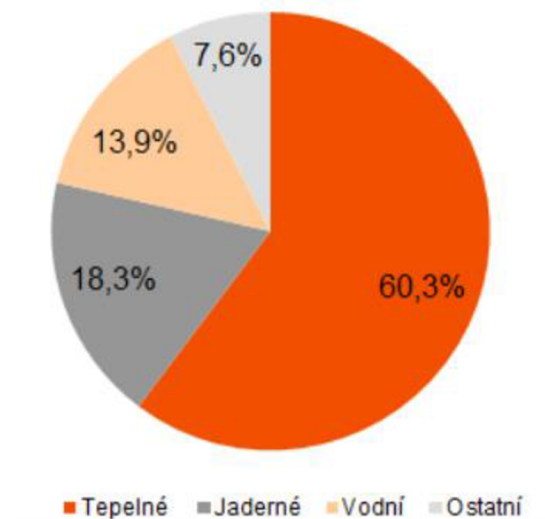
2.1 Vývoj podílu zdrojů na výrobě elektrické energie během let

Na grafech Obrázek 1. a Obrázek 2. lze vidět vývoj zastoupení elektrických zdrojů podílejících se na výrobě elektrické energie v průběhu deseti let v zemích OECD.

Země OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) je mezinárodní organizace 35 ekonomicky velmi vyspělých zemí světa, které přijaly principy tržní ekonomiky a demokracie. [4]

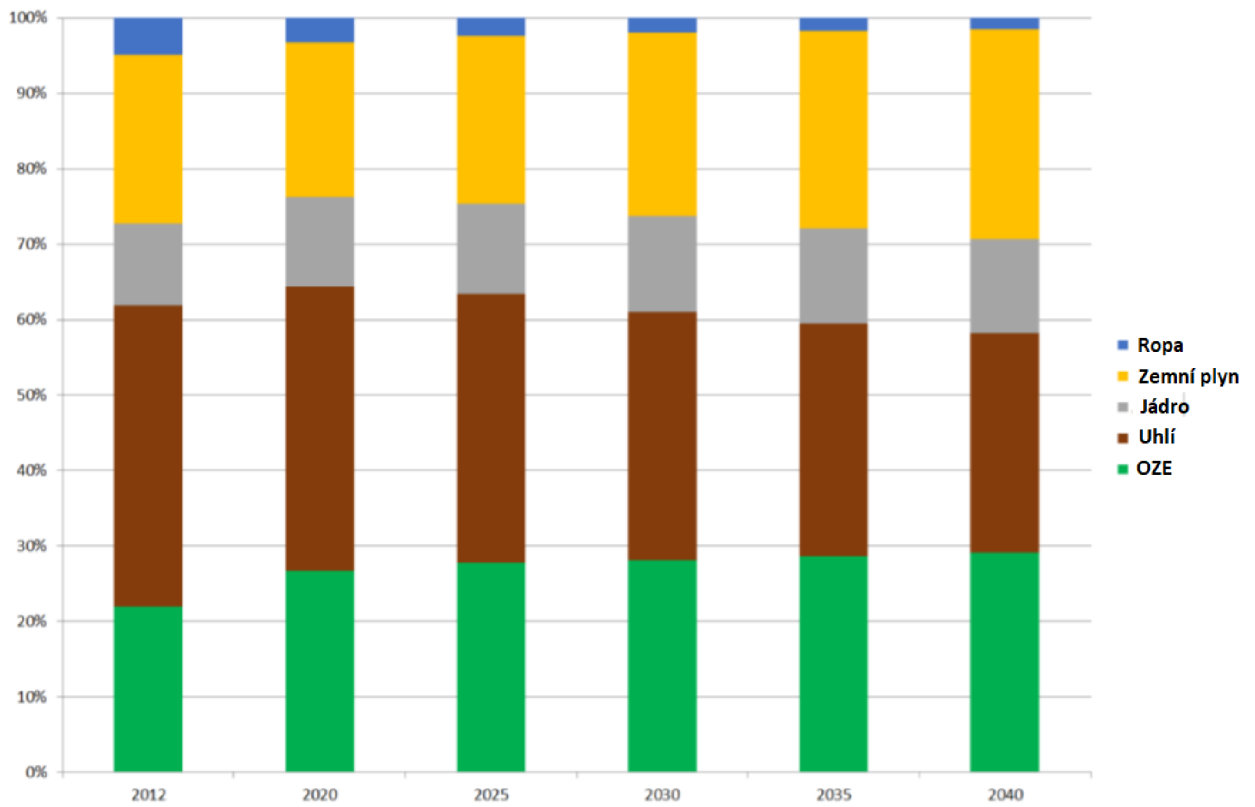


Obrázek 1. Struktura světové výroby elektřiny v zemích OECD v roce 2005[4]

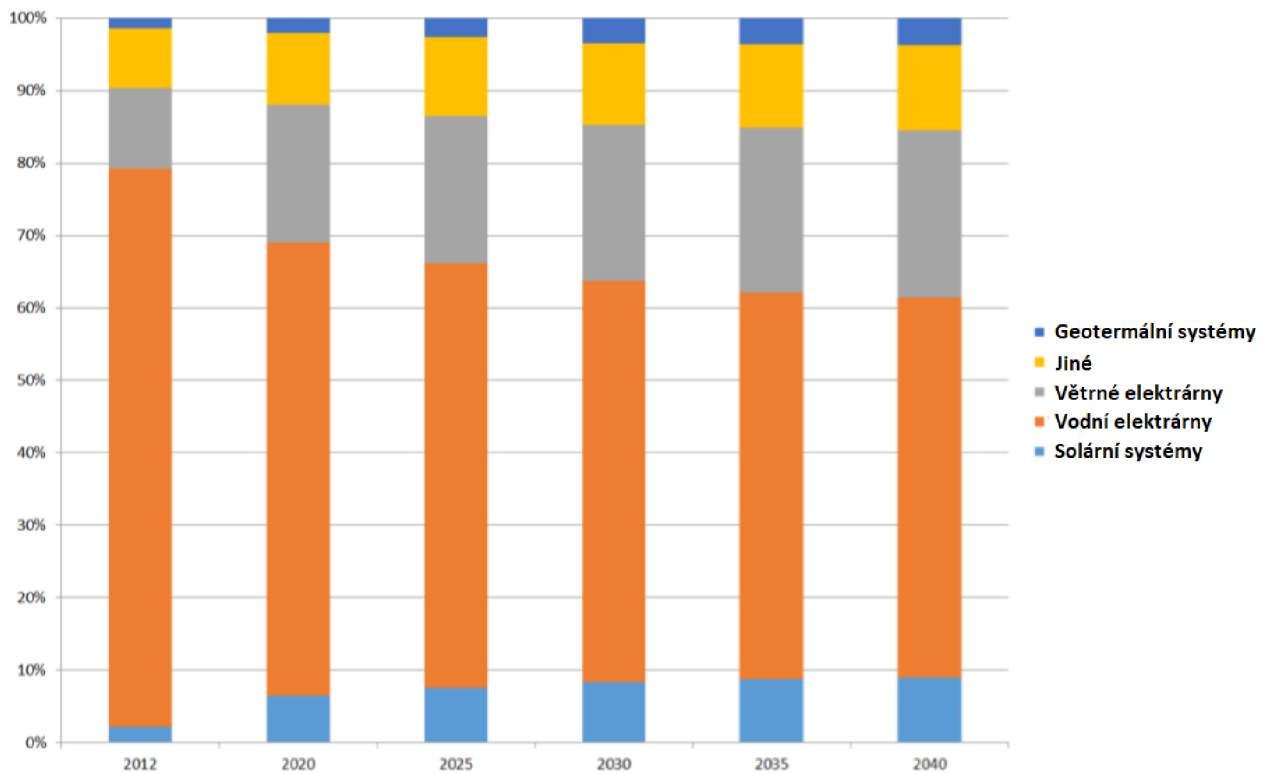


Obrázek 2. Struktura světové výroby elektřiny v zemích OECD v roce 2015[4]

V roce 2016 na konferenci International Energy Outlook byla potvrzena snaha na zefektivnění výroby elektrické energie z plynu, jádra a obnovitelných zdrojů. Obnovitelné zdroje jsou nejrychleji rostoucí zdroje. Jejich předpokládaný průměrný roční přírůstek na celosvětové produkci elektrické energie činí 2,9% do roku 2040. Taktéž je plánovaný nárůst zdrojů, využívajících jako palivo plyn, o 2,7% ročně, zdrojů využívajících energii jádra o 2,4% ročně. [4]



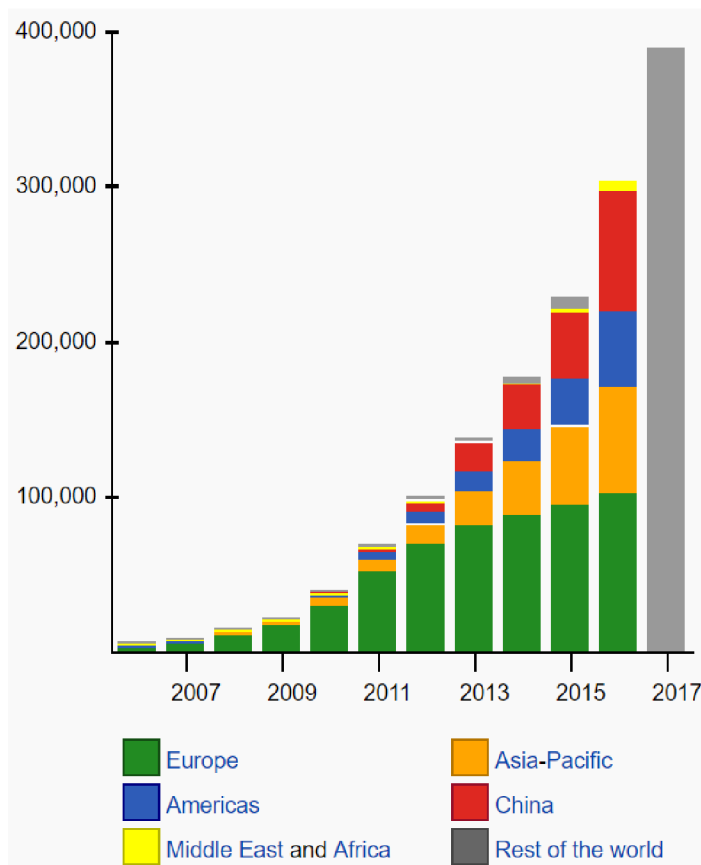
Obrázek 3. Současný a budoucí vývoj podílů zdrojů na výrobě elektrické energie[4]



Obrázek 4. Současný a budoucí vývoj podílu jednotlivých OZE na výrobě elektrické energie[4]

Plán USA v rámci vize CPP (Clean Power Plan) má do roku 2030 zvýšit produkci elektrické energie z obnovitelných zdrojů až o 58%, přičemž využití solární energie se má zvyšovat v průměru o 8,3% ročně. Plánované navýšení generované elektrické energie, činí 33% pro vodní a větrné elektrárny, 15% pro solární elektrárny a 14% jiné, do roku 2030. [5]

2.2 Vývoj instalovaného výkonu FV během let



Obrázek 5. Vývoj instalovaného výkonu fotovoltaiky ve světě[5]

Tabulka 1. Vývoj instalovaného výkonu fotovoltaiky ve světě[5]

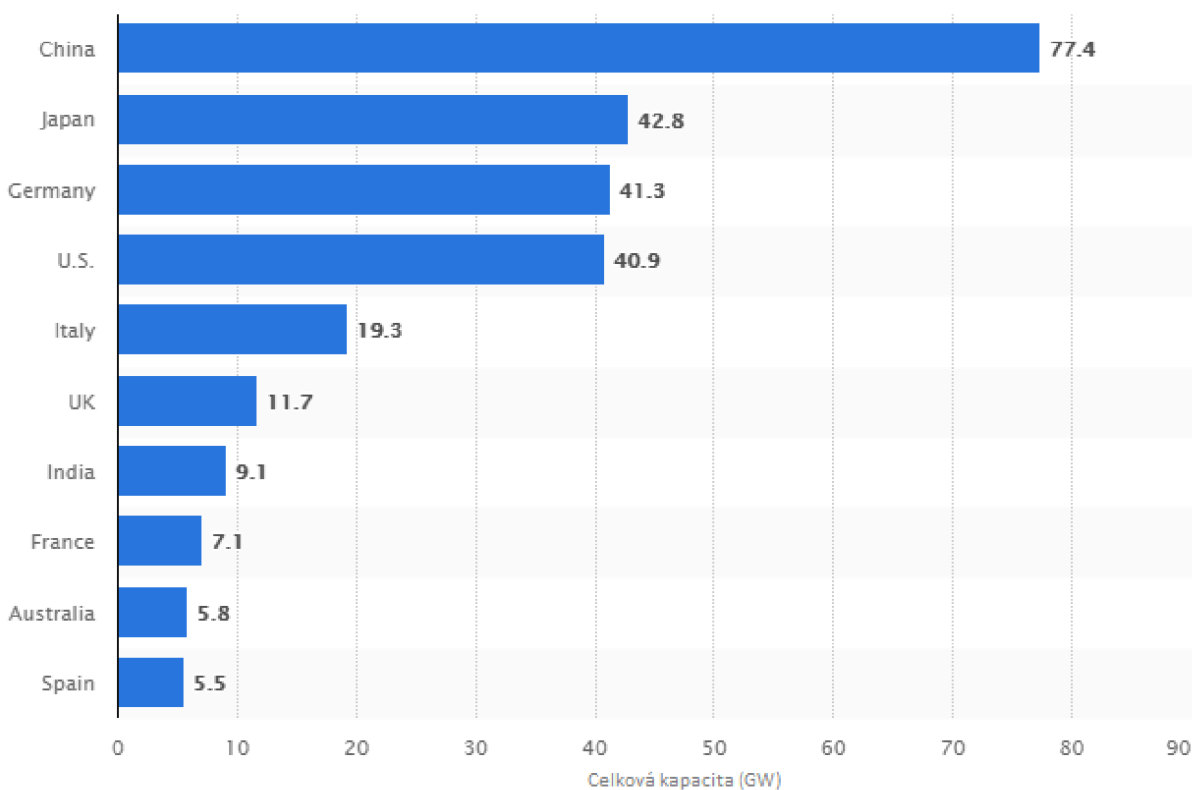
Rok	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Celkově (MWp)	100,504	138,856	178,391	229,300	304,300	389,000
Roční přírůstek (MWp)	30,011	38,352	40,134	50,909	75,000	85,000
Přírůstek (%)	43	38	28	29	32	28

Křivka celosvětového instalovaného výkonu fotovoltaických elektráren mezi lety 2007 – 2017 měla exponenciální tendenci, jak vyplývá z grafu na Obrázku 3. Během této doby se fotovoltaika (FV), také známá jako solární fotovoltaika, vyvinula z malého trhu malých aplikací do jednoho z hlavních zdrojů elektrické energie. Již několik let tomuto trhu dominovalo především Japonsko a průkopnické evropské země. Následkem toho se náklady na sluneční energii významně snížily díky zlepšení technologií a masové výrobě.

Historicky byly Spojené státy lídři v instalovaném výkonu fotovoltaických elektráren po mnoho let. Již v roce 1996 měli instalovaný výkon 77 MW, což bylo více, než jakákoliv jiná země na světě v této době. Následně Japonsko sesadilo lídra, Spojené státy, z trůnu a udrželo se na vrcholu do roku 2005, kdy Německo převzalo vedení a v roce 2016 mělo instalovaný výkon přes 40 GW.

Nicméně, v roce 2015, se Čína stala světovou mocností v instalovaném výkonu a předpokládá se pokračování jeho rychlého růstu až k trojnásobku jeho FV kapacity na 70 GW v roce 2017.

Koncem roku 2016 dosáhla celková kapacita instalovaného výkonu kolem 302 GW, která byla odhadnuta na dostatečnou kapacitu pro zásobování 1,3% až 1,8% celosvětové poptávky po elektřině. Odhaduje se, že instalovaný výkon FV se mezi lety 2016 a 2020 navýší na dvojnásobek, nebo dokonce trojnásobek. [5][7] [10]

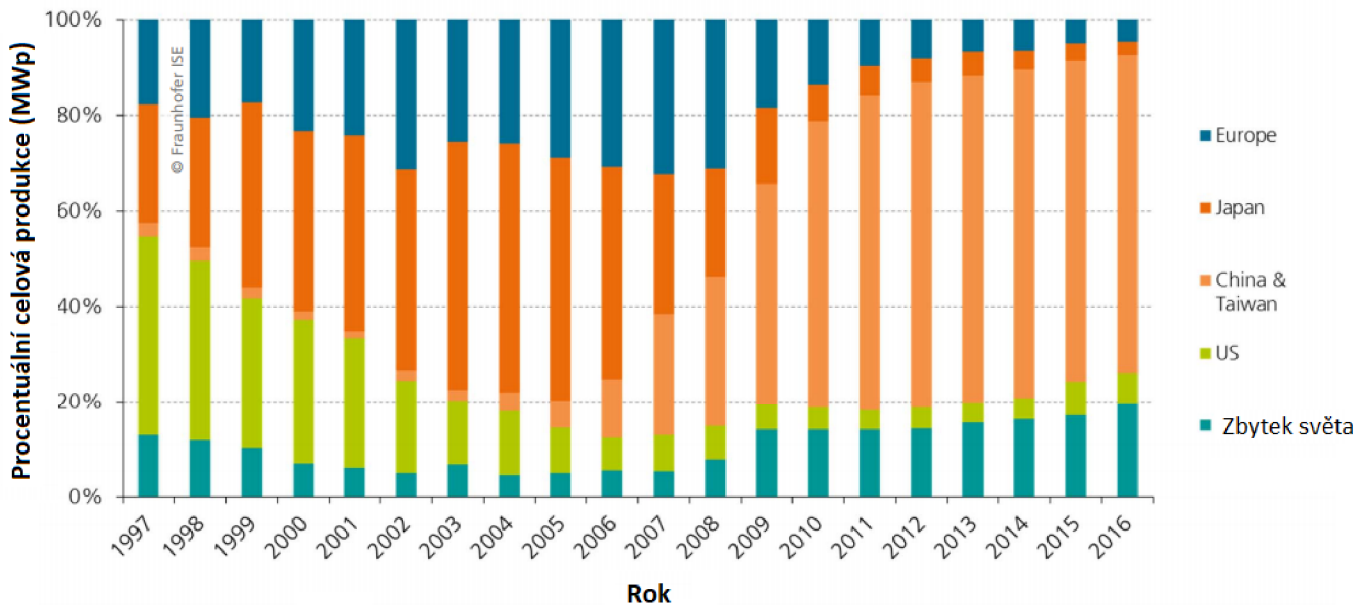


Obrázek 6. Celkový instalovaný výkon FV v jednotlivých zemích koncem roku 2016[5]

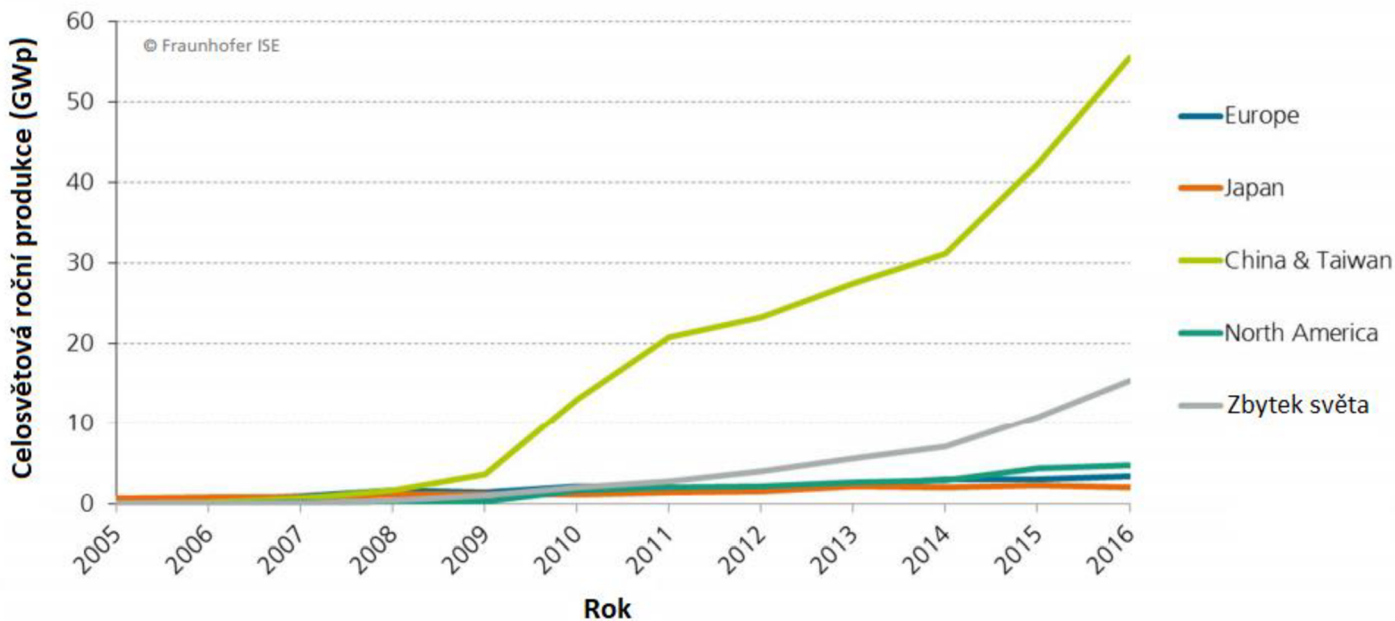
2.3 Vývoj trhu s fotovoltaickými systémy

Trh s fotovoltaikou rostl v roce 2015 o 35% oproti roku 2014 a v roce 2016 o 17% oproti roku 2015.

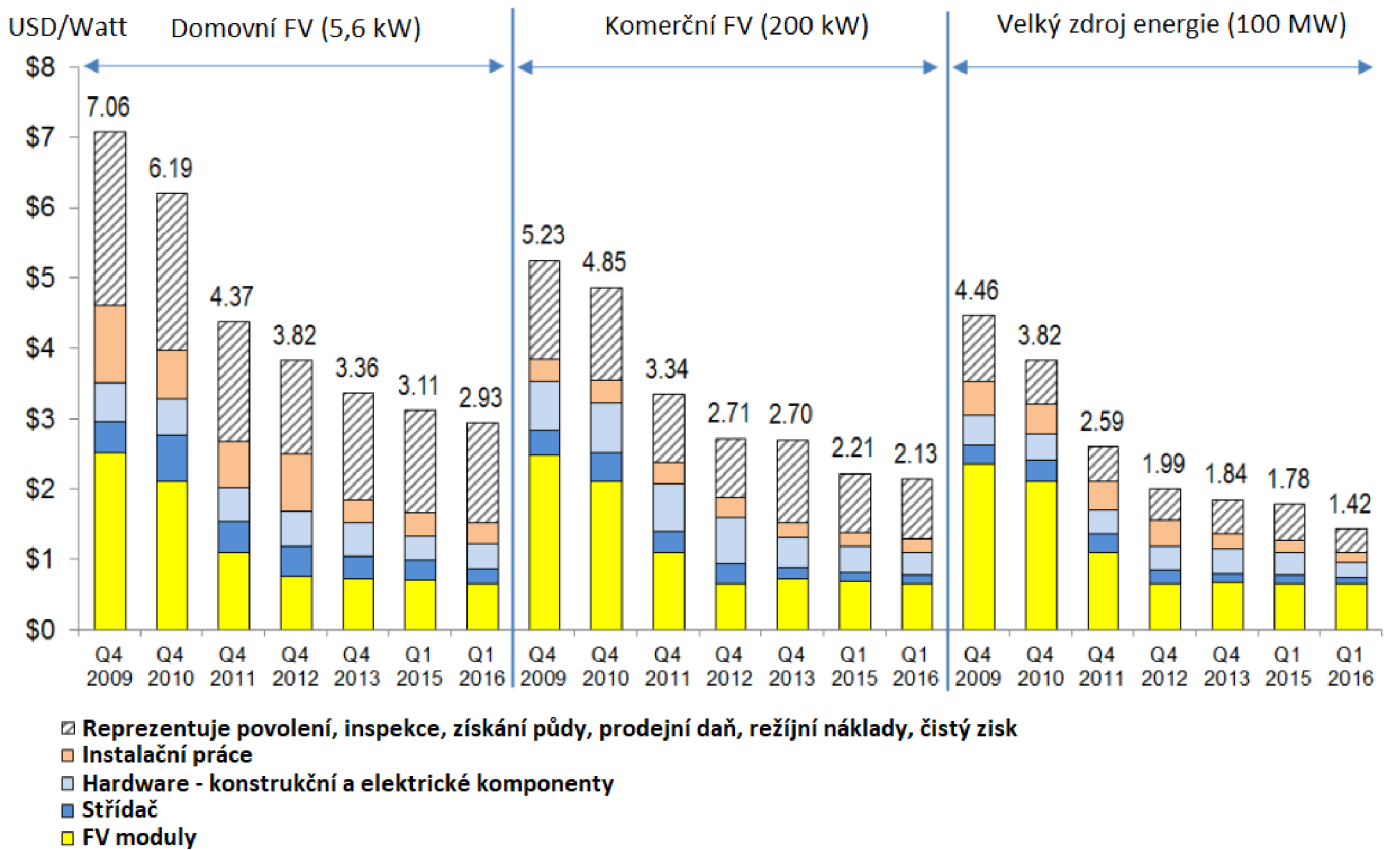
Jak lze vidět v grafu na Obrázku. 7., tak majoritním producentem současnosti je čína, která tvoří přibližně 75% veškeré produkce na světě. [5] [7]



Obrázek 7. Rozložení produkce FV panelů během let [5]



Obrázek 8. Celosvětová roční produkce za poslední desetiletí[5]



Obrázek 9. Vývoj cen FV elektráren různých rozsahů během let[9]

Tabulka 2. Definice jednotlivých systémů [6]

FV sektor	Popis	Rozsah
Domovní systémy	FV systém na střeše domu	do 10 kW
Komerční	FV systém na střeše komerčního objektu	10 kW - 2 MW
Zdroje velkých výkonů	Pozemní systémy, pevný náklon s jednoosým trackerem	> 2 MW

Z grafu na Obrázku 8. vyplývá, že v letech 2005-2008 byla celosvětová produkce takřka nulová. K velkému boomu došlo v roce 2009, kdy produkce FV panelů začala stoupat lineárně z cca 2,5 GWp v roce 2009 až na 55 GWp v roce 2016.

Vlivem masové produkce klesla cena za posledních 8 let o téměř 60% u domovních a komerčních instalací a o téměř 70% u velkých zdrojů v řádech stovek MW. [9]

2.4 Mobilní fotovoltaická elektrárna ve světě

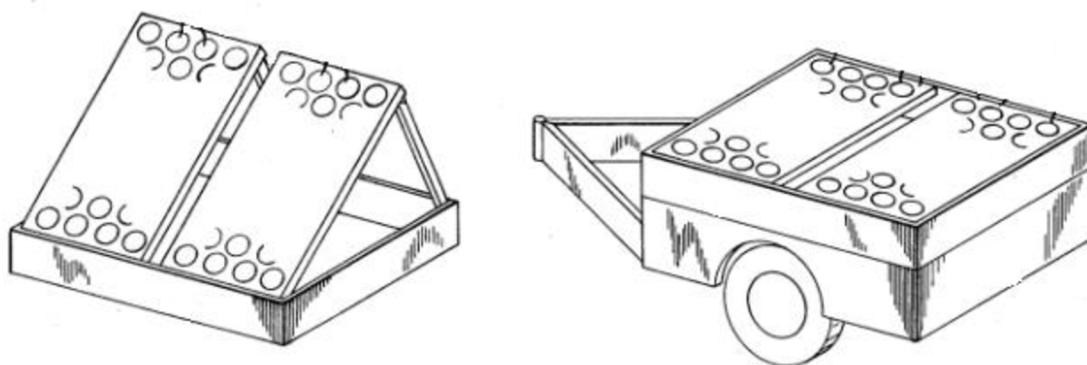
Generátory jsou typicky použity pro poskytnutí elektrické energie během energetických výpadků (např. během bouřky, nouzových situací a situací spojených s pomocí při katastrofách), off-grid případech nebo v místech, kde není možnost připojení k elektrickému zdroji (např. na staveništích, při kempování nebo při outdoor akcích - koncerty, stánky s jídlem atd.). Stručně řečeno, se používají převážně pro dočasné, přenosné/mobilní, záložní nebo vzdálené potřeby napájení.

Konvenční generátory mají řadu nedostatků. Ke své funkci potřebují palivo, benzín nebo naftu, což může být drahé, především v nouzových případech, kdy ho může být nedostatek. Emise z konvenčních zdrojů dále přispívají ke znečištění, změně klimatu a mohou způsobit otravu oxidem uhelnatým, pokud jsou umístěny v uzavřených prostorech bez dostatečného odvětrávání (Ve skutečnosti, při každé katastrofě zemře několik lidí na následky otravy oxidem uhelnatým, právě kvůli generátorům na benzín a naftu). Generátory jsou navíc velice hlasité.

Solární generátory poskytují inteligentní, tichou, bezpečnou a čistou alternativu, která využívá obnovitelnou energii (bez paliva = žádné emise).

2.4.1 První myšlenka mobilní fotovoltaické elektrárny

Historie mobilních fotovoltaických systémů sahá až do roku 1982, kdy byl podán patent Collapse Mobile Solar Energy Power Source, jehož tvůrcem je Eric M. Withjack. Podstatou tohoto patentu je vytvoření přístroje, jehož úkolem je sbírání energie slunečního záření a následné přeměny na elektrickou energii za použití fotovoltaických panelů. V případě, že přístroj není v činnosti, je možné panely sklopit a uschovat v pouzdru přístroje. [15]



Obrázek 10. Koncept mobilní fotovoltaické elektrárny podle patentu CMSEP[15]

2.4.2 Rozdělení

Mobilní fotovoltaické elektrárny můžeme dělit podle výkonu

➤ Nejmenší mobilní fotovoltaické systémy

Nejmenší mobilní fotovoltaické systémy jsou systémy do 1 kg a výkonem dostačujícím pro napájení USB portů, především nabíjení mobilních telefonů a tabletů a dalších malých spotřebičů. Většina výrobců těchto systémů se nachází v Číně. Podstatou tohoto systému je napojení baterie (baterie telefonu, tabletu ..) na panely s malou aktivní plochou. Vyskytují se také nejmenší mobilní fotovoltaické systémy s akumulací elektrické energie a slouží jako powerbanky. [17]



Obrázek 11. Příklad nejmenší mobilní fotovoltaické elektrárny [17]

➤ Kufříkové mobilní fotovoltaické elektrárny

Kufříkové mobilní fotovoltaické elektrárny jsou navrženy především pro osobní použití, jako například při kempování. Vzhledem ke kompaktní velikosti se kufříková provedení provádí nejčastěji o kapacitě 400 – 2000 Wh. Většinou poskytují nabití malých spotřebičů, jako mobilní telefony, tablety a světelné zdroje, ale také například varné konvice. Vše záleží na výkonovém provedení daného kufříku. [17]



Fotovoltaické moduly nejsou součástí
 Kapacita baterie: 100 AH, 12V (1200W)
 Výstupní výkon: 1200W / 1500W špička
 Doba nabíjení: síť 18h, autozásuvka 44h,
 solární panel 40-80h (solární panel
 výrobce- 30W, napětí 18-22V)
 Hmotnost 46,7 Kg
 Cena: cca 50 000 Kč

Obrázek 12. Solární generátor Goal Zero Yeti 1250[17]



**5x 16W Fotovoltaický modul se 17% účinností
(možnost rozšířit na 150 W)
Nabíjení: síť 110-220V a 12V DC z panelů
Kapacita baterie: 55 Ah, 12V (660 W)
Výstupní výkon: 1500W/3600W špička
Hmotnost: 38,5 kg**

Cena: cca 30 000 č

Obrázek 13. Solární generátor SOLARE POWER™ CUBE 1500 [11]

➤ **Malé, kompaktní jednotky**

Tyto solární generátory jsou navrženy, aby poskytovaly skromné množství elektrické energie pro dočasné, nouzové situace nebo pro potřeby malých výkonů. Nejmenší jednotky mohou nabíjet malé přístroje (mobilní telefony, tablety atd.) a napájet osvětlení. Nemá kapacitu na napájení velkých, výkonově náročných zařízení nebo spotřebičů (např. chladničky, topení) na delší dobu (např. 2700Wh jednotka může napájet malé topení až cca 3h během noci, když není dobíjena sluncem). [11]



**1x 230Wp monokrystalický modul
Průměrná denní výroba energie: 1,5 kWh**

Výstup střídače: 1,3 kW/4,6 kW špička

**Kapacita baterie: 230 AH, 12V DC (2,7 kWh)
1000 cyklů se zárukou 50% kapacity**

Cena: 5000\$

Obrázek 14. Malá mobilní fotovoltaická elektrárna[11]

➤ Velké generátory

Velké solární generátory jsou většinou určeny pro použití na stavbách nebo veřejných projektech. Většina je namontována na přívěsech, které mohou být taženy. Mnoho těchto generátorů je určeno pro komerční/průmyslové využití k napájení celé off-gridové základny. [11]



16x 330 Wp monokrystalické moduly
Průměrná denní výroba energie: 32 kWh

Výstup střídače: 7,2 kW/12kW špička

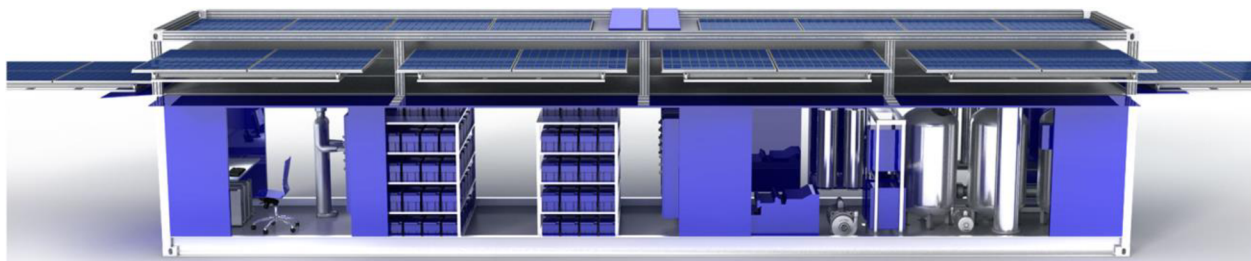
Kapacita baterií: 836 AH, 48V DC (40 kWh)
2000 cyklů se zárukou 80% kapacity

Cena: 40 000\$

Obrázek 15. Solární generátor MS-375 [11]

➤ Největší mobilní fotovoltaická elektrárna na světě

Ecos PowerCube je největší fotovoltaická elektrárna na světě, vyrobená firmou EcoSphere. Její přeprava je možná prostřednictvím kamionů, lodí, nákladních vlaků nebo nákladními letadly. Ihned po uvedení do provozu dokáže generovat výkon až 15 kW. Patentovaná pole solárních panelů jsou namontována na válečkových sestavách pro snadnou integraci a podporovány hydraulickými pohony, které usnadňují správné umístění. Využití této elektrárny je zaměřené především na pomoc v rozvojových zemích, místech zasáhnutými přírodními katastrofami a na vojenské účely. [16]

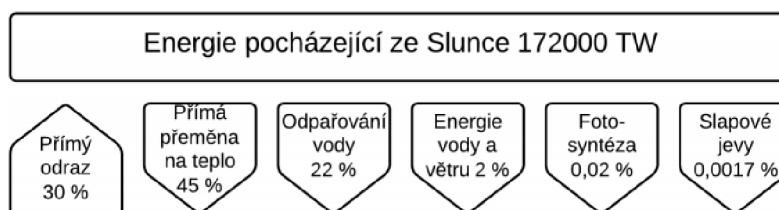


Obrázek 16. Největší fotovoltaická elektrárna[16]

3 TEORIE ZÁŘENÍ, POPIS JEDNOTLIVÝCH KOMPONENT

3.1 Sluneční záření

Sluneční elektromagnetické záření je jeden z nejčistších zdrojů elektrické energie na zemi. Tato energie vzniká termojadernými reakcemi v nitru hvězdy. Z pohledu délky existence člověka je Slunce nevyčerpatelným zdrojem energie. Na plochu země dopadá sluneční záření o potenciálu výkonu 172 000 TW, kde asi 30% výkonu se odrazí od zemského povrchu, na tepelnou energii se spotřebuje 45%, na odpařování vody 22% a 2% předávají energii větru, více na Obrázku 16. Sluneční elektromagnetické záření je zdrojem energie v celém rozsahu vlnových délek tzn. od nejmenších vlnových délek rentgenového záření až po metrové délky rádiového záření. Světelné a infračervené záření, o vlnové délce 0,2 μm až 0,3 μm je však nejobvyklejší. Lidské oko vidí záření v rozsahu 380 nm až 780 nm. [14]



Obrázek 17. Rozdělení výkonu dopadající sluneční energie na zemi [14]

Sluneční záření můžeme rozdělit na:

- přímé I_P
- difuzní I_D
 - jedná se o rozptýlené světlo, odražené o prach, mraky a molekuly plynů
 - intenzita tohoto záření se zvyšuje se součinitelem znečištění Z

Plošnou hustotu zářivého výkonu ve střední vzdálenosti od Země od Slunce, udává solární konstanta a její hodnota, uvedena organizací NASA, je $I_0 = 1367 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Po prostupu záření atmosférou lze zavést plošnou hustotu záření, která dopadá na povrch Země. Hodnota solární konstanty závisí na součiniteli znečištění Z , který závisí na atmosférickém tlaku a na příměsích, ze kterých se vzduch skládá a dále na zeměpisné šířce. V České republice dosahuje maximální hodnota výkonu cca $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. [14]

Pro intenzitu přímého slunečního záření, které dopadá kolmo na plochu, platí

$$I_{PN} = I_0 \cdot A^{-Z}$$

I_{PN} ... intenzita přímého slunečního záření dopadající kolmo na plochu ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)

I_0 ... solární konstanta ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)

A ... plocha (m^{-2})

Z ... součinitel znečištění (—)

Pro obecně položenou plochu platí

$$I_P = I_{PN} \cdot \cos\gamma$$

I_P ... intenzita přímého slunečního záření dopadající obecně na plochu ($W \cdot m^{-2}$)

γ ... úhel sklonu kolektoru ($^\circ$)

Množství dopadající energie na plochu je závislé na sklonu kolektoru a součiniteli znečištění. Ideální úhel pro zachycení maximálního množství energie ze slunečního záření se mění v průběhu roku, a to

- 30° – 40° letní období
- 60° – 90° zimní období

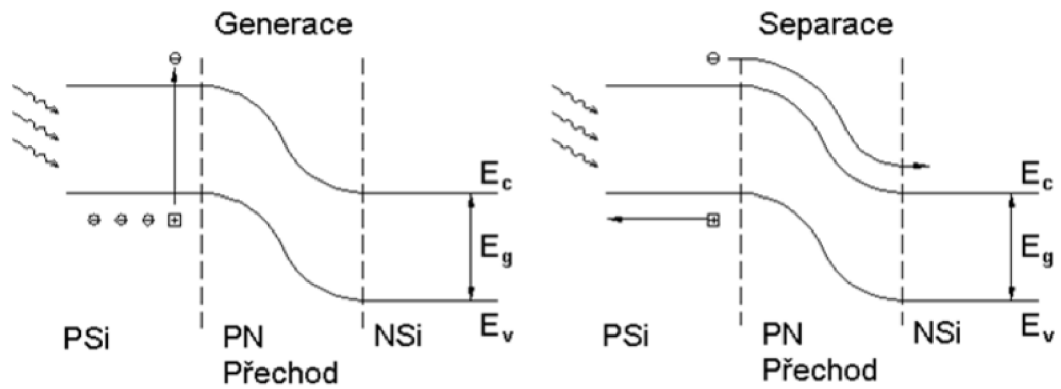
Tabulka 3. Příklady hodnot součinitele znečištění v závislosti na typu oblasti [14]

Typ oblasti	Součinitel znečištění Z (-)
Místa nad 2000 m.n.m.	2
Místa nad 1000 m.n.m.	2,5
Venkov bez průmyslových exhalací	3
Města a průmyslová střediska	4
Silně znečištěné prostředí	≥ 5

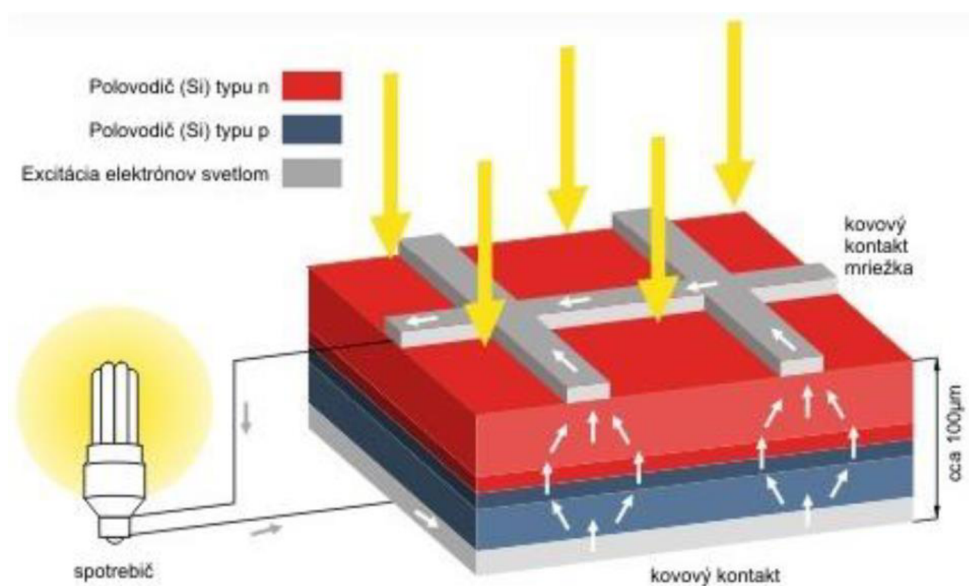
3.2 Fotovoltaické články

Elektrická energie získaná přeměnou solární energie je známa již z 19. století. Pro přeměnu solární energie na elektrickou energii se používají tzv. fotovoltaické články, někdy nazývané také solární články. Pracují na principu přímé přeměny energie, což znamená, že se jedná o přeměnu bez jakýchkoliv mezistupňů. Tato zařízení lze považovat z hlediska přeměny za jednodušší, nicméně mnohdy jsou tyto přeměny podmíněné znalostí specifických fyzikálních jevů, proto je rozvoj fotovoltaických aplikací stále závislý na technické úrovni a znalostech z fyziky, a to především na oblasti polovodičů.

Základním materiálem pro výrobu fotovoltaických článků se v dnešní době používá krystalického křemíku. Fotovoltaické články používají pro přímou přeměnu solární energie na elektrickou, tzv. fotoelektrického jevu, který byl poprvé pozorován v roce 1839 fyzikem A. E. Becquerelem. [14] [13]



Obrázek 18. Znázornění principu fotoelektrického jevu[14]



Obrázek 19. Princip fotovoltaického článku[14]

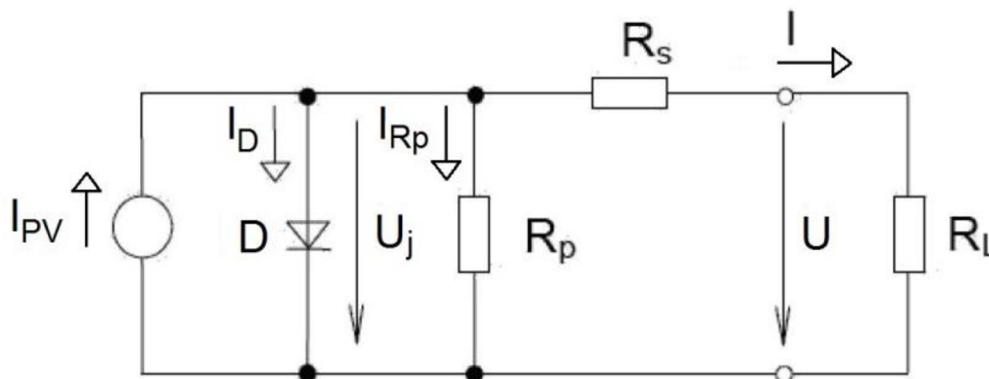
Pro přeměnu sluneční energie na elektrickou pomocí fotovoltaického článku je nutné, aby foton ze slunečního záření uvolnil v látce elektron a vznikl pár elektron – díra. Použití polovodičů je zásadní, protože obsahují PN přechod, ve kterém jsou díry a elektrony separovány a zabrání tedy k jejich rekombinaci. Na PN přechodu se vytvoří stejnosměrné elektrické napětí (0,5 V u křemíkových článků). Po připojení spotřebiče k elektrickému článku začne obvodem procházet proud.

Aby mohl fotoelektrický jev probíhat, musí platit následující podmínky

- Foton musí být pohlcen
- Foton musí excitovat elektron do vyššího vodivostního pásu
- Vzniklá dvojice elektron – díra musí být separována, aby se znovu nespojila
- Oddělené náboje jsou následně odvedeny ke spotřebiči

Fotovoltaické články vytváří stejnosměrné napětí a jejich serio-paralelním spojením se vyrábějí fotovoltaické panely. [14] [13]

3.2.1 Náhradní schéma fotočlánku

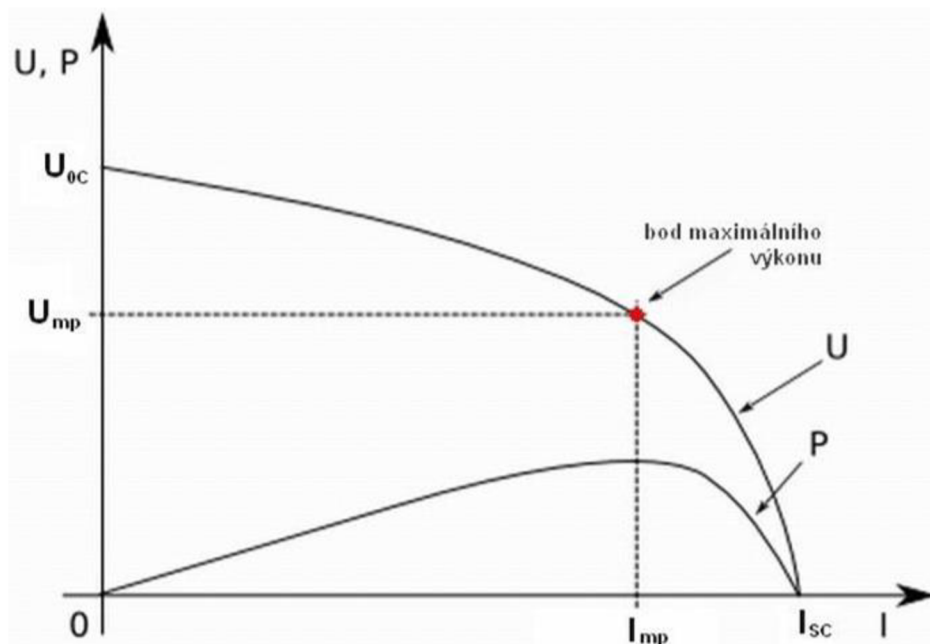


Obrázek 20. Náhradní schéma fotovoltaického článku popsaný elementárními elektrickými součástkami [14]

Ozářená oblast přechodu PN generuje proud I_{PV} , přičemž se oblast typu P nabíjí kladně a oblast typu N záporně. Tím je přechod propustně polarizován a část generovaného proudu teče zpět diodou D. Tato nedokonalost (mikrosvod) PN přechodu je modelována svodovým odporem R_p , vliv odporu materiálu a proudových sběrnic je modelován sériovým odporem R_s . Napětí na fotočlánku je menší o úbytek napětí na odporu R_s . Kvůli sériovému odporu se snižuje výstupní proud fotočlánku a tím pádem i celkovou účinnost. [14]

3.2.2 Voltampérová charakteristika

Voltampérová charakteristika je základní informací o provozních parametrech fotovoltaického článku. Hraničními veličinami na voltampérové charakteristice fotovoltaického článku jsou napětí naprázdno U_{0c} a proud nakrátko I_{sc} .



Obrázek 21. Voltampérová charakteristika fotovoltaického článku [14]

Napětí naprázdno U_{OC} je napětí, kterého lze dosáhnout, pokud na článek není připojen žádný spotřebič. Proud nakrátko I_{SC} (zkratový proud) je maximální proud, který může článek generovat.

Výkon fotovoltaického článku je definován, jako součin proudu a napětí. Každý fotovoltaický článek má pracovní bod na charakteristice, kde je součin napětí a proudu největší a nazýváme jej bodem maximálního výkonu, ve zkratce MPP (Maximum Power Point). Výkon fotovoltaického článku můžeme matematicky rozepsat následovně

$$P = U_{mp} \cdot I_{mp}$$

P ... maximální výkon fotovoltaického článku (W)

U_{mp} ... napětí v bodě maximálního výkonu (V)

I_{mp} ... proud v bodě maximálního výkonu (A)

Dalšími charakteristickými veličinami fotovoltaického článku jsou činitel plnění (FF) a účinnost (η).

Činitel plnění je definován jako podíl výkonu v bodě maximálního výkonu a výkonu definovaným hraničními charakteristickými hodnotami U_{OC} a I_{SC} . [14]

$$FF = \frac{U_{mp} \cdot I_{mp}}{U_{OC} \cdot I_{SC}}$$

FF ... činitel plnění (—)

U_{OC} ... napětí fotovoltaického článku naprázdno (V)

I_{SC} ... proud fotovoltaického článku nakrátko (A)

Účinnost hodnotí efektivitu přeměny dopadající sluneční energie na energii elektrickou. Můžeme ji tedy psát, jako podíl výkonu v bodě maximálního výkonu a výkonu dopadajícího slunečního záření P_{in}

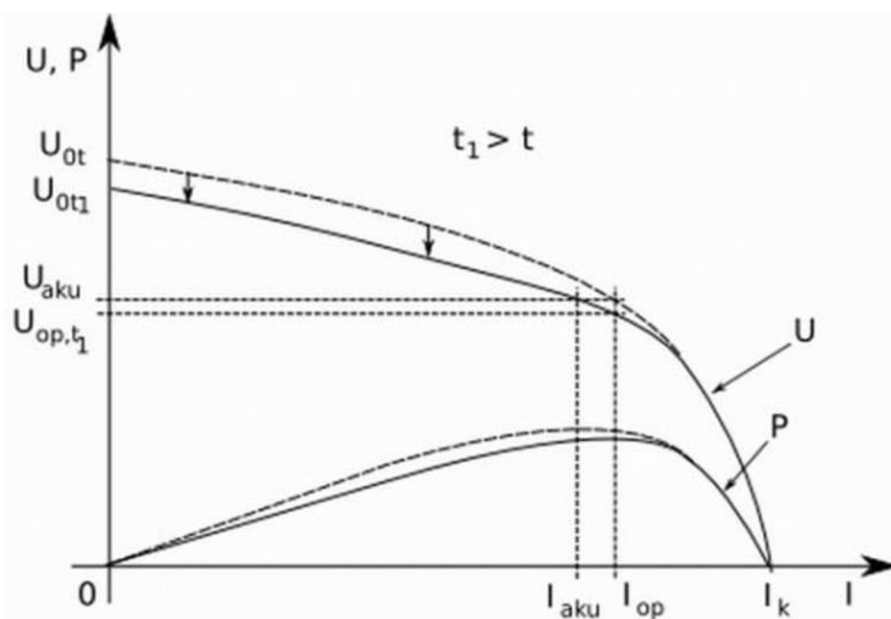
$$\eta = \frac{U_{mp} \cdot I_{mp}}{P_{in}}$$

η ... účinnost přeměny energie slunečního záření na energii elektrickou (%)

P_{in} ... výkon slunečního záření (W)

Všechny uvedené charakteristické provozní veličiny jsou vždy určovány za normalizovaných testovacích podmínek, a to při normalizované testovací teplotě $STC = 25^{\circ}C$, intenzitě slunečního záření $I = 1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ a definované vzduchové hmotě (Air Mass) $AM = 1,5$. Největší vliv na průběh V-A charakteristiky má teplota a intenzita slunečního záření.

Se zvyšující se teplotou se zvyšuje difuzní hodnota minoritních nosičů náboje a zmenší se energetická mezera polovodiče, a to zapříčiní zvýšení fotoproudu a snížení napětí naprázdno. Při vysoké sluneční intenzitě po delší dobu dosahuje teplota vzduchu až $40^{\circ}C$ a teplota povrchu fotovoltaických článků až $80^{\circ}C$. Během takto vysokých teplot dochází ke změně provozních parametrů článku, které vedou ke snížení zatěžovací charakteristiky směrem k nižšímu napětí. Pokles napětí snižuje generovaný výkon a tím i účinnost fotovoltaického článku, kdy pokles účinnosti je cca $0,5\%/K$. [14] [13]



Obrázek 22. Změna charakteristiky vlivem teploty[14]

Účinnost FV článků dále závisí na intenzitě slunečního záření a na velikosti sériového odporu R_S a paralelního odporu R_P . V případě malého R_S účinnost fotovoltaického článku roste se zvyšující se intenzitou záření, jakmile dosáhne maxima, tak dalším růstem intenzity začne klesat.

3.2.3 Materiály pro fotovoltaické články

Nejpoužívanějším materiálem pro výrobu fotovoltaických článků, se používá křemík Si, jak již bylo několikrát řečeno, protože díky jeho šířce zakázaného pásu je možné dosáhnout vysoké účinnosti generace volných nosičů dopadajícím slunečním zářením. Křemík je velmi známý a dobře prozkoumaný prvek, takže byly zvládnuté pokročilé operace nutné pro vytváření struktur.

Současný trend na trhu ukazuje, že krystalický křemík se bude i nadále využívat pro výrobu fotovoltaických panelů, jakožto hlavní prvek, a to hlavně díky snižujícím se cenám, energetické náročnosti a dalšímu zdokonalování technologie. Během této doby probíhá rozvoj tenkovrstvých technologií, a to na bázi amorfního křemíku a teluridu kademnatého. Podíl tenkovrstvých modulů na celkové výrobě může v následujících letech činit až 25%. [13][8]

Z dlouhodobého hlediska vývoje můžeme fotovoltaické články dělit do čtyř kategorií, a to

1. Generace – nejčastěji z desek monokrystalického křemíku, které tvoří PN přechod. Tvoří většinu části trhu, a to cca 90%. Mají dlouhou životnost při zachování parametrů, jejich účinnost se pohybuje mezi 14% a 17%. Pro výrobu je nutný vysoce čistý křemík, což je bráno, jako velká nevýhoda
2. Generace – u této generace se snižuje čistota křemíku a dochází k náhradě amorfním a polykrystalickým křemíkem, které mají cca 1000 krát tenčí vrstvu. Čistota křemíku a účinnost jdou ruku v ruce, takže se snižující se čistotou klesá také účinnost, která se u této generace pohybuje kolem 10%. Nicméně použitím materiálů tenčích vrstev nám dává mechanicky odolnější vlastnosti, snížení hmotnosti a materiálu.
3. Generace – stále ve výzkumu. Snaha o vytvoření technologie využívající maximální potenciál energie dopadajícího slunečního záření, a to formou několikanásobných přechodů tenkých vrstev. Také probíhá snaha o využití jiné metody oddělování nábojů, než je používaný PN přechod.
4. Generace – poslední vývojový stupeň. Jedná se o vícevrstvé profily plně využívající širokého slunečního spektra. Vrstvy profilů budou sestaveny tak, aby reagovaly na všechny vlnové délky. Spektrum záření se mění s časem, tudíž záření narazí na první vrstvu, která ho nedokáže využít, tak pokračuje k další vrstvě. [13]

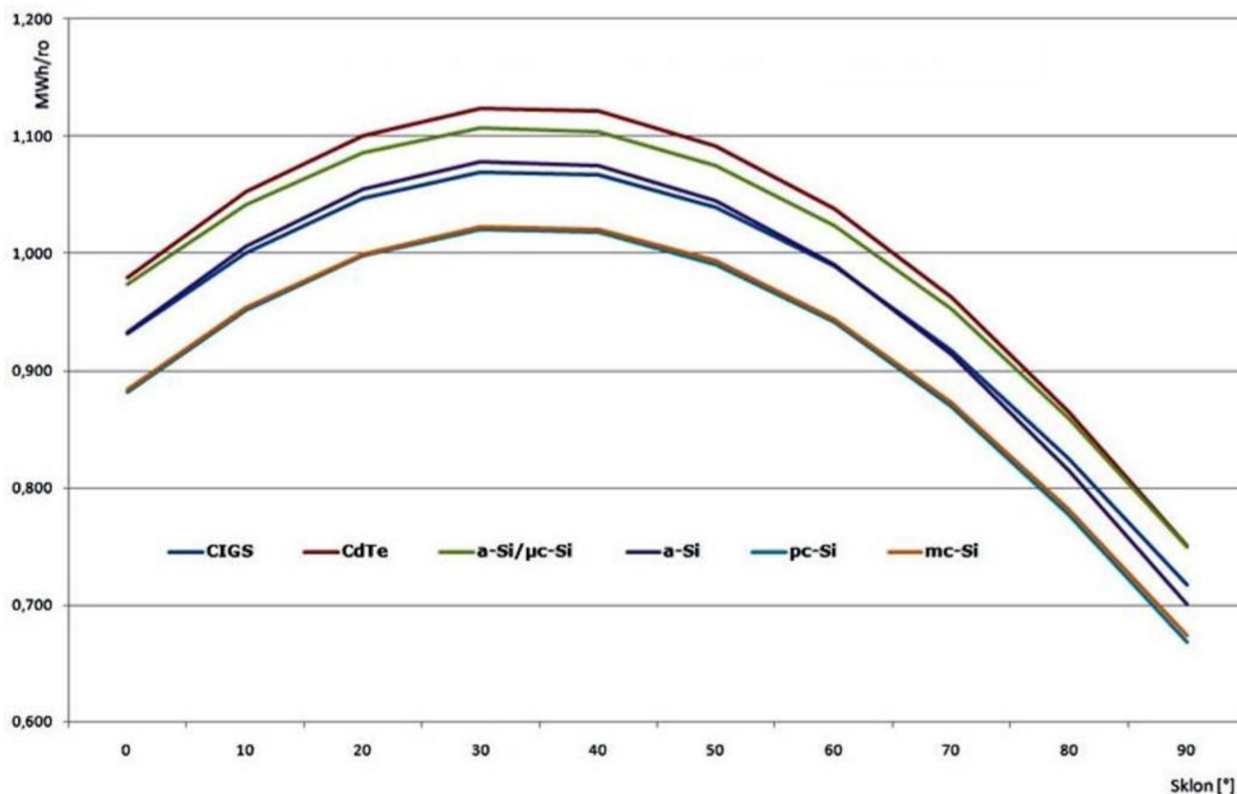
3.2.3.1 Souhrn využitelných technologií

Technologie tenkovrstvé fotovoltaiky můžeme rozdělit dle materiálů a využití solárního záření na

- Amorfni křemík – účinnost 4,5% až 9,5% a nízká výrobní cena
- CIGS (měď, indium, galium, diselenid) – největší účinnost v komerční výrobě 8,5%-12,5%
- CdTe (kadmium tellurid) – účinnost 6%-11%, největší výtěžnost
- Polymerní články – polopropustné pro světlo, účinnost 2% - 3% - organické

Mezi výhody tenkovrstvých technologií patří

- *Vysoká energetická výtěžnost* – během počasí o nízké intenzitě slunečního záření vyrobí až o 15% více energie, než klasické c-Si. Se snižující se intenzitou stoupá relativní účinnost modulů.
- *Nízká cena* – během let klesla výrobní cena tenkovrstvých článků až pod 1€/Wp
- *Nízká teplotní závislost* – tepelné koeficienty až dvakrát nižší, než u klasických krystalických modulů, tudíž jsou určeny k užití např. na střeších a u fotovoltaiky integrované v budovách.
- *Odolnost proti zastínění* – klasické krystalické panely jsou citlivé na zastínění. Při zastínění, byť jednoho článku, je ohrožena funkce celého FV modulu a tím i celého řetězce. Tenkovrstvé články nejsou tak náchylné na zastínění díky rozdílné technologii.
- *Menší závislost na úhlu dopadu solárního záření* – díky vysoké energetické výtěžnosti jsou tenkovrstvé moduly méně závislé na orientaci, a tudíž umožňují větší spektrum aplikací než c-Si. [13] [8]



Obrázek 23. Porovnání výtěžnost jednotlivých technologií prováděné při 25°C[13]

Tabulka 4. Účinnosti fotovoltaických článků jednotlivých technologií[13]

Technologie	Účinnost za běžných podmínek [%]	Maximální účinnost za běžných podmínek [%]	Účinnost naměřená v laboratoři [%]
Amorfní křemík	5 až 7	10	13
Telurid kademnaty	10	12	16
Multikrystalický křemík	11 až 14	16	20
Monokrystalický křemík	12 až 16	22	25

3.3 Střídače

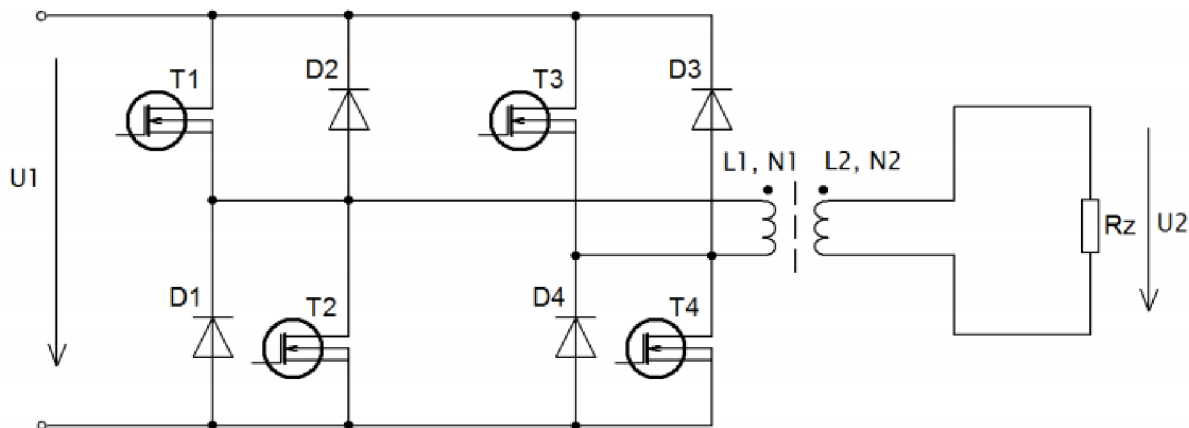
Střídače jsou komponenty sloužící k přeměně stejnosměrných elektrických veličin, vyráběných FV panely, na veličiny střídavé. Můžeme se také setkat s termíny, jako měnič nebo inverter. Střídače jsou také obohaceny u řadu funkcí, jako monitoring (poskytování informací o vlastní výrobě elektrické energie) nebo ochrana. Invertor musí pracovat s co nejmenšími ztrátami, a to může být zajištěno odstraněním transformátoru s následným snížením ztrát a užitím zařízení pro sledování bodu maximálního výkonu (MPPT – Maximum Power Point Tracking), které změnou vstupního odporu zajišťuje optimální chod invertoru. Nejsledovanější veličinou elektrických střídačů, je jejich provozní účinnost přeměny stejnosměrné energie na energii střídavou, MPPT a jeho účinnost. Další, neméně důležitým parametrem, je spolehlivost daného přístroje. [2] [7]



Obrázek 24. Ilustrační fotografie invertoru

Druhy střídačů

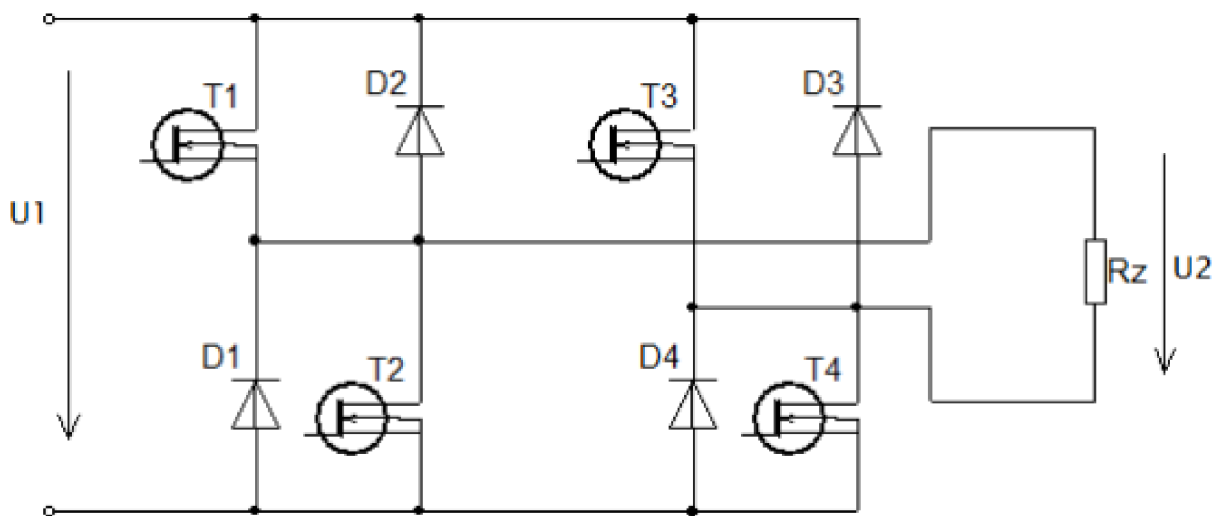
- Ostrovní – generují svůj vlastní kmitočet 50 Hz
- Síťové – synchronizují svůj kmitočet a napětí s aktuálními parametry rozvodné sítě
- S transformátorem – galvanické oddělení (zvýšení bezpečnosti instalace), nižší účinnost
- Bez transformátoru – vyšší účinnosti o 1-2% ve srovnání se střídači s transformátorem[2]



Obrázek 25. Střídač s výstupním síťovým transformátorem [1]

Jedná se o nejjednodušší řešení střídače. Obsahuje dva bloky, a to

- Čtyř-kvadrantový můstek umístěný za vstupními svorkami střídače
- Síťový transformátor



Obrázek 26. Střídač bez výstupního transformátoru [1]

U tohoto typu střídače je spotřebič zapojen mezi větve čtyř-kvadrantového můstku. Tranzistory spínají tak, aby tvar výstupního napětí byl co nejbližší tvaru sinusovky.

Sepnutím tranzistorů T1 a T4 začne protékat proud zátěží. Následně dojde k odpojení T1 a sepnutí T2. Nyní jsou oba konce zátěže připojeny k záporné větvi střídače. Následně se vypne T4 a sepne T3, tím se zátěž připojí na opačnou polaritu napětí. Potom se vypne T2 a sepne T1 a tím je zátěž připojena oběma konci ke kladné napájecí větvi střídače. Perioda je ukončena a vypnutím T3 a sepnutím T4 dochází opět k vedení v první diagonále. [1]

3.3.1 Účinnost

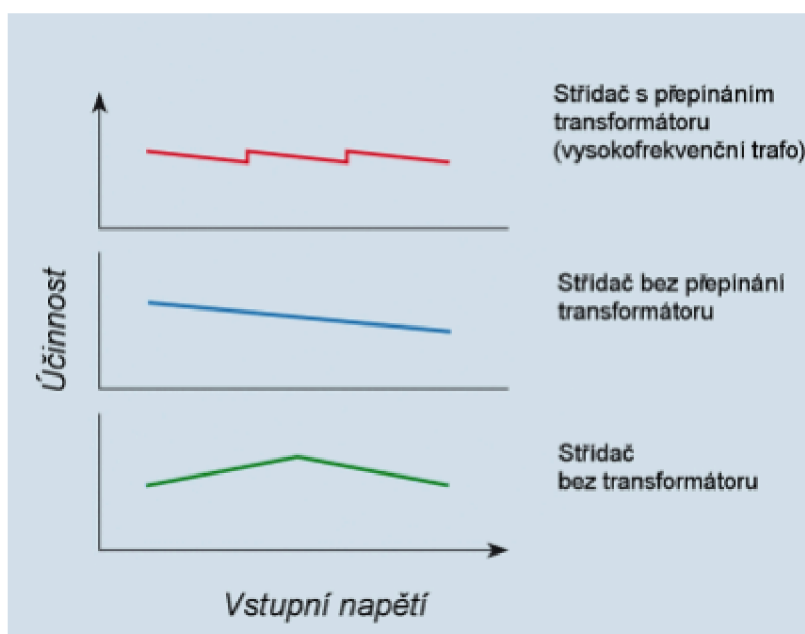
V katalogu každého přístroje bývají většinou uvedeny dvě hodnoty účinností, a to maximální a evropská. Maximální se pohybuje v rozmezí 90-98% a platí při optimálních podmínkách, které ovšem nelze garantovat, tudíž nelze garantovat ani velké energetické zisky. Pro naši zeměpisnou šířku je podstatnější evropská energetická účinnost, která je průměrem měřených účinností během různých zatížení střídače od 5% do 100% (5, 10, 20, 30, 50, 100) nominálního výkonu. [2] [1]

Vzorec pro výpočet evropské účinnosti:

$$\eta_{euro} = 0,03 \cdot \eta_{5\%} + 0,06 \cdot \eta_{10\%} + 0,13 \cdot \eta_{20\%} + 0,1 \cdot \eta_{30\%} + 0,48 \cdot \eta_{50\%} + 0,2 \cdot \eta_{100\%}$$

η_{euro} ... evropská účinnost

$\eta_{x\%}$... úroveň zatížení přístroje



Obrázek 27. Rozdíl závislosti účinnosti na vstupním napětí u střídačů s a bez transformátorů [2]

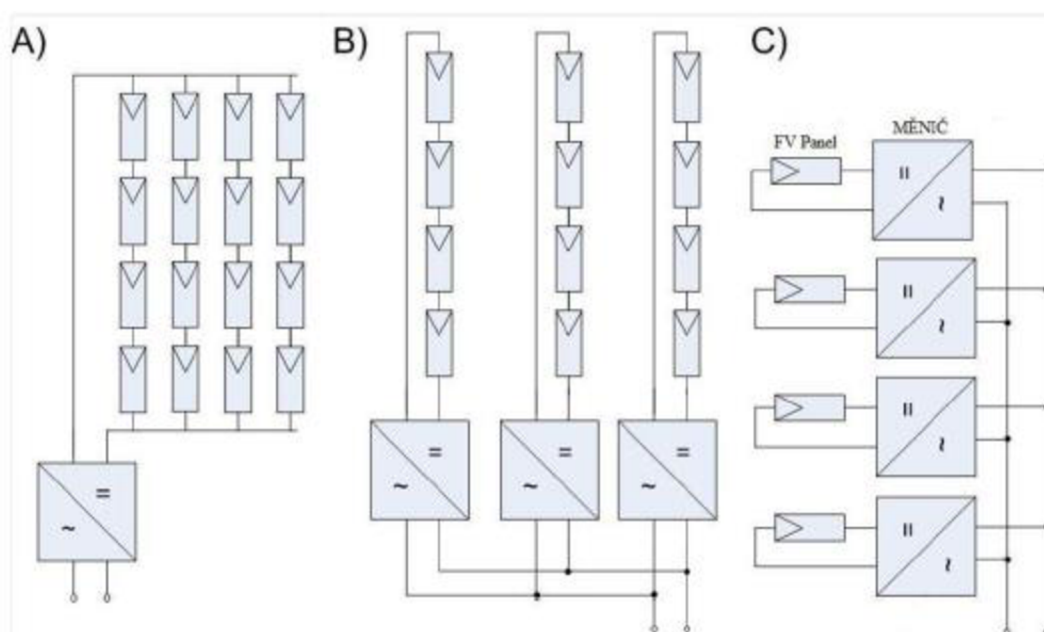
Invertory jsou díky oblačnosti, obzvláště v našich podmínkách, využívány jen částečně. Někteří výrobci proto navrhuji implementaci dalších výkonových prvků pro stálý bezproblémový chod a prodloužení životnosti.

Jednotlivé výkonové stupně se potom zapínají podle měnících se klimatických podmínek. Platí, že čím komplexnější řešení je použito, tím důležitější je kvalitní chlazení a také pravidelný servis, protože každé zařízení potká porucha dříve nebo později a servis zajistí co nejkratší dobu nefunkčnosti. [2] [1]

3.3.2 Zapojení střídačů

Střídače rozlišujeme dle zapojení na

- Střídače modulové – jeden střídač na každý modul zvlášť (nejefektivnější, nejdražší), jen u malých systémů, vyskytují se zřídka
- Střídače řetězcové – jeden střídač je napojený na několik fotovoltaických panelů propojených do série, nebo paralelně. Využití u středně velkých a velkých elektráren
- Střídače centrální – na jeden střídač jsou připojeny stovky až tisíce fotovoltaických panelů, využití u velkých elektráren [13]



Obrázek 28. Zapojení střídačů - a) centrální, b) řetězový, c) modulový [13]

3.3.3 Rozsah MPP

Charakterizuje rozsah napětí, při kterém by měl inverter optimálně pracovat. Je důležité, aby inverter dokázal přeměňovat elektrickou energii s vysokou účinností při změně vstupního napětí. Výkyvy jsou nežádoucí.

Dalším parametrem MPP je jeho účinnost, která udává rychlost reakce invertoru na měnící se okolní podmínky (svítivost záření, teplota atd.), které ovlivňují vstupní napětí na střídači. Čím rychlejší je reakce, tím více elektrické energie získáme, tím větší je udávána účinnost MPPT. [2]

3.4 Regulátory

Regulátory, neboli controllery, tvoří spojovací článek mezi solárními panely, akumulátorem a spotřebičem. Řídí tok výkonu od FV generátoru do akumulace a zátěže. Lze je charakterizovat ze strany systémového napětí (12V, 24V, 48V..), které je voleno na základě napětí FV panelů a napětí akumulčních baterií. Nicméně dnešní moderní regulátory umožňují automatické přizpůsobení napětí na základě napětí akumulátorů. Lze je dále charakterizovat z hlediska maximálního vstupního a výstupního proudu, se kterým regulátor zvládne pracovat. Úkolem regulátoru je řídit proces nabíjení a vybíjení. [3] [8]

Regulátory dělíme dle principu regulace na

- Regulátory s PWM
- Regulátory s MPPT

Úkoly regulátoru jsou

- Zajistit takové nabíjení, aby bylo dosaženo nejdelší životnosti akumulátorů. Spočívá v odpojení baterii od FV generátoru ve chvíli, kdy je dosaženo maximálního napětí.
- Zabránit hlubokému vybití akumulčních baterii. V případě poklesu napětí pod hraniční hodnotu, která charakterizuje vybitou baterii, musí regulátor odpojit spotřebiče od baterii, aby nedocházelo k dalšímu vybití, které by vedlo k poškození.
- Zabránit vybití baterii solárním generátorem. Při špatných slunečních podmínkách se kvůli poklesu vnitřního odporu fotovoltaické panely chovají, jako spotřebiče. [3]

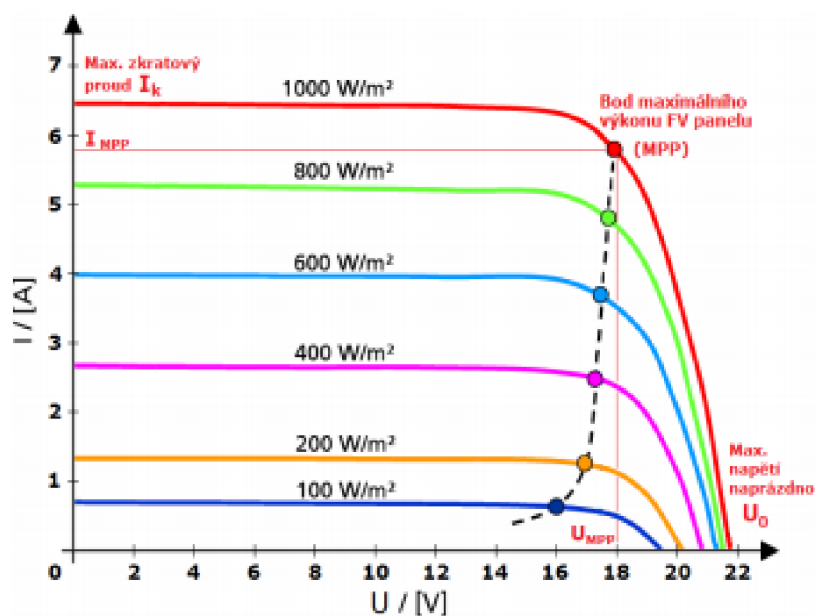
Pro dlouhou životnost baterii je řízení nabíjení a vybití klíčovou záležitostí. Jelikož je to činnost závislá na přesném zjišťování stavu baterii, jsou v dnešní době využívány nabíjecí regulátory s mikroprocesory.

Regulátor také obsahuje ochranu proti překročení proudu, například při zkratu. V tomto případě odpojí spotřebič od regulátoru. Součástí ochranných prvků bývá i ochrana proti přepólování.

Další důležitou funkcí regulátoru je oznámení o možném odpojení zátěže v případě hlubokého vybití baterie. Tím dá regulátor možnost uživateli snížit výstupní výkon a zabránit tak odpojení zátěže. Indikace probíhá prostřednictvím LED diod nebo LCD displeje. [2] [3]

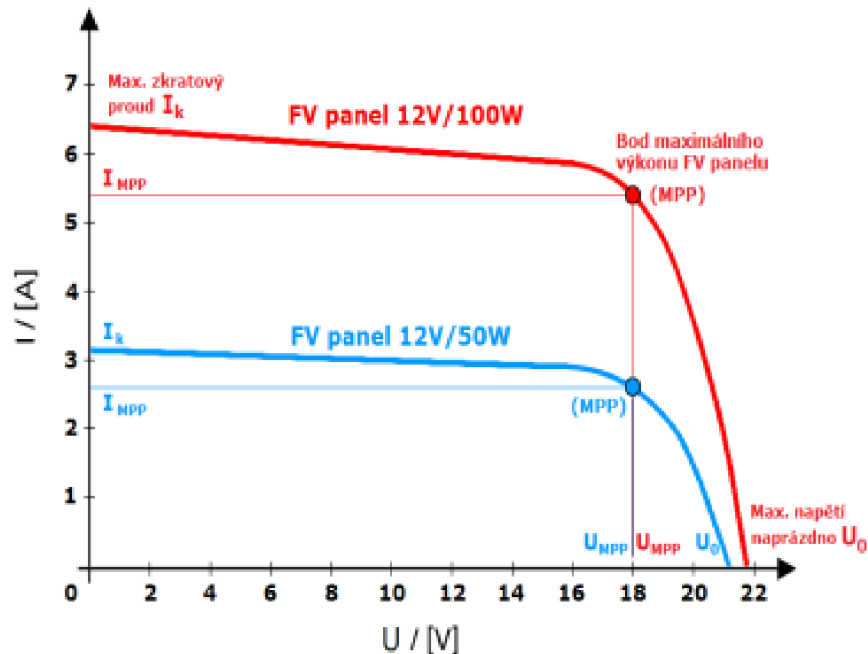
3.4.1 Principy nabíjení

Regulátory využívají principu nabíjení při konstantním napětí, při konstantním proudu nebo kombinací těchto dvou způsobů. Jelikož je nabíjení z FV generátoru závislé na okolních podmínkách, nelze slovo „konstantní“ brát doslova. Tento termín platí pouze v případě nabíjení z tvrdého zdroje. Je tedy nutné vycházet z V-A charakteristiky FV panelu. [3] [2]



Obrázek 29. V-A charakteristika monokrystalického panelu 12V/100W[2]

Z Obr. 28. jsou patrné hodnoty I_k a U_0 . Jsou to maximální hodnoty proudu a napětí, které panel dokáže vyprodukovat v případě stavu naprázdno při optimálních podmínkách. Po připojení zátěže tyto hodnoty výrazně poklesnou. Hodnoty I_{MPP} a U_{MPP} udávají velikosti napětí a proudu v bodě maximálního výkonu fotovoltaického panelu. Jak lze vidět, tak panely dokáží poskytovat napětí v malém intervalu, ale na úkor jejich výstupních proudů, které jsou intenzitou dopadajícího záření limitovány.



Obrázek 30. Porovnání VA charakteristik dvou panelů [14]

Reálně je výstupní proud z FV panelů přibližně lineárně závislý na intenzitě osvětlení. Tato skutečnost je příznivá spíše pro nabíjení konstantním napětím. Nabíjení konstantním proudem lze dosáhnout zvolením FV panelů o dostatečném výkonu, nebo použít více panelů o stejném výkonu a vhodně je zapojit. V praxi se panely zapojují paralelně pro dosažení požadovaného proudu, nebo sériově pro dosažení požadovaného napětí.

Ať se použije jakýkoliv z principů, vždy se musí brát ohled na parametry použitého akumulátoru, hlavně jeho hraniční napětí v nabitěm a vybitěm stavu.

Regulátory s principem nabíjení za konstantního proudu umožňují uživateli nastavení výstupního konstantního proudu, který bude během nabíjení, neměnný, přičemž se postupně během nabíjení zvyšuje napětí akumulátoru. Moderní regulátory obsahují mikroprocesory, které plně automatizují nabíjecí proces. Velikost nabíjecího proudu je udávána výrobcem akumulátoru a v případě, že tomu tak není, se volí proud o velikosti jedné desetiny kapacity baterie, tzn. Při kapacitě baterie 100Ah by byl nabíjecí proud 10A. Nevýhodou této metody nabíjení je poměrně dlouhá doba nabíjení.

Nabíjení za konstantního napětí se liší od předešlého způsobu tím, že konstantní hodnotou bude napětí a měnící se veličinou bude nabíjecí proud. Účinnost nabíjení tohoto typu je vysoká. Hodnotu maximálního konstantního napájecího napětí je nutné nastavit na hodnotu nabíjecího napětí daného typu akumulátoru, který opět uvádí výrobce. Po připojení vybitého akumulátoru dodává nabíjecí regulátor maximální možný nabíjecí proud, který z dané intenzity osvětlení může dostat. S postupným nabíjením se zvyšuje aktuální hodnota napětí, která charakterizuje stupeň

nabití baterie, tudíž se snižuje rozdíl mezi aktuální a nastavenou konstantní hodnotou napětí. Čím je rozdíl menší, tím se snižuje hodnota nabíjecího proudu. Konečný nabíjecí proud má ve finále o několik řádů menší velikost, než počáteční nabíjecí proud. Tento způsob se používá u aplikací, kde je poptávka po občasných, či krátkodobých odběrech a je potřeba mít akumulátor pokud možno stále nabitý. S ohledem na konstantní nabíjecí napětí nemůže docházet k přepětí. [3] [2]

3.5 Akumulátory

Akumulátory jsou zařízení, které mají vlastnost uskladnit, pojmout elektrický náboj. Nejvíce sledovaným parametrem akumulátorů je kapacita náboje v ampérhodinách, nebo ve formě energie ve watthodinách. Baterie je potom několik akumulátorů zapojených v sério-paraletním zapojení. [13]

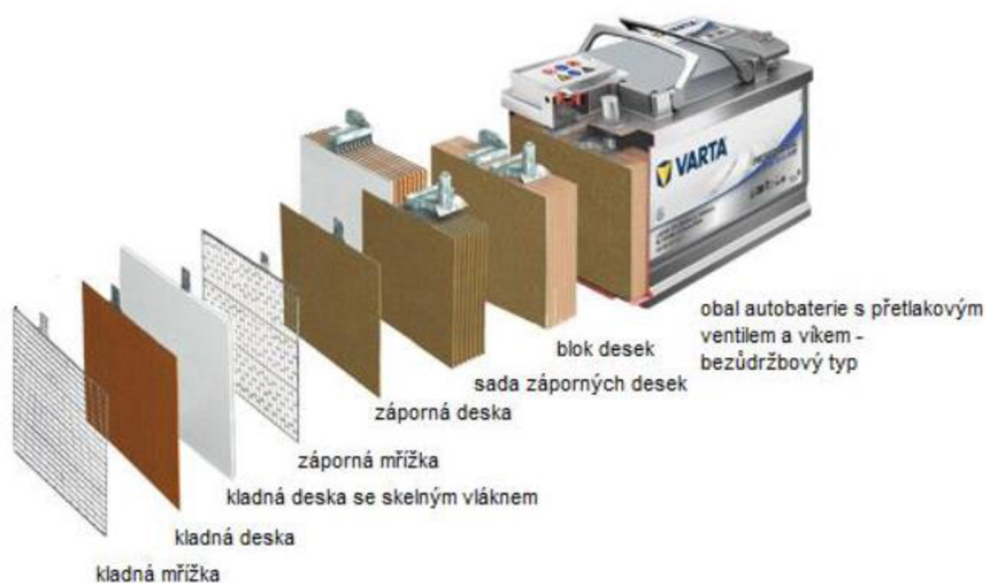
3.5.1 Olověné baterie

Olověné baterie jsou na našem trhu nejrozšířenějším typem baterií a celosvětově zastupují cca 45% vyráběných baterií.

Olověné akumulátory se skládají z nádoby a dvou mřížových pastovaných elektrod a vodného roztoku kyseliny sírové. Skládá se dále ze dvou desek, jedna vyplněná oxidem olovičitým a druhá houbovým olovem. Většinou se používá více desek.

Při nabíjení stoupá koncentrace kyseliny sírové a při vybíjení je proces opačný. Nabíjení akumulátoru tedy závislé na koncentraci kyseliny, což se dá měřit. Nominální napětí olověných článků je 2V při stavu naprázdno. Napětí vybitého článku je 1,75V a může klesnout až a 1V při hlubokém vybití. Počet cyklů až 500.

Nevýhodou těchto baterií je nízká hustota elektrické energie, tzn. méně energie na velkou hmotnost materiálu. Další nevýhodou je dlouhá doba nabíjení. Nejnovější jsou většinou bezúdržbové (není nutné dolévat vodu), protože při nabíjení na jedné elektrodě vylučován kyslík a na druhé vodík, se kterým rekombinuje zpět na vodu. [7]



Obrázek 31. Olověná baterie

Velkým pokrokem je gelový elektrolyt, což je směs kyseliny sírové s částicemi skelného prachu. Jsou bezpečnější a pohodlnější na údržbu. [13]

3.5.2 Lithiové akumulátory

Klíčovou surovinou pro výrobu tohoto typu baterií, je lithium, což je světlý a velmi reaktivní kov. Skládá se ze dvou elektrod, a to anody, která je vyrobená z uhlíku a katody, která je vyrobená z oxidu kovů. Elektrolyt je lithiová sůl v organických rozpouštědlech.

Dva typy akumulátorů, a to Li-on a Li-pol. Výhoda, oproti olověným, je relativně nízká hmotnost na kWh kapacity. Nevýhoda samovybití je téměř odstraněna a je možné využít téměř 100% jejich nominální kapacity. Je možnost rychlého vybíjení i nabíjení, proto jsou ideálním typem pro dynamické systémy. Nicméně i přes stále rozvíjející se technologie jsou baterie na bázi lithia stále velice drahé, cca 350 dolarů pro obyčejného spotřebitele a 100-200 dolarů v průmyslové výrobě na kWh kapacity.

Nominální napětí u Li-on a Li-pol se pohybuje okolo 3,3-3,7V. Mají vysoký počet nabíjecích cyklů, až 3000. Vhodnost kombinací materiálů pro výrobu elektrod, jsou momentálně ve výzkumu. [13]

Tabulka 5. Vlastnosti nejpoužívanějších baterií [13]

Srovnání nejpoužívanějších typů průmyslových baterií:				
Typ článku	Ni-Cd	Ni-MH	Li-ion	Olověný
Hustota energie (Wh.kg ⁻¹)	45-80	60-120	90-120	30-50
Počet cyklů (při 80% hloubce vybití)	1500	300-500	>1500	400-500
Projektovaná životnost	5 let +	3-4 roky	10 let+	10 let+
Doba nabíjení	1-2h	2-4h	1/4-4h	8-16h
Samovybití/měsíc (při cca 20°C)	20%	30%	5-10%	5%
Nominální napětí článku	1,2V	1,2V	3,3V	2V
Provozní teploty (pro vybíjení)	-40~60°C	-20 ~ 60°C	-20 ~60°C	-20 ~60°C
Požadavky na servis	60-90 dnů	30-60 dnů	6 měsíců	6 měsíců
Přibližné náklady (EUR/Wh)	0,33	0,65	0,33	0,11

3.5.3 Baterie LiFePo₄

Jedná se o Litium-železo.fosfátové akumulátory (LiFePo₄) využívající katodového materiálu LiFePo₄. Energetická hustota akumulátorů činí 90-110 Wh na kilogram s výkonem vyšším, jak 3000W na kilogram. Životnost článků se uvádí delší, jako 10 let nebo 2000 cyklů v optimálním režimu nabíjení/vybíjení a nominálním napětí 3,2 – 3,3V.



Obrázek 32. LiFePo₄ článek

V LiFePo₄ se využívá chemické reakce s Lithiem a sdílí mnoho vlastností s rozšířenými lithium iontovými bateriemi (akumulátory). Mezi klíčové výhody LiFePO₄ je bezpečnost (odolnost proti tepelným únikům) a schopnost dodávat vysoký proud při špičkových odběrech.

3.5.4 Nikl-kadmiové akumulátory

Nikl-kadmiové akumulátory, zkráceně NiCd je typ galvanického článku. Výhodou těchto článků je jejich odolnost vůči hlubokému vybití, takže se mohou skladovat ve vybitém stavu. Nevýhodou těchto článků je jejich relativně nízká energetická hustota, která činí 40-60Wh na kilogram a stejné množství dokáže dodat energii o výkonu 150W. Problematickou vlastností tohoto akumulátoru je jedovatost kadmia, což je základní prvek, z něhož se skládá záporná elektroda, což je vlastně důvod problematického skladování použitých článků. Z tohoto důvodu byla výroba, NiCd baterií, zakázána.

Jmenovité napětí článků je 1,2V, v nabitém stavu činí 1,35V a 0,8-1V ve vybitém stavu. Další nevýhodou oproti novějším používanějším článkům je samovybití. Proto je optimální článek nabíjet před použitím.

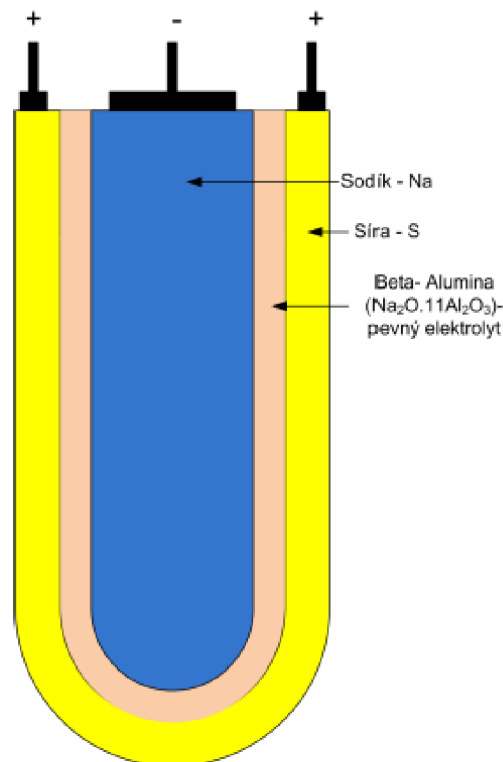


Obrázek 33. NiCd článek

3.5.5 Baterie Sodium-Sulfur

Jedná se o baterie využívající kombinaci sodíku a síry (NaS). Katoda je tvořena roztavenou sírou a anoda roztaveným sodíkem. Sodík je velice reaktivní a patří do skupiny prvků, se kterými lze dosahovat velké hustoty energie, která se pohybuje v řádech stovek Wh.kg^{-1} (400 Wh.kg^{-1}). Pro porovnání, má olověná baterie hustotu 30 Wh.kg^{-1} . Účinnost se pohybuje mezi 86 – 95%. Mohou být vybíjeny velkými výkony a rychle nabíjeny, což patří mezi jejich výhody. Nedochází u nich k samovybíjení. Velkou nevýhodou je, že se musí nacházet v bezvibračním okolí, kvůli jejich vnitřním roztaveným složkám, které musí být v klidu. Je proto téměř nemožné, nebo velmi obtížné, je transportovat.

Nominální napětí článků tohoto typu, se pohybuje kolem 2V. Umísťují se do zapouzdřených modulů s vakuem nebo argonem pro redukci ztrát. Jsou charakteristické velkou přetížitelností, až 6-ti násobku jmenovitého výkonu po krátkou dobu (řádově desítky sekund). Životnost těchto akumulátorů se pohybuje okolo 15 let. Náklady na jejich výrobu jsou relativně nízké. [13]



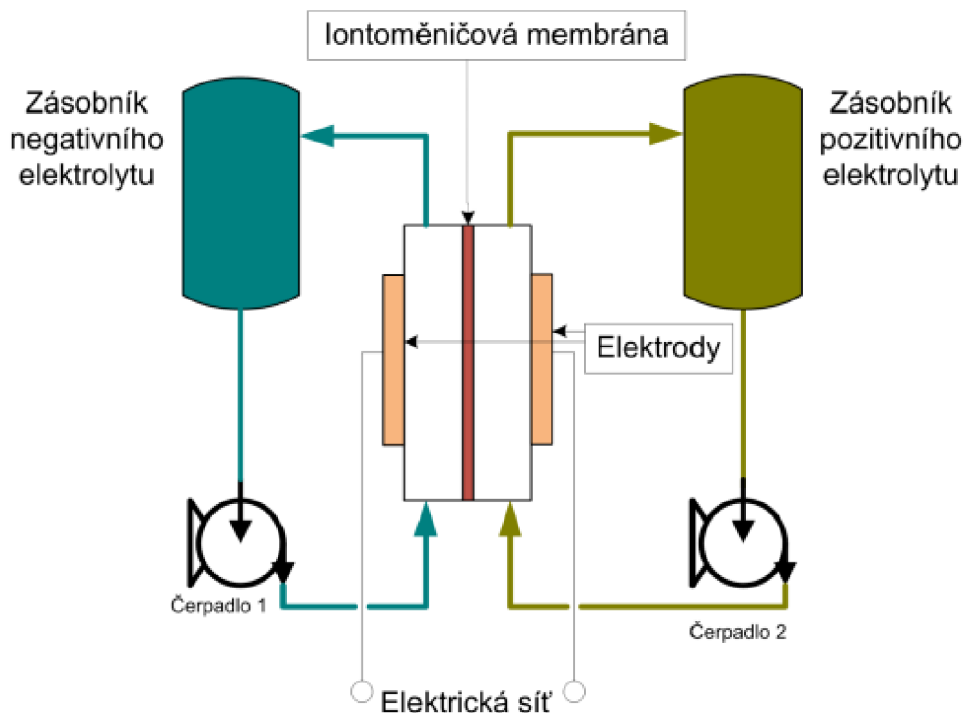
Obrázek 34. Schéma sodíkové baterie. [13]

3.5.6 Průtokové baterie

Průtokové baterie jsou relativně novou technologií. Jsou nabíjeny stejně, jako již zmíněné baterie s tím rozdílem, že se provádí skladování prostřednictvím tekutého elektrolytu, který je čerpadlem dopravován do zásobních tanků a z nich je zpět přiváděn do chemického článku.

Druhy průtokových baterií

- Elektrochemické oxidace a redukce vanadu – VRB
- Roztok Polysulfid Bromidu
- Uskladnění pomocí halogenu Br-ZnBr



Obrázek 35. Princip průtokové baterie [13]

V této kapitole popíši jen technologii VRB, protože má podle mě největší potenciál.

Jedná se o největšího kandidáta pro využití pro akumulaci elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Její jedinečnost tkví převážně v tom, že nedochází ke znehodnocení elektrolytu během nabíjení a vybíjení. Teoreticky se jedná o baterii nekonečné životnosti. Nicméně ne všechny součásti této baterie mají neomezenou životnost. Jednou z těch částí je iontoměničová membrána, která odděluje oba elektrolyty a její životnost čítá převyšujících 15 000 cyklů.

Při nabíjení dochází k iontové výměně mezi dvěma elektrolyty, proto je k oddělení nutná iontovo-propustná polymerní membrána.

Kapacita této baterie je dána pouze objemem elektrolytu v zásobnících, kdy energetická hustota elektrolytu je uváděna v rozsahu 15 – 25 kWh.m⁻³. Měrná hmotnost VRB článku činí 6,5–10kg.kW⁻¹, přičemž výrobce uvádí maximálně 12,5 kg.kW⁻¹. Samovybíjení je téměř zanedbatelné, a pokud se elektrolyt nachází mimo články, tak dokáže být nabitý neomezeně dlouhou dobu. Nominální hodnota napětí u plně nabitého článku činí 1,35V a v případě vybitého 1V. Cena instalace jedné kWh kapacity vyjde na 500-700 €/kWh u zařízení řádově MWh. [13]

4 NÁVRH A REALIZACE MOBILNÍ FOTOVOLTAICKÉ ELEKTRÁRNY

4.1 Návrh rámcové koncepce

Mobilní fotovoltaická elektrárna by měla být sestrojena tak, aby byl celý systém komfortně přenosný, bezpečný, dostatečného výkonu pro napájení menších spotřebičů a dimenzovaný pro napájení z pěti panelů Sunny Flexible Mono 100 Wp.

Dalšími parametry byly výstupy o různých napětích, a to zásuvka 230V, výstup 12V a 5V pro napájení výkonově nenáročných spotřebičů.

Součástí elektrárny bude i monitoring napětí, proudů a výkonů v jednotlivých větvích obvodu.

Prvním krokem bylo promyslet zpracování elektrárny a rozmístění jednotlivých přístrojů v úložném prostoru. Na základě promyšlení pak byl vybrán přenosný box dostatečných rozměrů. Byl tedy vybrán úložný box o objemu 60l a rozměrech 58x39x33,5cm a nosnosti cca 30kg.

Na delší, 58cm dlouhé, straně budou vyřezány otvory pro umístění napájecích výstupů, otvory pro displej, ovládací tlačítka displeje, vypínací tlačítko displeje a jističe. Napájecí výstupy budou mít IP54 a pro jističe, displej a tlačítka bude vyroben kryt z plexiskla, jehož hrany budou po obvodu potaženy těsnící gumou, aby bylo elektrárnu možné využívat i za deštivého počasí.

Elektrická část elektrárny bude rozdělena v přenosné bedně do dvou pater. V prvním, přízemním, patře budou umístěny baterie, děliče napětí, systém měření, jističe, displej a tlačítka. Baterie budou, pro zachování stability, umístěny do protilehlých rohů bedny. Ve druhém patře bude umístěný regulátor a střídač.



Obrázek 36. KIS Clipper Box M černý-šedé viko 60l

4.2 Dimenzování a výběr jednotlivých komponentů

4.2.1 Fotovoltaické panely

Klíčovým parametrem při výběru fotovoltaických panelů je jejich flexibilita, tzn. hmotnost, rozměry a skladovatelnost, tudíž klasické panely nepřipadaly v úvahu, protože jejich průměrná hmotnost je 15kg. Flexibilní panely mají vyšší podíl Kč/W ve srovnání s konvenčními fotovoltaickými panely.

Nejvhodnější volbou byl tedy výběr panelů Sunny Flexible Mono 100 Wp s hmotností 1,8 kg. Jedná se o tenkovrstvý monokrystalický panel, který dokáže i při částečně zatáhnuté obloze vyrábět 60% svého jmenovitého výkonu a při celkově zatáhnuté obloze cca 10% výkonu

Provedl jsem měření panelů a při velmi dobrých podmínkách bylo naměřeno 50-80W z každého panelu. Rozdíly, oproti výrobcem uvedeným hodnotám, mohou být způsobeny stářím panelů a odlišností od STC podmínek.

Panely jsou mírně ohybatelné, a to o cca 10% zakřivení plochy z důvodu křehkosti článků. Jejich relativní pružnost a přizpůsobivost dává možnost využití osazením střechy automobilu, lodě a jiné nerovné povrchy. Panely obsahují standardní MC4 konektory. [19]



Obrázek 37. Flexibilní fotovoltaický panel - Sunny Flexible Mono 100 Wp [19]

Parametry panelu - Sunny Flexible Mono 100 Wp:

- Jmenovitý výkon: 100 Wp
- Jmenovité napětí: 18 V
- Účinnost panelu: 21 %
- Hmotnost: 1,8 kg
- Napětí v bode max. výkonu: 17,6 V
- Proud v bode max. výkonu: 5,4 A
- Napětí naprázdno: 20,8 V
- Zkratový proud: 5,78 A
- Rozměry: 1100x580 mm

4.2.2 Akumulace elektrické energie

Před výběrem samotných článků je potřeba stanovit, s jakým napětím bude celý systém pracovat. Pro malé systémy je hladina 12V takřka pravidlem. Při výběru článků hraje roli několik základních parametrů, a to maximální vybíjecí proud, nominální napětí, počet cyklů a samozřejmě kapacita a v neposlední řadě cena.

Po uvážení výše zmíněných faktorů byly vybrány čtyři články LiFePo₄ s nominálním napětím 3,2V a kapacitou 40Ah a hmotností 1,6kg. Při sériovém spojení těchto čtyř článků dostáváme systém o hladině 12,8V a kapacitě 160Ah, což odpovídá 480Wh.



Obrázek 38. Akumulátorový článek LiFePo₄, 40Ah

Parametry akumulátorových článků LiFePo4:

- Nominální napětí: 3,2 V
- Kapacita: 40 Ah
- Rozsah pracovního napětí: 2,8 – 4,0 V
- Optimální vybíjecí proud: < 20 A
- Maximální vybíjecí proud: 120 A
- Optimální nabíjecí proud: < 20 A
- Maximální dobíjecí proud: 120 A
- Hmotnost: 1,6 kg
- Rozměry: 116x46x183 mm

4.2.3 Střídač

Při výběru invertoru je potřeba klást důraz na parametry, které jsou odvozeny z předpokládaného využití elektrárny a co se od elektrárny očekává.

Naším základním parametrem bylo vstupní napětí střídače, tzn. napěťová hladina baterií, tzn. 12V. Druhým parametrem byl předpokládaný dostatečný výkon, účinnost a cena. Jak lze vidět v parametrech uvedených níže, tak byl důraz kladen spíše na cenu, než na účinnost. Z praktického měření vyplynulo, že se ve stavu naprázdno jedná o ztrátu 6W přeměněných do tepla.



Obrázek 39. Střídač TRONIC TSW 300 A1 [18]

Parametry střídače TRONIC TSW 300 A1:

Vstup:

- Napětí na DC straně: 12 V
- Provozní napětí napětí: 11 – 15,5 V
- Maximální napětí na DC straně: 15,6 V
- Maximální proud na DC straně: 40 A
- Alarm nízkého napětí DC strany: 10,5 V
- Vypnutí z důvodu nízkého napětí DC strany: 10 V
- Přepět'ová ochrana DC strany: 16 V [18]

Výstup:

- Napětí na AC straně: 220 – 240 V, 50 Hz
- Proud na AC straně: 1,3 A
- Maximální nepřetržitý odebíraný výkon: 300 W
- Maximální špičkový odebíraný výkon: 600 W; 0,1 s
- Účinnost: 82 %
- Ochrana proti přetížení: > 320 W
- Napětí USB portu: 5 V
- Proud USB portu: 0,5 A
- Není možnost připojit zařízení třídy ochrany I [18]

4.2.4 Regulátor

Při výběru regulátoru je to opět o kompromisech tak, jako u ostatních komponentů. Některé parametry jsou již dané výběrem předešlých komponentů a některé jsou dány naším výběrem a preferencemi. Rozhodli jsme se pro výběr regulátoru s MPPT (Maximum Power Point Tracking) z výhod uvedených v teoretické části práce.

Výběr regulátoru je dán několika parametry, které lze určit na základě stanovených provozních parametrů elektrárny.

Elektrárna obsahuje pět panelů o celkovém výkonu 500W. Víme, že hladina systému bude 12V, to znamená, že máme všechny parametry potřebné k výpočtu proudu na výstupu regulátoru.

$$I_2 = \frac{P_{PV}}{U_{bat}} = \frac{500}{10} = 50 \text{ A}$$

I_{PV} ... jmenovitý proud panelů [A]

I_2 ... proud na výstupu z regulátoru [A]

P_{PV} ... souhrnný výkon panelů [W]

U_{bat} ... nejnižší napětí baterie, při kterém dojde k odepnutí pomocí BMS [V]

V praxi se vyskytne vypočtená hodnota I_2 jen v případě, kdy baterie budou mít hraniční napětí, LiFePo4 článků, začínající rychle progresující degradaci vlivem podbití, tzn. na minimálním možném napětí, kdy odepíná Battery Management System, a ideálních okolních podmínkách (STC), kdy panely vyrábí maximum svého jmenovitého výkonu.

Vzhledem ke stavu a stáří panelů, jejich předpokládanému natočení, uložení ke slunci a k reálně změřené výrobě bylo rozhodnuto pro výběr regulátoru s maximálním proudem 40A, který je podstatně levnější, než regulátor 50A, jehož maximální potenciál by byl využit jen velmi zřídka.

V případě ideální výroby, kdy by hodnota výstupního proudu teoreticky překročila hranici 40A, začne omezovat sám regulátor. V případě chybného omezování regulátorem jsou všechny obvody chráněny 40A jističi a záložními ochranami ve formě 50A pojistek.

Další parametr, který ovlivní výběr regulátoru, je napětí na vstupní straně regulátoru, to znamená na straně fotovoltaických panelů. Napětí záleží na charakteristických parametrech panelů, bere se v potaz napětí naprázdno, a zda se jedná o zapojení do série, paralelně či serio-paralelně.

Vzhledem k ceně a parametrům byl vybrán MPPT regulátor z portálu Aliexpress. Nejedná se o značkový, průmyslově vyráběný, nýbrž o „amatérsky“ zpracovaný regulátor.

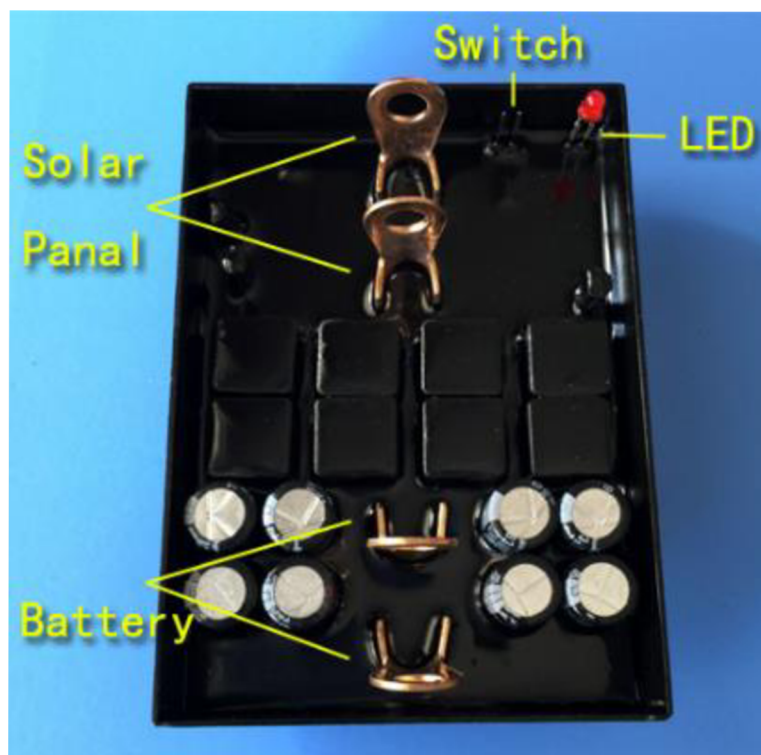
Parametry regulátoru:

Maximální napětí na vstupu: 40V

Nabíjecí napětí na výstupu: 14,4V

Maximální proud: 40A

Účinnost: < 87%



Obrázek 40. Regulátor

Výběrem tohoto regulátoru bylo stvrzeno maximální výstupní napětí panelů 40V, tudíž nebylo možné, vzhledem k napětí panelů naprázdno 20,8V, zapojit panely do série. Hodnota výstupního napětí panelů je současně ovlivněna okolní teplotou a platí, že se snižující se teplotou se zvyšuje napětí.

Dle specifikace panelu se se změnou teploty o jeden stupeň celsia zvýší/sníží napětí o 64 mV. Pokud bychom předpokládali teplotu -25°C , tak by pro napětí naprázdno platilo

$$U_{0_{-25}} = U_0 + (t_{STC} - t) \cdot \Delta U$$

$$U_{0_{-25}} = 20,8 + (25 - -25) \cdot 64 \cdot 10^{-3} = 24V$$

$U_{0_{-25}}$ Napětí naprázdno při -25°C [V]

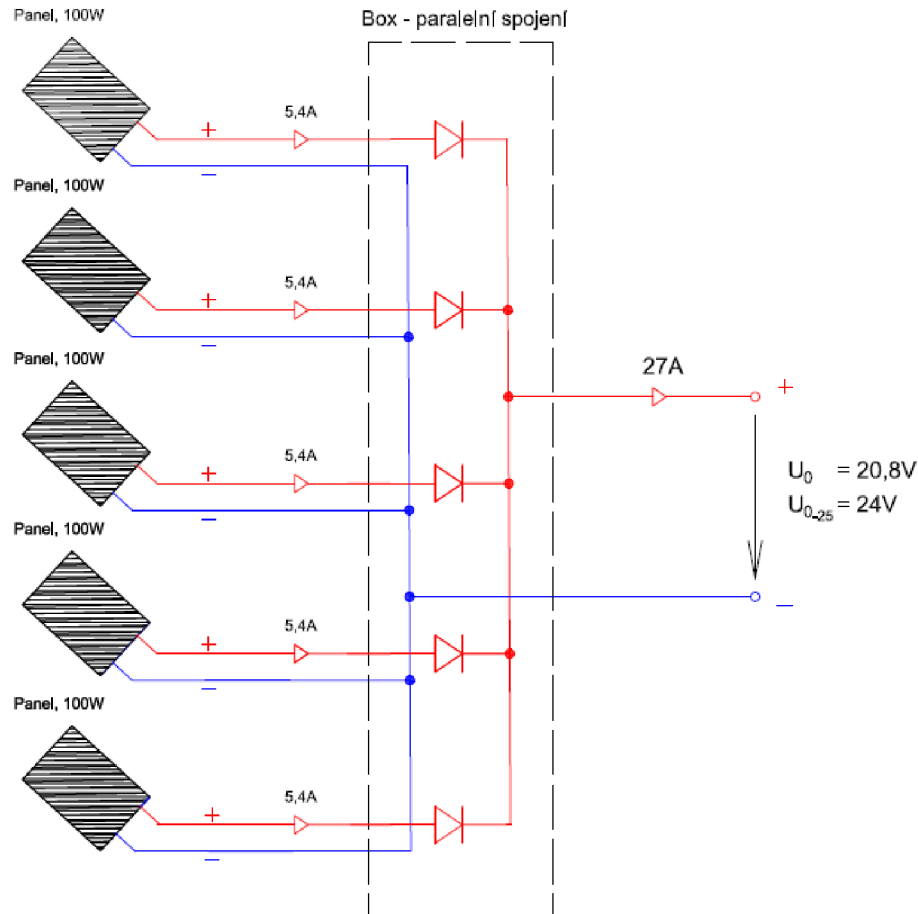
U_0 Napětí naprázdno při 25°C [V]

t_{STC} teplota STC (Standard Test Conditions, 25°C) [$^{\circ}\text{C}$]

t dimenzovaná teplota [$^{\circ}\text{C}$]

Jak vyplývá z výsledku rovnice uvedené výše, dva panely v sérii nepřichází s vybraným regulátorem v úvahu, protože by při dimenzovaných -25°C hrozilo překročení maximálního napětí regulátoru, které by vedlo k jeho nevratnému poškození.

Zapojení všech pěti panelů bude tedy provedeno paralelně, z čehož dostáváme diagram na Obr. 41.



Obrázek 41. Schematicky znázorněné paralelní spojení všech FV panelů

Celkový proud na vstupu regulátoru tedy bude roven

$$I_1 = n \cdot I_{PV} = 5 \cdot 5,4 = 27A$$

I_1 ... celkový proud na výstupu z panelů [A]

I_{PV} ... proud panelu v bodě maximálního přenášeného výkonu [A]

n ... počet panelů [-]

Jelikož platí, že

$$U_{0-25} < U_{reg}, \text{ tedy } 24V < 40V$$

$$I_1 < I_{reg}, \text{ tedy } 27A < 40A$$

U_{reg}, I_{reg} ... Maximální hodnota napětí a proudu na vstupních svorkách regulátoru [V, A]

může být tento regulátor, s paralelním spojením pěti panelů s výkonem 100Wp, použit.

4.2.5 Monitoring

4.2.5.1 Arduino a zobrazení

Pro účely monitorování a zobrazování naměřených hodnot je využito klonu Arduino Mega 2560. Tato verze Arduina byla vybrána z důvodu vysokého počtu digitálních (54 pinů), ale převážně analogových vstupů (16 vstupů), díky kterým je možné zobrazit nepřeborné množství hodnot. Kód pro ovládání Arduina je programován v prostředí Arduino IDE, který je založený na jazyku C/C++, v počítači a prostřednictvím kabelu s konektory USB-A-B transferován do mikropočítače. Klon se od originálního kusu, ve funkčnosti, příliš neliší. Jedinou nepříjemností je instalace dodatečného ovladače k čipu, která je pak kompenzována příznivou cenou.



Obrázek 42. Klon Arduino Mega 2560

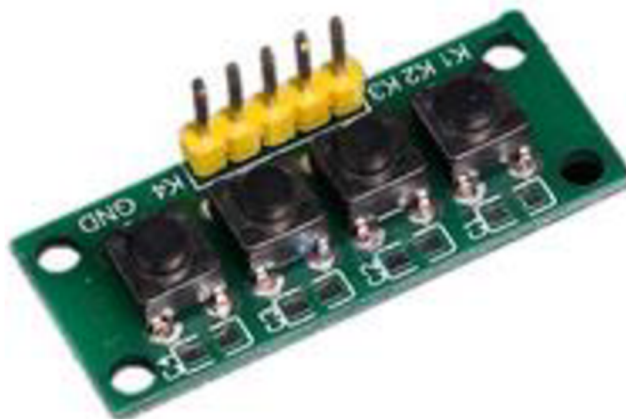
Pro zobrazení naměřených hodnot bylo použito grafického displeje s rozlišením 128x64 a zobrazovací plochou 33x66,5mm.



Obrázek 43. Zobrazovací grafický displej 128x64

4.2.5.2 Tlačítka

Čtyř tlačítková klávesnice sloužící k ovládání zobrazení na displeji. Má pět pinů, každý pin přísluší k jednomu tlačítku a společná zem. Tlačítkové piny se připojují na digitální piny Arduina.

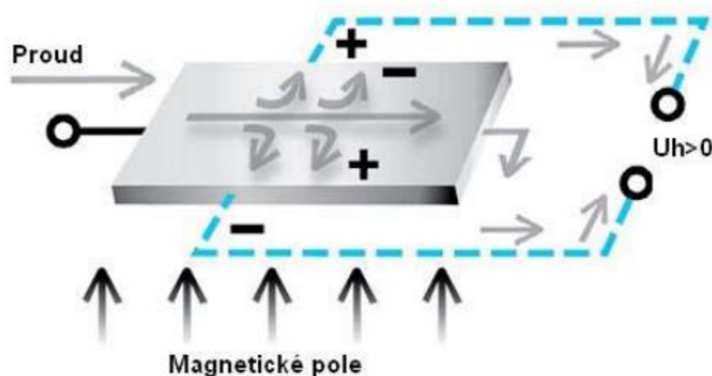


Obrázek 44. Tlačítka pro ovládání zobrazení na displeji

Tlačítka měla, pro plánované využití, příliš krátký hmatník, tudíž bylo nutné vyměnit stávající hmatníky za nové o velikosti 9 mm.

4.2.5.3 Hallové senzory

Hallové senzory jsou elektronické součástky využívající tzv. Hallova jevu. Pokud prochází stejnosměrný elektrický proud plochou destičkou z vodivého materiálu a v kolmém směru na pohybující se částice působí magnetická indukce, jsou tyto částice vychylovány v příčném směru, kde se vlivem hromadění začne vytvářet kladný elektrický potenciál a vzniká takzvané Hallovo napětí U_H .



Obrázek 45. Zobrazení funkce Hallové sondy

Aby bylo možné elektrárnu plně monitorovat, bylo zapotřebí čtyř Hallových sond, a to o jmenovitém měřeném proudu do 50A, 20A a 5A. Senzory s maximálním proudem 50A měří proudy z regulátoru do baterie a z baterie do střídače, 20A měří 12V výstup a 5A výstupy 5V. Přesnost měření závisí na každém kusu a samozřejmě je potřeba kalibrovat analogový vstup Arduina určený pro daný senzor.

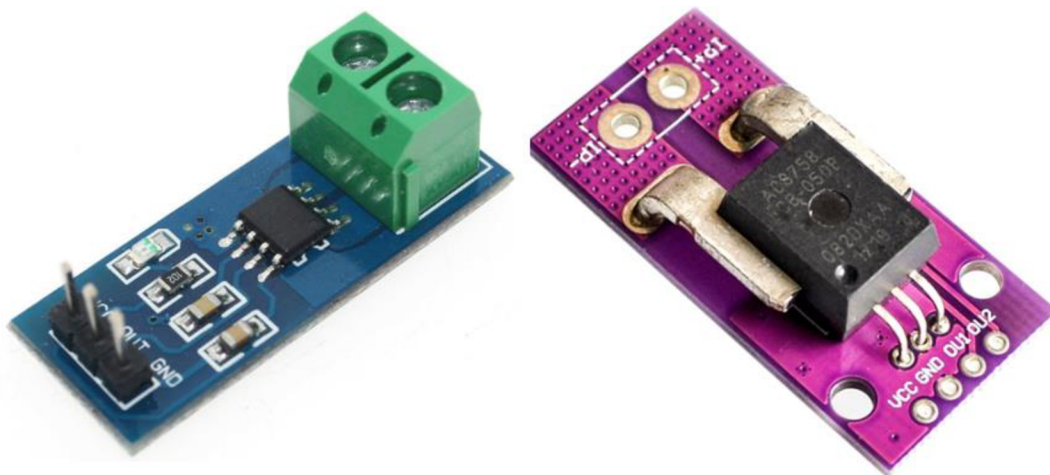
Všechny použité senzory mají napájecí napětí 5V a dokáží měřit i záporné (opačného směru) proudy. Každý senzor má tudíž napětí naprázdno o velikosti 2,5V, což je polovina napájecího napětí.

Rozlišení a ceny (čínský trh) senzorů jednotlivých rozsahů:

5A - 185mV/A

20A - 100mV/A

50A - 40mV/A



Obrázek 46. 5A, 20A a 50A Hallův senzor

4.2.5.4 Děliče napětí

Děliče napětí byly využity v obvodech pro měření napětí. Jelikož Arduino dokáže pracovat pouze se signály do 5V, bylo nutné pro měřené obvody s vyšším napětím vytvořit děliče napětí tak, aby měřené napětí bylo nižší, jako 5V. Děliče napětí byly vytvořeny pomocí potenciometrů, díky kterým je možné nastavit přesné požadované napětí.



Obrázek 47. Potenciometr

Pro tuto elektrárnu bylo použito čtyř 25k Ω potenciometrů, a to pro měření napětí na panelech a na všech čtyřech bateriových člancích.

4.2.5.5 Měníče napětí

Elektrárna má obsahovat 5V výstup pro napájení převážně mobilních telefonů, tabletů a dále bylo nutné vytvořit obvod pro napájení Arduina, jehož napájecí napětí je 5-12V v závislosti na způsobu napájení. Bylo zvoleno napájení přes USB-B konektor napětím 5V, protože se jedná o napájení s nejmenšími ztrátami.

Pro 5V výstup i pro napájení arduina byl zvolen stejný měnič. Měníč o jmenovitém proudu 3,5A a účinnosti až 95%. Z měření bylo zjištěno kolísání, které zásadně ovlivňuje přesnost měření arduina, +- 0,04V, což je akceptovatelné.



Obrázek 48. Měníč napětí 12/5V

4.2.6 Kabely a vodiče

Kabely a vodiče jsou nedílnou součástí každého elektrického systému pro vedení a distribuci elektrické energie. Pro správné dimenzování je potřeba znát předpokládaný proud procházející vodičem, dle kterého bude vybrán vodič vyhovujícího průřezu, z jehož charakteristických parametrů, jako oteplovací konstanta, rezistivita, bude vypočteno maximální oteplení vodiče.

Kabel pro vývod energie z každého panelu zvlášť

Pro přenos elektrické energie z každého fotovoltaického panelu byl využit kabel s měděnými jádry $2 \times 2,5 \text{ mm}^2$ s izolací ze syntetického kaučuku.

Ze specifikace fotovoltaického panelu víme, že kabelem poteče 5,4A. Jedná se o kabel s uložením E, tedy na vzduchu, s proudovou zatížitelností 20A.

Zatížitelnosti kabelů jsou výrobcem uváděny při teplotě 25°C . V první řadě tedy musíme provést výpočet ekvivalentního zatížení, které bude respektovat teplotu okolního prostředí lišící se od teploty 25°C . Jelikož se jedná o fotovoltaickou elektrárnu, jejíž kabely budou vystaveny přímému slunci, bude brána v úvahu teplota okolí 40°C . Potom platí

$$I_{ez1} = \frac{I_{PV}}{k_1} = \frac{5,4}{0,9} = 6A$$

,kde

I_{ez} ... ekvivalentní zatěžovací proud [A]

I_{PV} ... proud panelu v bodě maximálního přenášeného výkonu [A]

k_1 ... přepočítavací součinitel pro okolní teplotu vzduchu odlišnou od 30°C [-]

Výpočet maximálního oteplení kabelu s měděnými jádry $2 \times 2,5 \text{ mm}^2$ s izolací ze syntetického kaučuku, se zatížitelností na vzduchu 20A, se provede následovně

$$\Delta\vartheta_z = \vartheta_z - \vartheta_0 = 60 - 40 = 20^\circ\text{C}$$

$$i = \frac{I_{ez}}{I_z} = \frac{6}{20} = 0,3$$

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_z \cdot i^{2,492} = 20 \cdot 0,3^{2,492} = 1^\circ\text{C}$$

$$\Delta\vartheta_1 = \Delta\vartheta \cdot (1 - e^{-\tau}) = 1 \cdot (1 - e^{-\infty}) = 1^\circ\text{C}$$

$$\tau' = \frac{t_v}{\tau} = \frac{\infty}{82} = \infty$$

$$\vartheta = \vartheta_0 + \Delta\vartheta_1 = 40 + 1 = 41^\circ\text{C}$$

, kde

$\Delta\vartheta_z$... maximální dovolené provozní oteplení

$\Delta\vartheta$... maximální dooteplení způsobené proudem I_{ez}

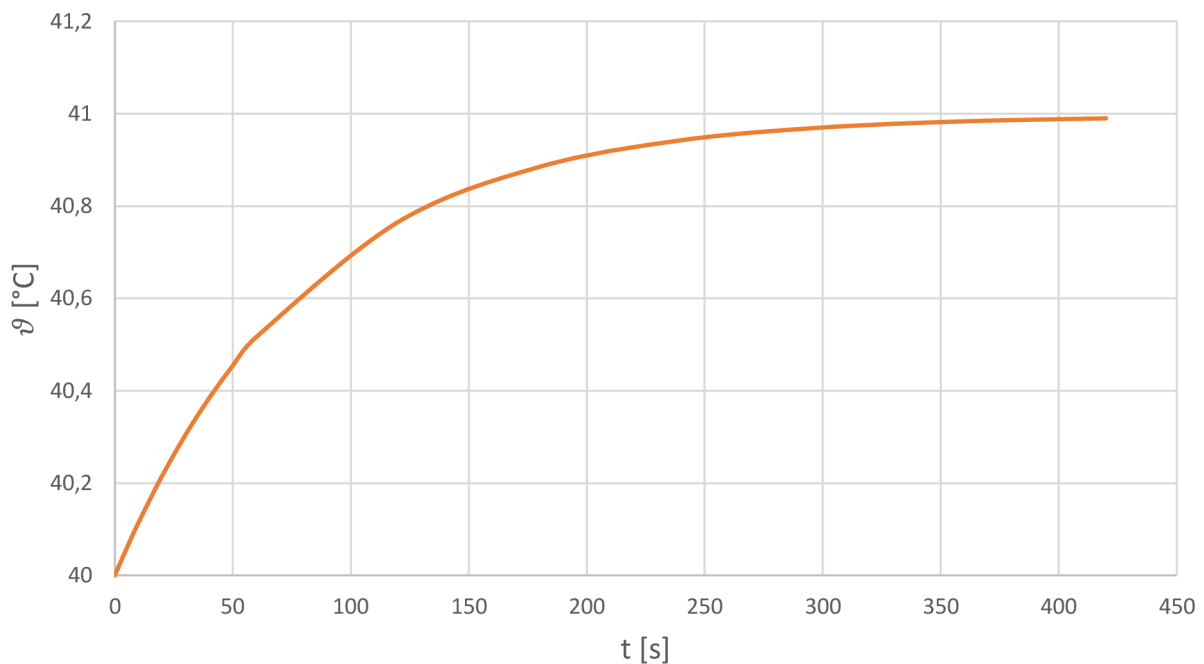
$\Delta\vartheta_1$... oteplení v čase t od počátku průchodu proudu

$\Delta\vartheta$... celková teplota vodiče

I_{ez} ... proud působící maximální oteplení [A]

I_z ... proudová zatížitelnost vodiče

Níže je uvedený průběh oteplení kabelu od počátku průchodu proudu 6A při okolní teplotě 40°C .



Obrázek 49. Průběh oteplení kabelu $2 \times 2,5 \text{ mm}^2$ při proudu 5,4A a teplotě okolí 40°C

Vodiče vyvádějící výkon z boxu paralelního spojení panelů

Pro přenos elektrické energie z boxu paralelního spojení panelů byly využity vodiče s měděnými jádry $1 \times 10 \text{ mm}^2$ s izolací z PVC se zatížitelností na vzduchu 79 A .

V kapitole 4.2.4. byl vypočten maximální proud $I_1 = 27 \text{ A}$, který bude produkovaný paralelním spojením panelů o celkovém špičkovém výkonu 500 Wp .

Výpočet průběhu maximálního oteplení se provádí stejným způsobem, jako v předešlém případě se zachovanými podmínkami.

$$I_{ez1} = \frac{I_1}{k_1} = \frac{27}{0,87} = 31 \text{ A}$$

$$\Delta\vartheta_z = \vartheta_z - \vartheta_0 = 70 - 40 = 30^\circ\text{C}$$

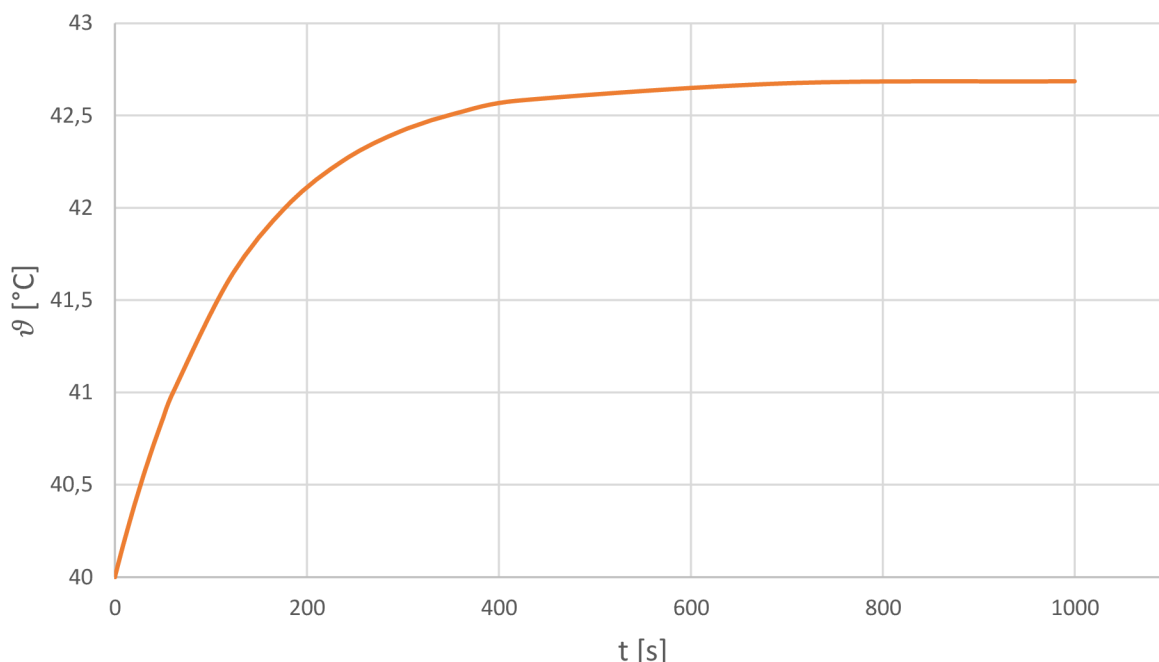
$$i = \frac{I_{ez1}}{I_z} = \frac{31}{79} = 0,39$$

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_z \cdot i^{2,492} = 30 \cdot 0,39^{2,492} = 2,7^\circ\text{C}$$

$$\Delta\vartheta_1 = \Delta\vartheta \cdot (1 - e^{-\tau}) = 2,7 \cdot (1 - e^{-\infty}) = 2,7^\circ\text{C}$$

$$\tau' = \frac{t_v}{\tau} = \frac{\infty}{130} = \infty$$

$$\vartheta = \vartheta_0 + \Delta\vartheta_1 = 40 + 2,7 = 42,7^\circ\text{C}$$



Obrázek 50. . Průběh oteplení vodiče $1 \times 10 \text{ mm}^2$ při průchodu proudem 27 A a teplotě okolí 40°C

Vodič pro přenos elektrické energie z regulátoru do baterie a z baterie do invertoru

V kapitole 4.2.4. jsme vypočetli maximální možný proud na sekundární straně regulátoru, který bude omezen na proud 40A. Při selhání omezení proudu vybaví 40A jističe a při jejich selhání 50A pojistky.

Obvod propojující baterie a invertor je dimenzován na stejný proud, jako v případě obvodu mezi regulátorem a bateriemi, protože maximální proud invertoru je výrobcem uváděn 40A.

Pro oba případy tedy byly použity vodiče s měděnými jádry $1 \times 10 \text{ mm}^2$ s izolací z PVC se zatížitelností na vzduchu 79A.

Jelikož byl vybrán černý plastový box vyskytující se během provozu na ostrém slunci, budeme uvažovat teplotu v boxu rovnu 50°C . Maximální provozní teplota měděného jádra je 70°C . Z těchto hodnot určíme $k_1 = 0,71$.

$$I_{ez2} = \frac{I_{inv}}{k_1} = \frac{40}{0,71} = 56,4 \text{ A}$$

$$\Delta\vartheta_z = \vartheta_z - \vartheta_0 = 70 - 50 = 20^\circ\text{C}$$

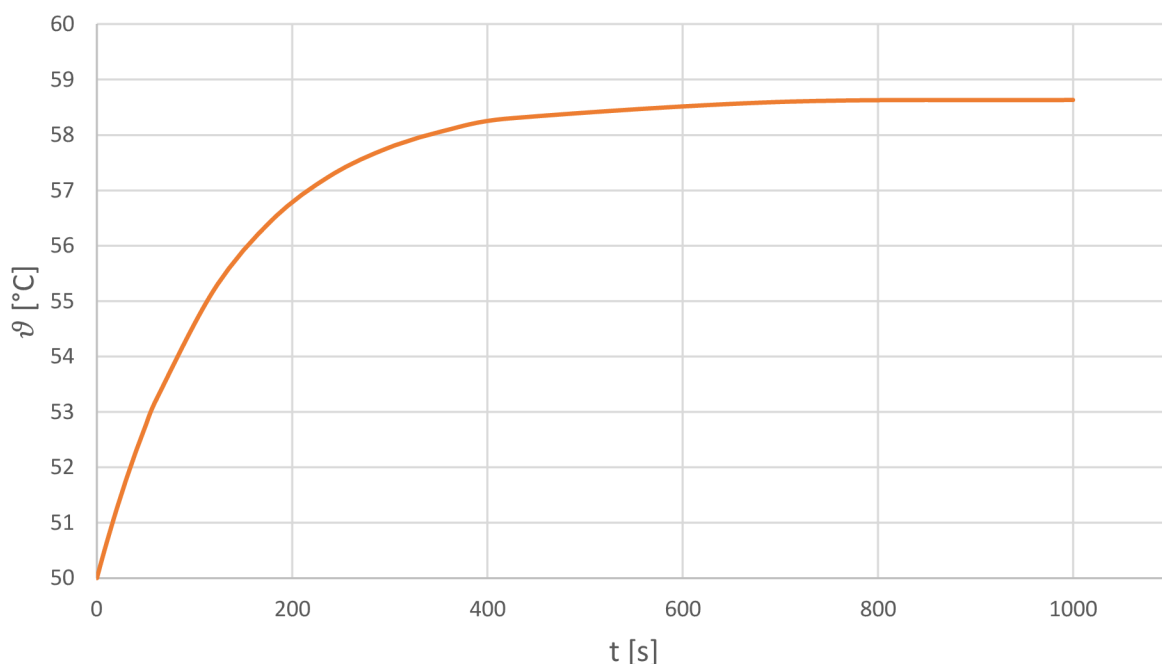
$$i = \frac{I_{ez2}}{I_z} = \frac{56,4}{79} = 0,714$$

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_z \cdot i^{2,492} = 20 \cdot 0,714^{2,492} = 8,64^\circ\text{C}$$

$$\Delta\vartheta_1 = \Delta\vartheta \cdot (1 - e^{-\tau}) = 8,64 \cdot (1 - e^{-\infty}) = 8,64^\circ\text{C}$$

$$\tau' = \frac{t_v}{\tau} = \frac{\infty}{130} = \infty$$

$$\vartheta = \vartheta_0 + \Delta\vartheta_1 = 50 + 8,64 = 58,64^\circ\text{C}$$



Obrázek 51. Průběh oteplení vodiče $1 \times 10 \text{ mm}^2$ při průchodu proudem 40A a teplotě okolí 50°C

Vodič pro přenos elektrické energie z baterie do výstupu 12V

Z průzkumu spotřebičů na trhu jsem vydedukoval vyhovující maximální výkon 150W. Dimenzovaný proud tedy bude roven

$$I_{12V} = \frac{P_{12V}}{U_{bat}} = \frac{150}{10} = 15A$$

Z vypočteného zatěžovacího proudu byly vybrány vodiče 2,5 mm² s izolací z PVC se zatížitelností na vzduchu 30A. Předpokládáme stejnou teplotu okolí, jako v předešlém případě, a to 50°C. Ekvivalentní proud bude

$$I_{ez3} = \frac{I_{12V}}{k_1} = \frac{15}{0,71} = 21,13A$$

$$\Delta\vartheta_z = \vartheta_z - \vartheta_0 = 70 - 50 = 20^\circ\text{C}$$

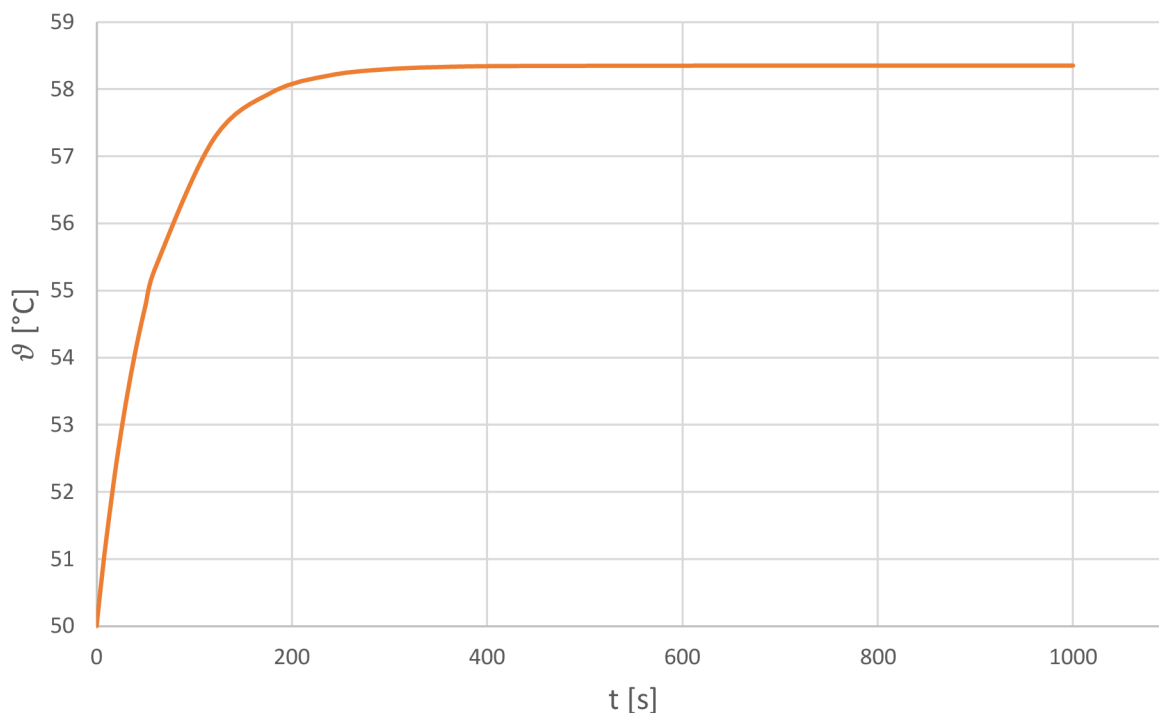
$$i = \frac{I_{ez3}}{I_z} = \frac{21,13}{30} = 0,704$$

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_z \cdot i^{2,492} = 20 \cdot 0,704^{2,492} = 8,34^\circ\text{C}$$

$$\Delta\vartheta_1 = \Delta\vartheta \cdot (1 - e^{-\tau}) = 8,64 \cdot (1 - e^{-\infty}) = 8,34^\circ\text{C}$$

$$\tau' = \frac{t_v}{\tau} = \frac{\infty}{23} = \infty$$

$$\vartheta = \vartheta_0 + \Delta\vartheta_1 = 50 + 8,34 = 58,34^\circ\text{C}$$



Obrázek 52. Průběh oteplení vodiče 1x2,5mm² při průchodu proudem 15A a teplotě okolí 50°C

Vodič pro přenos elektrické energie z baterie do výstupu 5V

Napěťová hladina 5V obsahuje dva výstupy 2,1A a 1A pro nabíjení převážně mobilních telefonů a tabletů. Pro napájení byly použity vodiče s průřezem $1,5 \text{ mm}^2$ a izolací PVC. Potom

$$I_{ez4} = \frac{I_{ez4}}{k_1} = \frac{3,1}{0,71} = 4,4A$$

$$\Delta\vartheta_z = \vartheta_z - \vartheta_0 = 70 - 50 = 20^\circ\text{C}$$

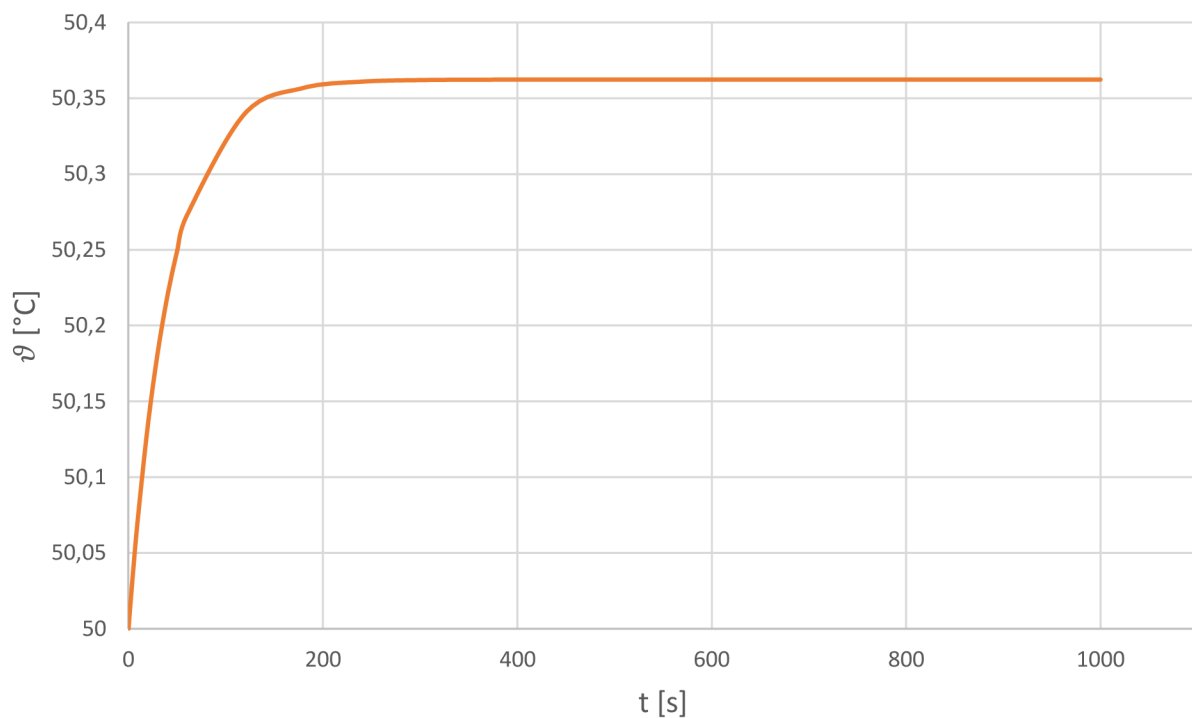
$$i = \frac{I_{ez4}}{I_z} = \frac{4,4}{22} = 0,2$$

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_z \cdot i^{2,492} = 20 \cdot 0,2^{2,492} = 0,4^\circ\text{C}$$

$$\Delta\vartheta_1 = \Delta\vartheta \cdot (1 - e^{-\tau}) = 0,4 \cdot (1 - e^{-\infty}) = 0,4^\circ\text{C}$$

$$\tau' = \frac{t_v}{\tau} = \frac{\infty}{17} = \infty$$

$$\vartheta = \vartheta_0 + \Delta\vartheta_1 = 50 + 0,4 = 50,4^\circ\text{C}$$



Obrázek 53. Průběh oteplení vodiče $1 \times 1,5 \text{ mm}^2$ při průchodu proudem 3,1A a teplotě okolí 50°C

4.2.7 Ochrany

Součástí každého elektrického systému musí být přítomen nějaký druh ochrany, která odpojí obvod od zdroje ve stavu poruchy.

Nejpoužívanějšími elektrickými ochranami jsou jističe, které vykonávají činnost hlavní ochrany a dále pojistky, které slouží jako ochrana záložní.

Jističe

Jističe jsou mechanické spínací přístroje schopné zapínat, vést a vypínat proudy za normálních podmínek obvodu, ale i zapínat, po stanovenou dobu vést a samočinně vypínat poruchové proudy včetně zkratových do mezí svých spínacích schopností. Výhoda oproti pojistkám je opakovatelnost použití po zapůsobení spouště.



Obrázek 54. Jednopolový a třípólkový jistič značky Noark

Pro chránění elektrárny byly vybrány jednopolový a třípólkový jistič značky Noark, které dokáží chránit stejnosměrné obvody do 48V.

Parametry jističů:

Počet pólů: 1 (jednopolový), 3 (třípólkový)

Jmenovitý proud: 40A

Vypínací charakteristika: B

Zkratová vypínací schopnost: 6 kA

Jmenovité pracovní napětí: 230/400V AC, 48V DC (na pól)

Jmenovitá frekvence: 50/60 Hz

Krytí: IP20

Průřez přípojovacího vodiče: 1-35 mm²

Okolní teplota: -30 ... +70°C

Třípólový jistič bude sloužit k ochraně tří kladných elektrických okruhů elektrárny, a to větvi fotovoltaické panely-regulátor, regulátor-baterie, baterie-zátěže. Tento jistič bude současně sloužit i jako total stop, kdy budou od akumulčních článků odepnuty veškeré přístroje, tudíž nebude docházet k samovolnému vybíjení baterie ztrátami v přístrojích ve standby módu a na výstupu 230V se nebude vyskytovat potenciálně nebezpečné napětí.

Jednopolový jistič bude sloužit k připojování/odpojování panelů, kdy dochází absenci spínacího prvku k jiskření vlivem přibližování/oddalování kontaktů, a tedy jejich postupné degradaci.

Pojistky

Elektrické přístroje chrání elektrický obvod před poškozením nadměrným elektrickým proudem. Princip pojistky spočívá v tom, že tvoří nejslabší část obvodu. Vlivem vyššího odporu vznikají v pojistce tepelné ztráty, které po překročení výrobcem stanovené hodnoty odpaří kov, který se vzdaluje a přestává tvořit vodivou dráhu.

Nevýhodou pojistek je jejich nenávratné poškození, tudíž k opětovnému zapnutí obvodu je nutné vyměnit pojistku.



Obrázek 55. Automobilová šroubovací pojistka MIDIVAL 50A s pouzdrem

Jak udává norma, jištěny musí být všechny pracovní vodiče, které nejsou spojeny s ochranným vodičem. Ve stejnosměrných obvodech tedy musí být jištěn kladný i záporný pól. Jak již bylo zmíněno výše, třípólový jistič Noark byl vybrán pro jištění kladných okruhů, záporné póly stejných větví tedy budou jištěny pojistkami.

Pro zajištění selektivity, tedy dřívějšího zapůsobení jističe, docílíme správným dimenzováním pojistek, a to na proud o 25% vyšší, než je jmenovitý proud jističů.

Jmenovitý proud pojistek tedy bude

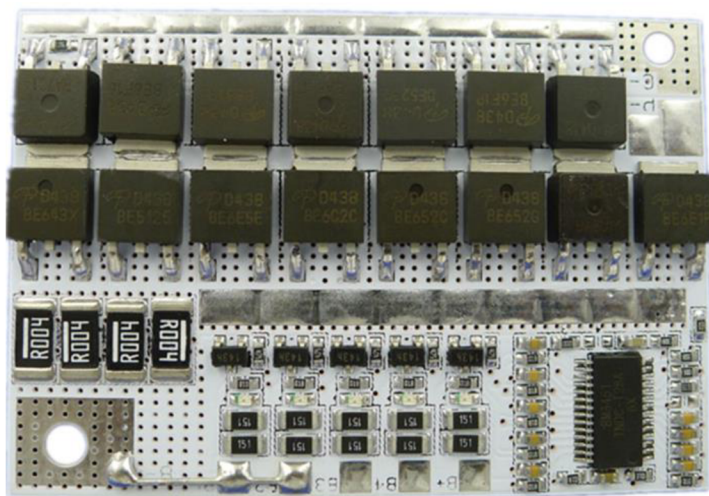
$$I_{poj} = 1,25 \cdot I_{jis} = 1,25 \cdot 40 = 50A$$

Battery Management System

Battery Management System, neboli BMS, je jakýkoliv elektronický systém, který řídí akumulční baterii, například tím, že chrání baterii před provozem mimo její bezpečné provozní oblasti.

BMS může monitorovat a kontrolovat:

- Celkové napětí baterie
- Napětí jednotlivých článků (maximální a minimální napětí)
- Teploty jednotlivých článků
- Stav nabití (SOC) nebo hloubku vybití (DOD), které indikují úroveň nabití baterie
- Nabíjecí a vybíjecí proud



Obrázek 56. Battery Management System (BMS) pro LiFePo4

V této elektrárně je využito BMS na Obr. 55. Je to BMS určené k ochraně čtyř LiFePo4 akumulčních článků zapojených v sérii. Jeho úkolem je hlídat napětí jednotlivých článků při nabíjení a vybíjení, aby nepřekročily své hraniční hodnoty, kdy by začalo docházet k jejich rychlé degradaci. V případě překročení stanovené hranice napětí, při nabíjení/vybíjení, BMS odpojí baterie od daného obvodu.

Součástí je i ochrana proti nadproudům, kdy BMS vybaví při překročení proudu 60A v jakémkoliv obvodu, ať už nabíjení nebo vybíjení. Slouží tedy i jako druhá záložní ochrana.

Parametry BMS:

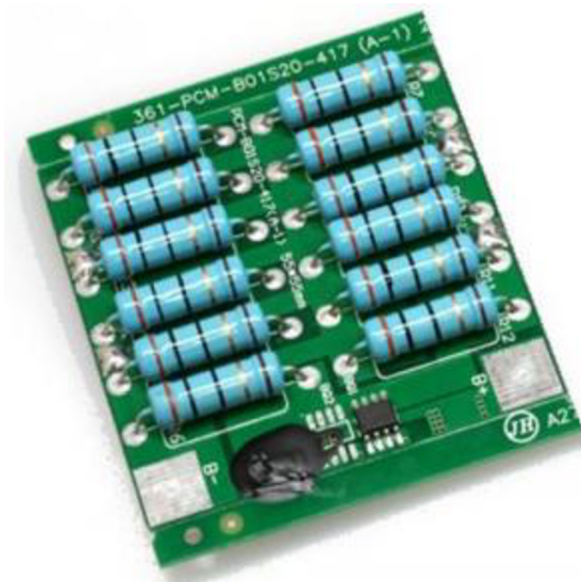
- Ochrana proti přebíjení článku: 3,65V
- Ochrana proti hlubokému vybití článku: 2,5V
- Tepelná ochrana: 60°C
- Jmenovitý nabíjecí a vybíjecí proud: 60A
- Vyrovnávání napětí článků: 50mA
- Ochrana proti zkratu: 100-600μs

4.2.8 Balancování napětí

Je obvyklé, že články baterie nejsou parametricky totožné, ať už v tom hraje roli rozdílný výrobce, rozdílné stáří, jiné předešlé využití, či podmínky. Důsledkem toho nastávají výkyvy napětí jednotlivých článků během provozu.

Rozdílná napětí článků jsou nežádoucí, proto je nutné řešit jejich balancování. Jistou balancovací schopnost mají i BMS moduly, ale jejich balancovací proud je ve většině případů nedostatečný, proto se užívá tzv. balancovacích modulů, což jsou, jednoduše řečeno, řízené odporové zátěže připojené na svorky každého článku a jsou spínány při dosažení maximálního nabíjecího napětí daného článku, kdy dojde k vybití energie do sepnutých odporů.

Jejich použitím se tedy zamezí nekonečnému odepínání BMS, který odepíná vždy, kdy byt' jediný článek překročí maximální hranici napětí a tím přeruší nabíjení celé baterie.



Obrázek 57. Balancovací modul pro LiFePo4

Parametry balancovacího modulu:

- Balanční napětí hraniční: 3.60 V
- Balanční napětí uvolňovací: 3.50 V
- Maximální napětí: <5 V
- Balanční proud: 0 ~ 1.7 A V
- lastní spotřeba: < 20 μ A
- Pracovní teplota: -40 až +125 st. C

4.3 Realizace mobilní fotovoltaické elektrárny

4.3.1 Propojovací box

Prvním krokem bylo vytvoření boxu, který propojí fotovoltaické panely paralelně. Byl zvolen způsob propojení mimo elektrárnu, tedy pomocí krabičky, protože to usnadní manipulaci jak v případě propojování s elektrárnou, tak i v případě změny regulátoru a zapojení panelů sériově.



Obrázek 58. Propojovací box pro panely

Pro vyvedení výkonu z panelů bylo využito, jak bylo zmíněno v kapitole 4.2.6, kabelu $2 \times 2,5 \text{ mm}^2$ s izolací z kaučuku. Pro připojení panelů sloužily standardizované MC4 konektory, kde pro připojení kladného pólu bylo využito samice a záporného pólu samce. Obvod uvnitř boxu byl proveden podle schématu na Obrázek 41. Schematicky znázorněné paralelní spojení všech FV panelů



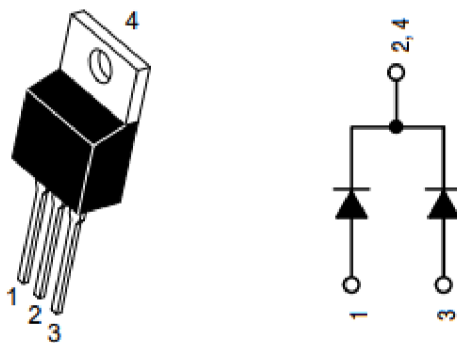
Obrázek 59. Propojovací box pro panely

Propojovacím uzlem každého pólu byla měděná přípojnice o průřezu $4,5 \text{ mm}^2$ a proudové zatížitelnosti 60A podložena 1 cm vysokou umělohmotnou podložkou. Mezi podložkou a přípojnicí jsou dva čtvercové měděné pásky pro lepší odvod tepla.

Přípojnice s označením 1 slouží pro propojení záporného pólu. Vodiče kladného pólu jsou vedeny přes blokovací Schottkyho diody na přípojnici s označením 2.

Schottkyho diody se využívají pro blokování proudů ve stavu, kdy se fotovoltaický panel chová, jako spotřebič. Tato situace může nastat zastíněním panelu v paralelním uspořádání, kdy klesne jeho napětí a ostatní panely se snaží jeho pokles vykompenzovat vyrovnávacími proudy, čímž by mohlo dojít k jeho destrukci.

Byly vybrány Schottkyho diody MBR1545CTG se jmenovitým proudem 7,5A. Ztráty na každé diodě činí 3W při zatížení 6A.



Obrázek 60. Schottkyho diody MBR1545CTG

Pro vyvedení výkonu všech panelů bylo využito vodičů $1 \times 10 \text{ mm}^2$ s PVC izolací, na jejichž konci slouží k propojení, s elektrárnou, konektor Anderson o jmenovitém proudu 50A.



Obrázek 61. Anderson konektor pro připojení k elektrárně

4.3.2 Druhá část elektrárny

Druhým krokem bylo vytvoření druhého patra elektrárny, kde se nachází střídač s regulátorem.



Obrázek 62. Usazení regulátoru a střídače

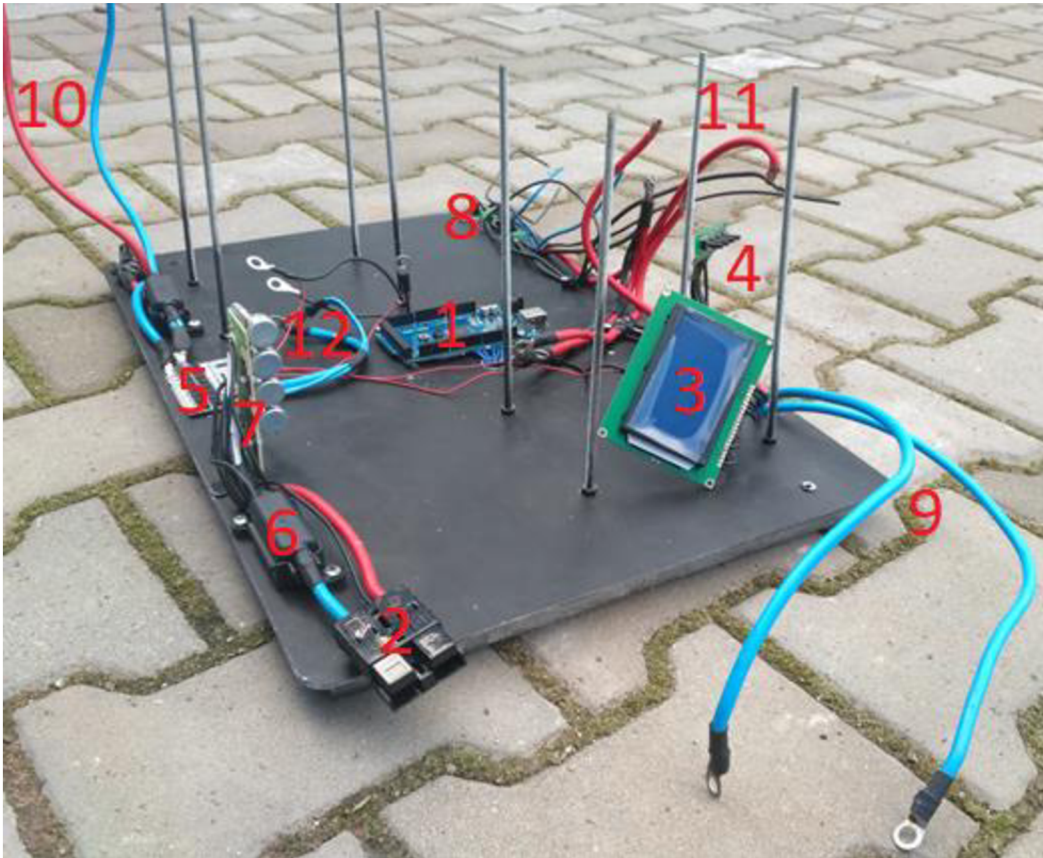
Bylo potřeba zvolit materiál, který bude převážně lehký a lehce dostupný. Patro bylo tedy vytvořeno z plechu o plošných rozměrech úložného boxu elektrárny a nastříkáno černým lakem, díky čemuž se povrch plechu stal nevodivý.

Přístroje byly uchyceny pomocí plechových pásek přinýtovanými k základně. U obou přístrojů jsou dostupné otvory pro vedení vodičů.

Mezi přístroji se na obou stranách nachází větrací otvory o průměru 5 cm.

4.3.3 První část elektrárny

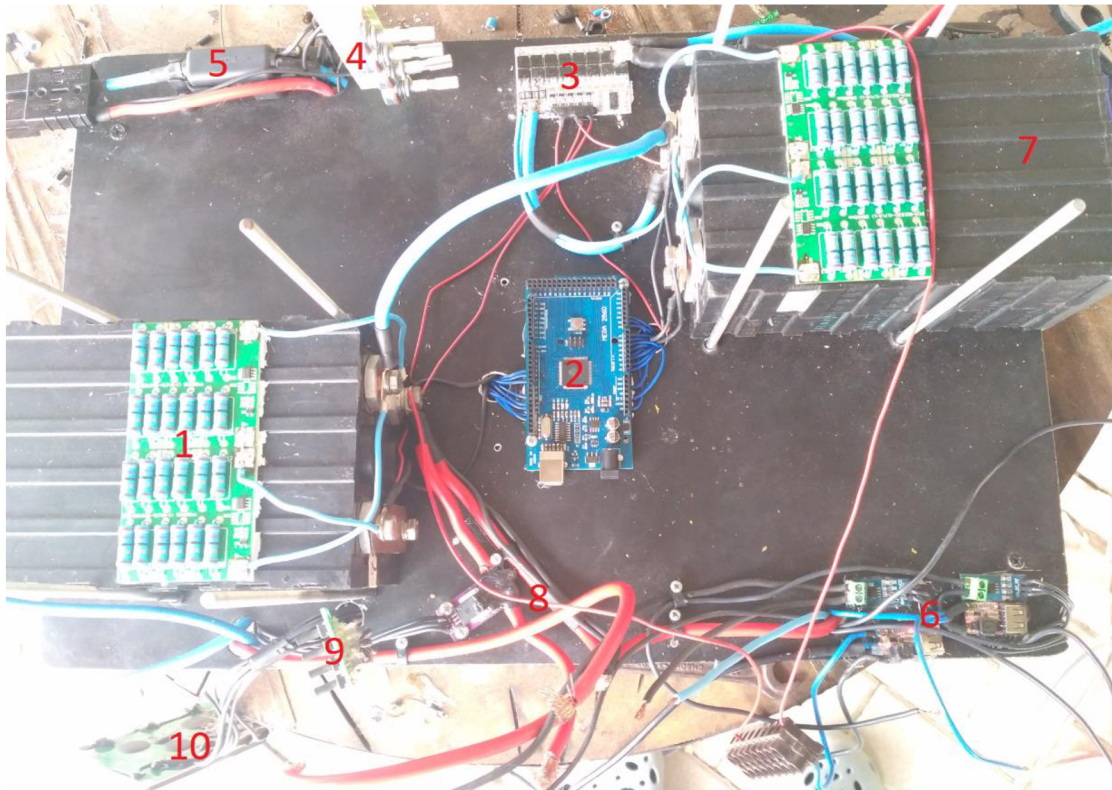
První patro elektrárny bylo nejkomplicovanější částí, protože se zde nachází všechny systémy, jako napájení, chránění, měření a ovládání. Základna byla opět vyrobena z plechu. Podstavu základny tvoří tři plíšky o výšce 3 cm, aby bylo možné tahat kabeláž pod základnou.



Obrázek 63. Přizemní patro elektrárny

1 – Arduino Mega, 2 – napájení z panelů, 3 – displej, 4 – tlačítka, 5 – BMS, 6 – pojistka, 7 – děliče napětí, 8 – měniče napětí 12/5V a Hallovy sondy, 9 – vodiče záporného pólu regulátoru, 10-vodiče pro napájení střídače, 11 – vodiče kladného pólu nabíjení/vybíjení, 12 – vodiče záporného pólu nabíjení/vybíjení

Baterie, jak již bylo zmíněno, bude rozdělena po dvou člancích, které budou rozděleny do protilehlých rohů pro zachování stability. Články budou ukotveny mezi čtyřmi závitnicemi a staženy dvěma kovovými pásy.



Obrázek 64. Přízemní patro elektrárny

1 – balancovací moduly, 2 – arduino mega, 3 – BMS, 4 – děliče napětí, 5 – pojistka, 6 – měniče 12/5V a Hallovy sondy, 7 – LiFePo4 články, 8 – vodiče kladného pólu nabíjení/vybíjení, 9 – tlačítka, 10 – displej

Všechny přístroje ukotvené přímo ke kovové základně byly zespony zality roztaveným polymerovým materiálem, který slouží jako dodatečný izolant.



Obrázek 65. Elektrárna během testování své funkčnosti před finálním usazením do přepravního boxu



Obrázek 66. Finální usazení elektrárny 1



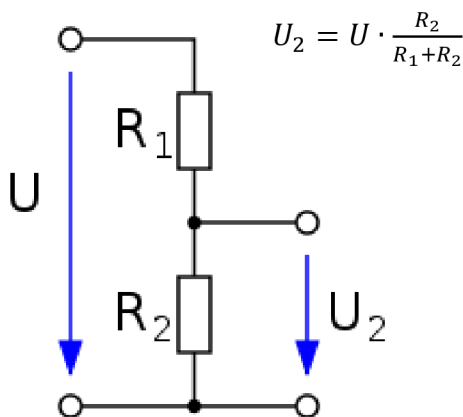
Obrázek 67. Finální usazení elektrárny 2



Obrázek 68. Finální usazení elektrárny 3

4.3.4 Měření a monitoring - Arduino

Měření a monitoring byly provedeny prostřednictvím Arduino Mega. V první řadě bylo nutné, pro měření napětí článků baterie, snížit měřené napětí pomocí děličů napětí tak, aby na výstupní straně bylo napětí menší, jako 5V, jinak by hrozilo poškození vstupu arduina. To se uskuteční vytvořením obvodu, viz Obr. 66., skládajícího se ze dvou rezistorů, mezi něž se rozdělí vstupní napětí v poměru jejich odporů.



Obrázek 69. Princip děliče napětí

Výsledné napětí U_2 je poté připojeno na požadovaný analogový vstup arduina. Tímto způsobem se postupovalo v případech, kdy se měří napětí vyšší, jako 5V, tzn. měření napětí článků 2,3,4 a napětí fotovoltaických panelů.

Dalším prostředkem pro měření jsou Hallovy sondy, které pro svou funkci požadují externí napájení 5V, které je uskutečněno pomocí arduina. Výstupem těchto sond je Hallovo napětí, vytvořené procházejícím proudem, které je vyvedeno opět do analogového vstupu arduina.

Podobnými kroky se postupovalo i u ostatních měřících obvodů.

Následně bylo zapotřebí zapojit a naprogramovat v arduinu grafické LCD a tlačítka tak, aby každé tlačítko odkazovalo na danou obrazovku. Arduino kód nebude součástí tohoto dokumentu z důvodu jeho rozsáhlosti. Bude tedy poskytnut, jako příloha.

Tlačítka odkazovala

1. Tlačítko – Overview (Přehled)
2. Tlačítko – Charge Controller (Regulátor nabíjení)
3. Tlačítko – Battery (Baterie)
4. Tlačítko – Loads (Zátěže)

Vysvětlivky

Production – Výroba

Consumption – Spotřeba

Produced – Vyrobeno

Consumed – Spotřebováno

Temp in – Teplota u baterie

Voltage in – Vstupní napětí

Voltage out – Výstupní napětí

Current in – Vstupní proud

Current out – Výstupní proud

Power in – Vstupní výkon

Power out – Výstupní výkon

Cellx – Napětí článku x

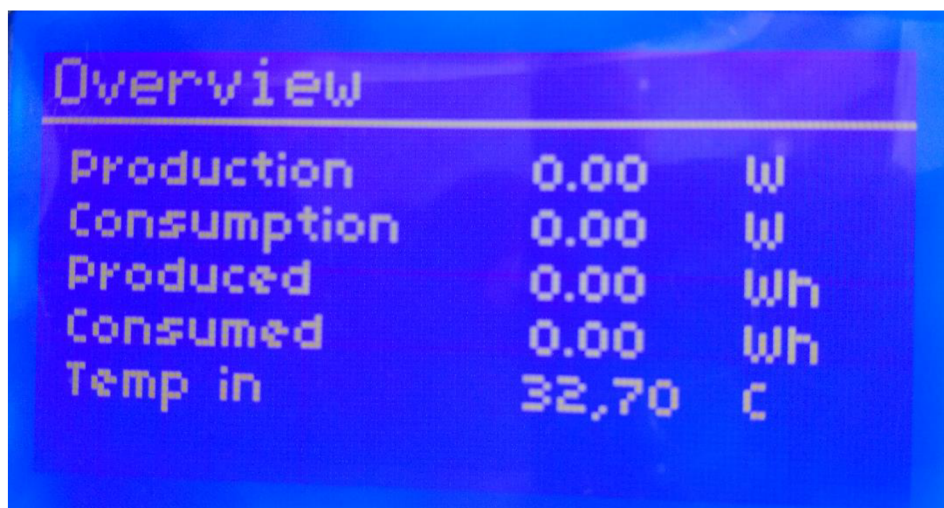
Overall – Celkové napětí baterie

230V, load – Výkon zátěže na výstupu 230V

12V, load – Výkon zátěže na výstupu 12V

5V, load – Výkon zátěže na výstupu 5V

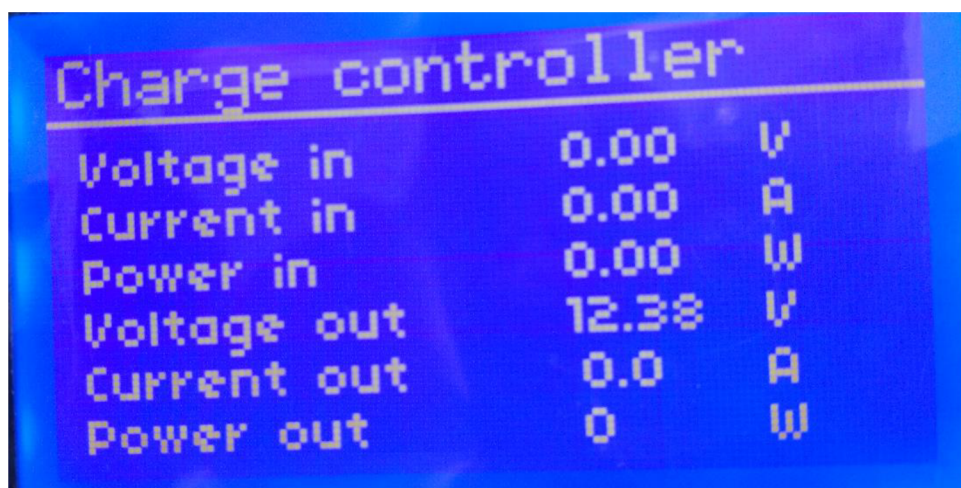
xV current – Proud tekoucí 12V větví do xV zátěže



The screenshot shows a blue LCD display with the title 'Overview' at the top. Below the title is a table with five rows of data. The first three rows show production and consumption values of 0.00, and the last two rows show produced and consumed energy values of 0.00, along with an input temperature of 32.70 C.

Overview		
Production	0.00	W
Consumption	0.00	W
Produced	0.00	Wh
Consumed	0.00	Wh
Temp in	32,70	C

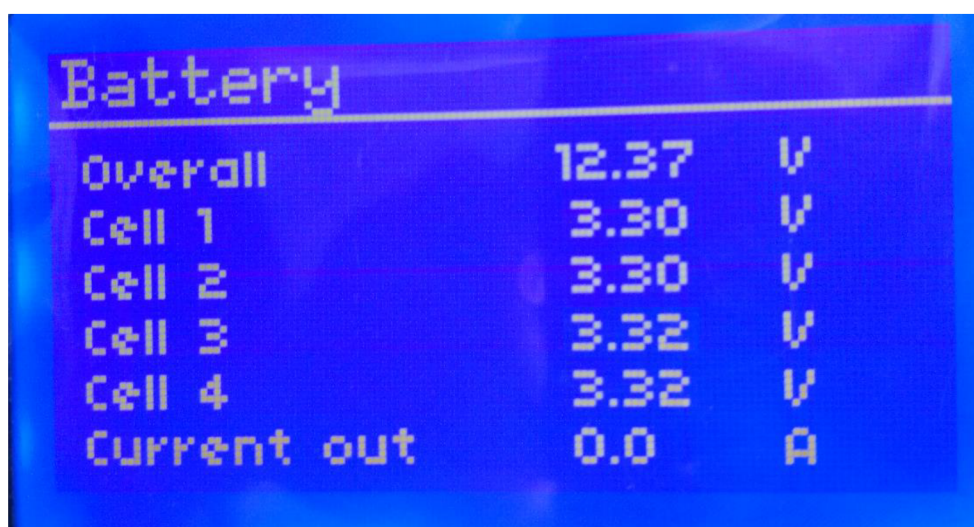
Obrázek 70. Vzhled první obrazovky, která se objeví při stisknutí tlačítka 1



The screenshot shows a blue LCD display with the title 'Charge controller' at the top. Below the title is a table with six rows of data. The first three rows show input values (Voltage, Current, Power) all at 0.00, and the last three rows show output values (Voltage, Current, Power) at 12.38 V, 0.0 A, and 0 W respectively.

Charge controller		
Voltage in	0.00	V
Current in	0.00	A
Power in	0.00	W
Voltage out	12.38	V
Current out	0.0	A
Power out	0	W

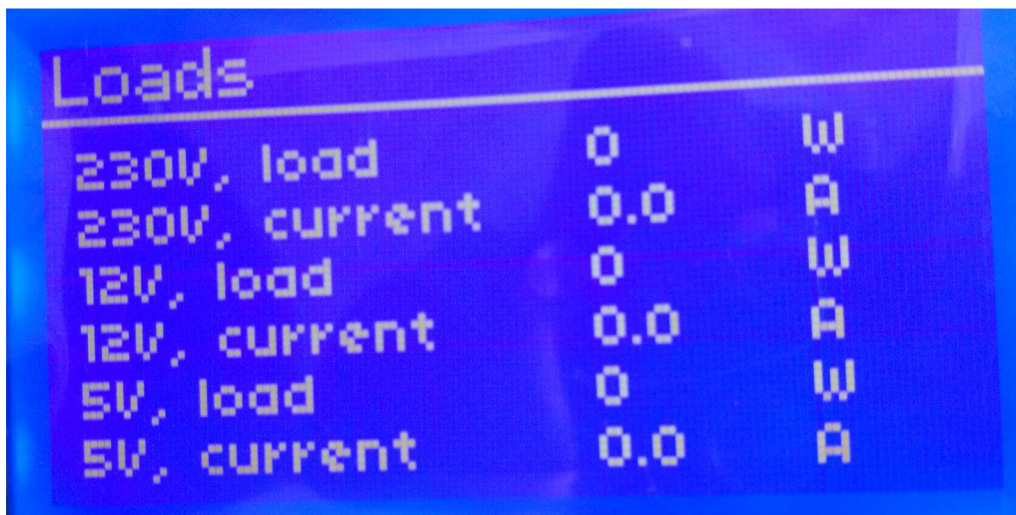
Obrázek 71. Vzhled druhé obrazovky, která se objeví při stisknutí tlačítka 2



The screenshot shows a blue LCD display with the title 'Battery' at the top. Below the title is a table with six rows of data. The first row shows an overall voltage of 12.37 V, followed by individual cell voltages for Cell 1 (3.30 V), Cell 2 (3.30 V), Cell 3 (3.32 V), and Cell 4 (3.32 V). The final row shows a current out of 0.0 A.

Battery		
Overall	12.37	V
Cell 1	3.30	V
Cell 2	3.30	V
Cell 3	3.32	V
Cell 4	3.32	V
Current out	0.0	A

Obrázek 72. Vzhled třetí obrazovky, která se objeví při stisknutí tlačítka 3



The image shows an LCD display with a blue background and white text. The title 'Loads' is at the top left. Below it, there are six rows of data, each with a label, a numerical value, and a unit. The labels are '230V, load', '230V, current', '12V, load', '12V, current', '5V, load', and '5V, current'. The numerical values are '0', '0.0', '0', '0.0', '0', and '0.0' respectively. The units are 'W', 'A', 'W', 'A', 'W', and 'A' respectively.

Loads		
230V, load	0	W
230V, current	0.0	A
12V, load	0	W
12V, current	0.0	A
5V, load	0	W
5V, current	0.0	A

Obrázek 73. . Vzhled čtvrté obrazovky, která se objeví při stisknutí tlačítka 4

4.4 Rozpočet

Rozpis cen za jednotlivé součásti projektu jsou uvedené v tabulce uvedené níže. Cena za mobilní fotovoltaickou elektrárnu o nabíjecím výkonu 500W, výstupním výkonu cca 600W a maximální možné potenciální kapacitě 2kWh, což činí poměr 33Wh kapacity a 10W výkonu na jeden litr objemu (přenosný box o kapacitě 60l), je 26 792 Kč.

Tabulka 6. Rozpočet projektu

Položka	Kusů (-)	Cena/kus (Kč/kus)	Cena celkem (Kč)
Fotovoltaické panely	5	3000	15000
Střídač	1	700	700
Baterie	4	1500	6000
BMS	1	70	70
12V,5V výstup IP54	1	120	120
Arduino Mega 2560	1	209	209
Tlačítka	1	25	25
LCD Displej	1	100	100
50A Hallův senzor	2	120	240
20A Hallův senzor	1	30	30
5A Hallův senzor	1	30	30
Regulátor nabíjení	1	680	680
MC4 konektory samec-samice	5	24	120
230V zásuvka, IP54	1	65	65
Potenciometry 25k	5	20	100
DN lišta 1m	1	60	60
Kabel guma 2x2,5 - 1m	5	21	105
Vodič 1x10mm Rudá - 1m	5	24	120
Vodič 1x10mm Modrá - 1m	5	24	120
Jistič Noark 3P 40A	1	248	248
Jistič Noark 1P 40A	1	84	84
Kabelové oko 10mm	20	5,3	106
Anderson konektor	2	26	52
Gumový kryt na konektor	2	16	32
Průchodky	5	13	65
Krabička 165x85x70mm	1	85	85
Spojovací materiál	1	150	150
Úložný box	1	484	484
Schottkyho diody 7,5A	5	95	475
Smršťovací izolace 1m	3	50	150
Termistor NTC 10k	1	20	20
Vypínač 6A, 230V	1	32	32
Kabel USB A-B	1	26	26
Pojistka 50A s pouzdrém	3	123	369
LiFePo4 balancery	4	130	520
Celkem		26792	

5 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo pohlédnout a shrnout informace týkající se současného stavu elektroenergetiky, vývoje trhu s fotovoltaikou ve světě, dostupnost a rozšíření mobilních fotovoltaických elektráren ve světě. Následně byla shrnuta teorie týkající se slunečního záření a následoval popis komponent potřebných k sestavení fotovoltaické elektrárny. Praktická část této diplomové práce začala návrhem, postupovala přes dimenzování ke konečné realizaci funkčního vzorku mobilní fotovoltaické elektrárny.

Při počátečním návrhu bylo potřeba brát důraz na co nejmenší a nejkompaktnější rozměry, především hmotnost a skladovatelnost. Hmotnost systému se pohybuje okolo 19kg, kde 9kg tvoří fotovoltaické panely.

Tato elektrárna byla navržena tak, aby byla lehce přenosná a schopna napájet méně náročné přístroje na místech, kde není dostupná elektrická síť např. při kempování, na koncertech, grilování a všeobecně všech „outdoorových“ akcích.

Elektrárna disponuje nabíjecím výkonem 500W, výstupním výkonem cca 600W a kapacitě 500Wh (možnost rozšíření až na 2kWh LiFePo4), což činí poměr 8Wh (33Wh) kapacity a 10W výkonu na jeden litr objemu (přenosný box o kapacitě 60l).

Díky flexibilitě fotovoltaických panelů lze tuto „power banku“ nabíjet na mnoha nerovných površích např. na střeše auta, lodi atd.

Jedním z cílů práce bylo provést měření vyrobeného vzorku. Jelikož poslední týden před odevzdáním práce vládlo nepříznivé počasí, kdy přšelo a bylo zataženo, tak i přes veškerou snahu byl nabíjecí výkon téměř nulový, tudíž se nepodařilo provést měření nabíjení. Měření vybíjení jsem taktéž nesplnil, protože baterie byla vybita na 2,9V předešlým testováním a nebyla možnost ji nabít. Tyto nedostatky samozřejmě doplním do dne obhajoby.

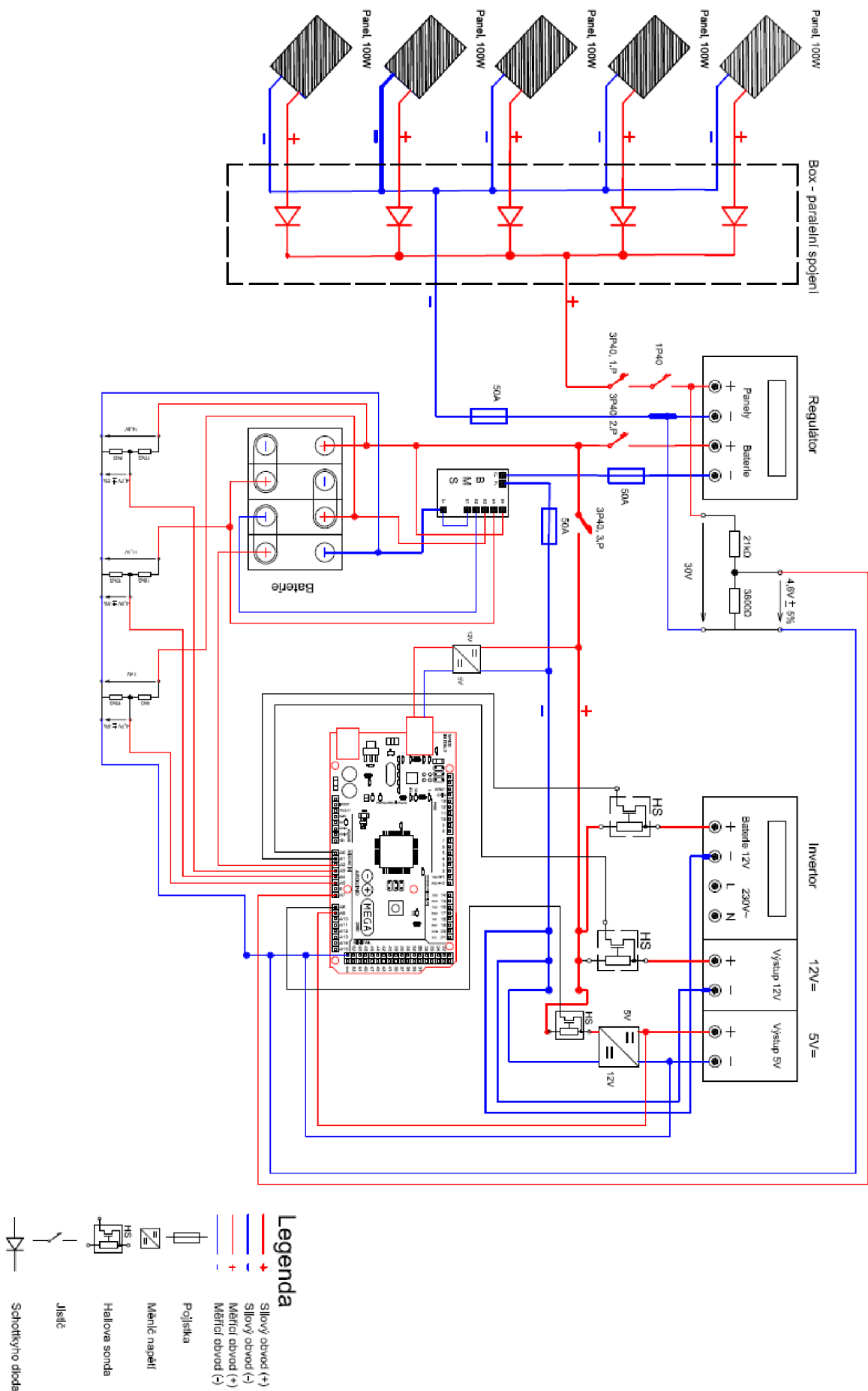
Součástí přílohy je elektrické schéma fotovoltaické elektrárny v programu AutoCad a ve formátu PDF, a také použitý kód při programování arduina s formátem Arduino file (.ino).

6 POUŽITÁ LITERATURA

- [1]. MICHÁLEK, Bc., Pavel. Měnič pro umělou síť 230V napájený z fotovoltaických panelů [online]. Brno, 2016 [cit. 2018-01-08]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=126317
- [2]. MDAREBNÝ, Bc., Tomáš. Návrh fotovoltaického systému rodinného domu [online]. České Budějovice, 2017 [cit. 2018-01-08]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=148832
- [3]. KRČKA, Bc., Pavel. Fotovoltaické dobíjecí regulátory v ostrovních systémech [online]. Brno, 2013 [cit. 2018-01-08]. Dostupné z: https://theses.cz/id/ayzrut/DP_Krcka_final.pdf
- [4]. CZC: Energetika ve světě. CZC: Energetika ve světě [online]. Praha, 2015 [cit. 2018-01-08]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/cisla-a-statistiky/energetika-ve-svete.html>
- [5]. Wikipedia: Growth of photovoltaics. Wikipedia: Growth of photovoltaics [online]. Europe, 2017 [cit. 2018-01-08]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Growth_of_photovoltaics#cite_note-gtmforecast-7
- [6]. SOLAR BASICS: Cost of solar panels over time. [online]. USA, 2015 [cit. 2018-01-08]. Dostupné z: <https://understandsolar.com/cost-of-solar/>
- [7]. NOVÁČEK, Bc., Richard. Malé a mikro fotovoltaické systémy [online]. Brno, 2016 [cit. 2018-01-08]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=127498
- [8]. KADĚRA, Jan. Energetická samostatnost a optimalizace spotřeby energie s využitím obnovitelných zdrojů a systémové instalace v domácnosti [online]. Brno, 2017 [cit. 2018-01-08]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=151559
- [9]. RAN, Fu. U.S. Solar Photovoltaic systém cost benchmark: Q1 2016 [online]. Brno, 2016 [cit. 2018-01-08]. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/docs/fy16osti/66532.pdf>
- [10]. FRANHOFER, ISE. Photovoltaics report [online]. Brno, 2017 [cit. 2018-01-08]. Dostupné z: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies>
- [11]. MOBIL SOLAR, Mobil solar generators [online]. Brno, 2016 [cit. 2018-01-08]. Dostupné z: <http://www.mobilesolarpower.net/products/#details>
- [12]. LUKÁŠEK, Bc., Kamil. Stav fotovoltaiky v České republice [online]. Brno, 2015 [cit. 2018-01-08]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=100617
- [13]. MASTNÝ, Doc., Ing. Pavel, Ph.D., Ing. Jan MORÁVEK. Malé zdroje elektrické energie. Brno, 2015.
- [14]. RADIL, Ing. Lukáš, Ph.D. Nekonenční přeměny, Brno, 2016.
- [15]. WITHJACK, Eric M. Collapsible Mobile Solar Energy Power Source. 1982. Uděleno 20.12.1983. Zapsáno 19.2.1982.
- [16]. EcoSphere Technologies Inc. [online]. Stuart, Florida, 2018 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://www.ecospheretechnology.com/environmental-engineering-technologies/powercube>
- [17]. GoalZero [online]. South Bluffdale, 2018 [cit. 2018-01-04]. Dostupné z: <http://www.goalzero.com/>
- [18]. Manualslib [online]. International, 2018 [cit. 2018-05-04]. Dostupné z: <https://www.manualslib.com/manual/1219191/Tronic-Tsw-300-A1.html#manual>

- [19]. Alibaba [online]. International, 2017 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: https://www.alibaba.com/product-detail/Portable-1kw-solar-energy-systemsolar_60392688762.html?s=p

PŘÍLOHY



Obrázek 74. Schéma zapojení mobilní fotovoltaické elektrárny