

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra elektrotechniky a automatizace



Bakalářská práce

Fotovoltaické panely a jejich vlastnosti

Petr Vyšín

© 2024 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Autor práce:	Petr Vyšín
Studijní program:	Informační a řídicí technika v agropotravinářském komplexu
Vedoucí práce:	Ing. Viktor Novák
Garantující pracoviště:	Katedra elektrotechniky a automatizace
Jazyk práce:	Čeština
Název práce:	Fotovoltaické panely a jejich vlastnosti
Název anglicky:	Properties of photovoltaic systems
Cíle práce:	Cílem bakalářské práce je zhodnotit provozní vlastnosti fotovoltaických panelů z hlediska účinnosti, životnosti, spolehlivosti a ekonomiky provozu z pohledu teoretického jakož i na provozovaném fotovoltaickém systému.
Metodika:	Vypracujte literární rešerši zahrnující možnosti využití solární energie a vypracujte přehled technologií fotovoltaických článků. Dále teoreticky zpracujte jejich provozní vlastnosti, účinnost a konkrétní možnosti využití. Následně zvolte a popište vybraný fotovoltaický systém. Naměřte vybrané provozní parametry systému (např. špičkový výkon, účinnost a další), ty následně vyhodnoťte, vhodným způsobem prezentujte a diskutujte jejich shodu s teoretickými východisky.
Doporučený rozsah práce:	30-40
Klíčová slova:	solární energie, elektrická energie, fotovoltaika, FV panel, FV článek
Doporučené zdroje informací:	<ol style="list-style-type: none">1. Benda, V. a kol. 2012. Obnovitelné zdroje energie. Profi Press, Praha. ISBN 978-80-86726-48-92. Cenka, M. a kol. 2001. Obnovitelné zdroje energie. FCC Public, Praha. ISBN 80-901985-8-93. Haselhuhn, R. a Maule, P. 2017. Fotovoltaické systémy. Česká fotovoltaická asociace, z.s., Plzeň. ISBN 978-80-906281-5-14. Letcher, T. M. a Fthenakis, V. M. 2018. A comprehensive guide to solar energy systems. Academic Press, Londýn. ISBN 978-0-12-811479-75. Murtinger, K., Beranovský, J. a Tomeš, M. 2008. Fotovoltaika – elektřina ze slunce. Era, Brno. ISBN 978-80-7366-133-5
Předběžný termín obhajoby:	2023/2024 LS - TF

Elektronicky schváleno: 21. 2. 2023
doc. Ing. Monika Hromasová, Ph.D.
Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno: 8. 3. 2023
doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.
Děkan

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Fotovoltaické panely a jejich vlastnosti" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 28. března 2024

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Viktorovi Novákovi, Ph.D. za vstřícnost, obětovaný čas a cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval své rodině, zejména mé přítelkyni za neutuchající podporu při celém studiu.

Fotovoltaické panely a jejich vlastnosti

Abstrakt

Tato práce se zaměřuje na fotovoltaické panely, jejich vlastnosti a fotovoltaické systémy. Hlavním cílem této práce je analýza dat z fotovoltaického systému, který je umístěn na Technické fakultě České zemědělské univerzity. Celá práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části se nejdříve v jednotlivých kapitolách popisují základní principy fotovoltaických článků, druhy fotovoltaických článků a elektrické vlastnosti fotovoltaických článků. V další části je přiblížena konstrukce fotovoltaických panelů, možnosti spojování fotovoltaických panelů a další komponenty tvořící fotovoltaický systém. Praktická část se zabývá samotnou analýzou získaných dat. Data o vyrobené energii jsou porovnány s programem, jež dokáže na základě umístění a úhlu natočení odhadnout vyrobenou energii. Výsledky jsou v závěru krátce diskutovány.

Klíčová slova: solární energie; elektrická energie; fotovoltaika; FV panel; FV článek

Properties of Photovoltaic Systems

Summary

This work focuses on photovoltaic panels, their properties, and photovoltaic systems. The main objective of this work is to analyse data from a photovoltaic system located at the Technical Faculty of the Czech University of Life Sciences Prague. The whole work is divided into theoretical and practical parts. In the theoretical part, the basic principles of photovoltaic cells, types of photovoltaic cells and electrical properties of photovoltaic cells are first described in individual chapters. The next part focuses on the construction of photovoltaic panels, the possibilities of connecting photovoltaic panels and other components that make up a photovoltaic system. The practical part deals with the actual analysis of the obtained data. The data on the energy produced is compared with a program that can estimate the energy produced based on the location and angle of rotation. The results are briefly discussed at the end.

Keywords: solar energy; electric energy; photovoltaics; photovoltaic panel; photovoltaic cell

Obsah

1 Úvod.....	1
2 Cíl práce a metodika	2
2.1 Cíl práce	2
2.2 Metodika	2
3 Teoretická východiska	3
3.1 Sluneční záření	3
3.1.1 Využití sluneční energie	4
3.2 Fotovoltaický jev.....	5
3.3 Druhy fotovoltaických článků.....	7
3.3.1 První generace.....	7
3.3.2 Druhá generace	7
3.3.3 Třetí generace	7
3.3.4 Čtvrtá generace	7
3.3.5 Monokrystalické články.....	8
3.3.6 Polykrystalické články	8
3.3.7 Fotovoltaické články z amorfního křemíku	9
3.4 Elektrické vlastnosti fotovoltaických článků	9
3.4.1 Faktory ovlivňující účinnost	11
3.4.1.1 Degradace v čase	11
3.4.1.2 Vnější teplota.....	11
3.4.1.3 Nečistoty	12
3.4.1.4 PID.....	12
3.4.1.5 Orientace a úhel naklonění FV panelů	13
3.5 Fotovoltaické systémy	14
3.5.1 Fotovoltaické panely	14
3.5.1.1 Spojování fotovoltaických panelů	15
3.5.2 Akumulátorová baterie	18
3.5.3 BMS	19
3.5.4 Solární regulátor	20
3.5.4.1 PWM regulátory	20
3.5.4.2 MPPT regulátory	20
3.5.5 Střídač	21
3.5.5.1 Modulový střídač.....	21

3.5.5.2	Centrální střídač.....	21
3.5.5.3	Řetězový střídač.....	21
3.6	Ostrovní systémy (off-grid).....	22
3.7	Systémy připojené k rozvodné síti (on-grid).....	22
4	Praktická část	24
4.1	Popis instalovaného systému.....	24
4.2	Odhadnutá výroba energie.....	26
4.3	Skutečná výroba energie	28
4.4	Porovnání odhadnuté a skutečné výroby energie	29
4.5	Měsíční skutečná výroba energie	30
4.6	Denní skutečná výroba energie	31
4.7	Diskuse naměřených výsledků	33
5	Závěr.....	34
6	Seznam použitých zdrojů.....	35
7	Přílohy	38

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Zobecněný roční úhrn globálního slunečního záření [kWh/m]	4
Obrázek 2 – Popis funkce fotovoltaického článku	6
Obrázek 3 - VA charakteristika FV článku při různé intenzitě slunečního záření	10
Obrázek 4 - VA charakteristiky a výkonové křivky při různých teplotách a konstantní intenzitě záření (halogenová žárovka volená autory studie).....	12
Obrázek 5 - Výnos energie v závislosti na sklonu a orientaci panelu	13
Obrázek 6 - Konstrukce fotovoltaického panelu	15
Obrázek 7 - Příklad sériového zapojení stejných FV panelů.....	16
Obrázek 8 – Příklad sériové zapojení FV panelů s jedním panelem s nižším proudem.....	16
Obrázek 9 - Příklad paralelního zapojení FV panelů.....	17
Obrázek 10 - Příklad paralelního zapojení FV panelů s jedním panelem s nižším napětím	17
Obrázek 11 - Příklad sérioparalelního zapojení FV panelů	18
Obrázek 12 - Příklad zjednodušeného zapojení ostrovního systému	22
Obrázek 13 - Příklad zjednodušeného zapojení systému připojeného k rozvodné síti.....	23
Obrázek 14 - Instalované fotovoltaické panely	24
Obrázek 15 - Instalovaný fotovoltaický systém	25
Obrázek 16 - Odhad vyrobené energie	27
Obrázek 17 - Skutečná výroba energie	28
Obrázek 18 - Odhadnutá a skutečná výroba	29
Obrázek 19 - Umístění fotovoltaických panelů mezi budovami	30
Obrázek 20 - Výkon ze dne 18. 7. 2023	31
Obrázek 21 - Porovnání dnů s nejvyšší a nejnižší vyrobenou energií	32

Seznam použitých zkratk

FVE	fotovoltaická elektrárna
FV panel	fotovoltaický panel
FV článek	fotovoltaický článek
STC	Standard Test Condition
MPP	Maximum Power Point
PID	Potential Induced Degradation
BMS	Battery Managment System
PWM	Pulse Width Modulation
MPPT	Maximum Power Point Tracking
AM	Air Mass

Pozn.: V seznamu nejsou uvedeny symboly a zkratky všeobecně známé nebo používané jen ojediněle s vysvětlením v textu.

1 Úvod

V dnešní době se čím dál tím více klade důraz na snížení závislosti na fosilních palivech pro výrobu energie a upřednostňují se obnovitelné zdroje energie. Jedním z nejvýznamnějších obnovitelných zdrojů energie je právě fotovoltaika. Principem fotovoltaiky je přeměna slunečního záření na elektrickou energii. Jedná se o velice perspektivní a univerzální technologii, se kterou se můžeme setkat jak v průmyslu, tak v domácích aplikacích.

V teoretické části této práce jsou uvedeny teoretické základy fotovoltaických systémů. V práci je nejdříve popsán fotovoltaický jev a fotovoltaické články, které jsou základním prvkem této technologie. Dále jsou popsány vlastnosti fotovoltaických článků a jednotlivé faktory, které tyto vlastnosti ovlivňují. Poté jsou popsány jednotlivé části fotovoltaických systémů a druhy fotovoltaických systémů.

V praktické části je analyzován konkrétní fotovoltaický systém umístěný na Technické fakultě České zemědělské univerzity. Jsou zde popsány jednotlivé části systému a poté jsou analyzována data o vyrobené energii za období červenec až říjen 2023. Tato data jsou porovnána s teoretickými východisky, kolik by měl instalovaný fotovoltaický systém vyprodukovat energie za toto období.

2 Cíl práce a metodika

2.1 Cíl práce

Cílem bakalářské práce je zhodnotit provozní vlastnosti fotovoltaických panelů z hlediska účinnosti, životnosti, spolehlivosti a ekonomiky provozu z pohledu teoretického jakož i na provozovaném fotovoltaickém systému.

2.2 Metodika

Práce bude nejdříve obsahovat literární rešerši zahrnující využití solární energie a zpracovávat přehled technologií fotovoltaických článků. Také bude teoreticky zpracovávat provozní vlastnosti fotovoltaických článků a vlivy, které mohou tyto vlastnosti ovlivňovat. Na konci teoretické části budou popsány jednotlivé prvky, ze kterých se fotovoltaické systémy skládají. Následně bude popsán vybraný fotovoltaický systém. Získaná data z vybraného fotovoltaického systému budou prezentována a bude diskutována jejich shoda s teoretickými východisky.

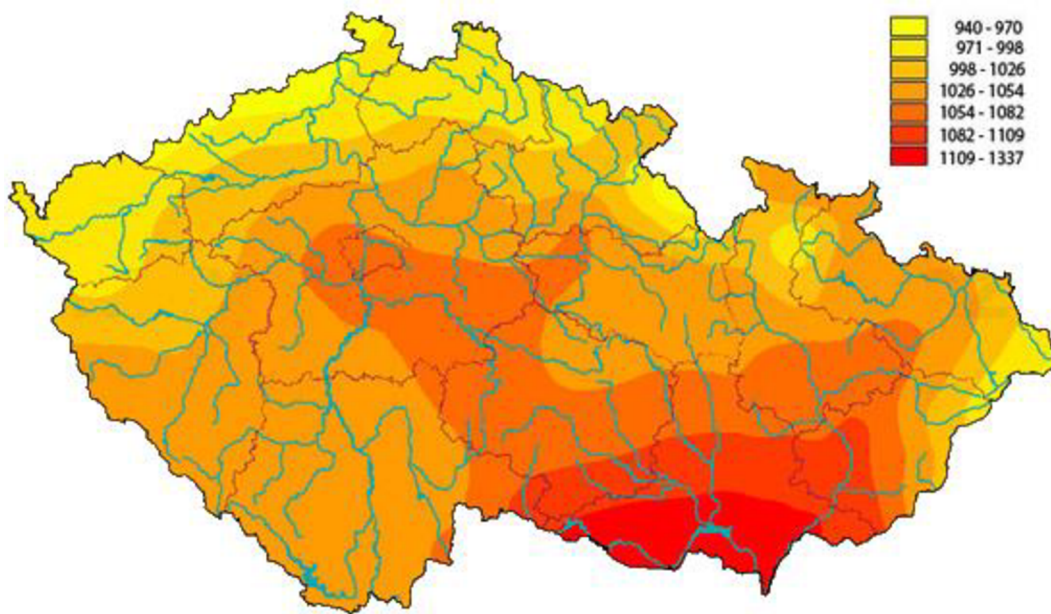
3 Teoretická východiska

3.1 Sluneční záření

Slunce září jako absolutně černé těleso s povrchovou teplotou 5 770 K. Sluneční záření zahrnuje vlnové délky od 10^{-10} m dlouhých vln rentgenového a ultrafialového záření až po několik metrů dlouhé rádiové vlny. Největší část energie, která dopadá na zem po průchodu atmosférou, odpovídá vlnovým délkám od 0,3 až 3 μm . Záření těchto vlnových délek odpovídá světelnému a infračervenému záření. [1]

Intenzita slunečního záření na povrchu Země je definovaná jako množství sluneční energie v W dopadající na m^2 . Intenzita je závislá na zeměpisné šířce a na oblačnosti v dané oblasti. Intenzitu slunečního záření rozdělujeme na intenzitu přímého slunečního záření a intenzitu difuzního slunečního záření. Přímé sluneční záření je chápáno jako to, které při průchodu atmosférou není odraženo, pohlceno a znovu vyzářeno a přímo dopadá na povrch Země ze směru od Slunce. Difuzní záření se naopak odrazilo od částic prachu, ledu či kapek vody a změnil se i jeho směr. Při změně směru se vlnová délka nemění a zůstává stejná jako před odrazem. Podíl přímého a difuzního slunečního záření závisí na oblačnosti a čistotě atmosféry. Střední roční hodnota zářivého toku sluneční energie, dopadající na jednotku plochy kolmou ve směru šíření záření se nazývá sluneční konstanta a její hodnota je 1367 W/m^2 . [1],[2]

V letních dnech při jasné obloze se denní hodnoty celkového slunečního ozáření pohybují od 800 do 1000 W/m^2 . Takto vysoké hodnoty jsou zapříčiněny malou oblačností, a tudíž nízkým podílem difuzního záření. Se zvyšující oblačností hodnota celkového slunečního záření může klesnout až na 100 W/m^2 . Oblačnost je velmi proměnlivý faktor, tudíž se pro ohodnocení dopadající sluneční energie na určitém území používá průměrná hodnota za delší časové období – měsíční či roční úhrn globálního záření [Wh/m^2] viz obrázek 1. [1]



Obrázek 1 - Zobecněný roční úhrn globálního slunečního záření [kWh/m] [3]

Z obrázku 1 je patrné, že nejvíce slunečního záření na m^2 dopadá na jih České republiky, zejména na jižní Moravu. Oproti tomu v horských oblastech, převážně na severu České republiky, dopadá nejméně slunečního záření na m^2 . Jeden z faktorů ovlivňující globální úhrn slunečního záření je celková doba slunečního svitu. Celková roční doba slunečního svitu se na našem území v průměru pohybuje 1400–1800 hodin.

3.1.1 Využití sluneční energie

Sluneční energii můžeme využívat pasivně a aktivně. K pasivnímu využití solární energie nepotřebujeme žádné zařízení. Jedná se převážně o využití skleníkového jevu. Tímto využitím se například zabývá solární architektura, ve které se domy navrhují za účelem snížení spotřebované energie – hlavně vytápění. Dosahují toho uzpůsobením návrhu domu tak, aby co nejvíce tepla získával ze slunečního záření. [4]

Za aktivní využití sluneční energie považujeme fototermiku a fotovoltaiku. Fototermika se zabývá ohřevem látek slunečním zářením nejčastěji pro vytápění. K tomu využívá solární kolektory, které pohlcují sluneční paprsky na svou plochu, čímž ohřívají teplonosnou kapalinu. Kvůli neregulovatelnosti sluneční energie bývají

tyto systémy opatřeny akumulací nádrží pro uložení přebytečného tepla. Princip fototermiky využívají i solární elektrárny. V nich se využívají koncentrující kolektory, které koncentrují sluneční paprsky do ohniska pro větší výhřevnost, pro vytvoření páry. Pára roztáčí parní turbínu, čímž se generuje elektrický proud. Fotovoltaika se zabývá přeměnou slunečního záření na elektrickou energii transformací energie fotonů na elektrický proud pomocí fotovoltaického jevu. [2]

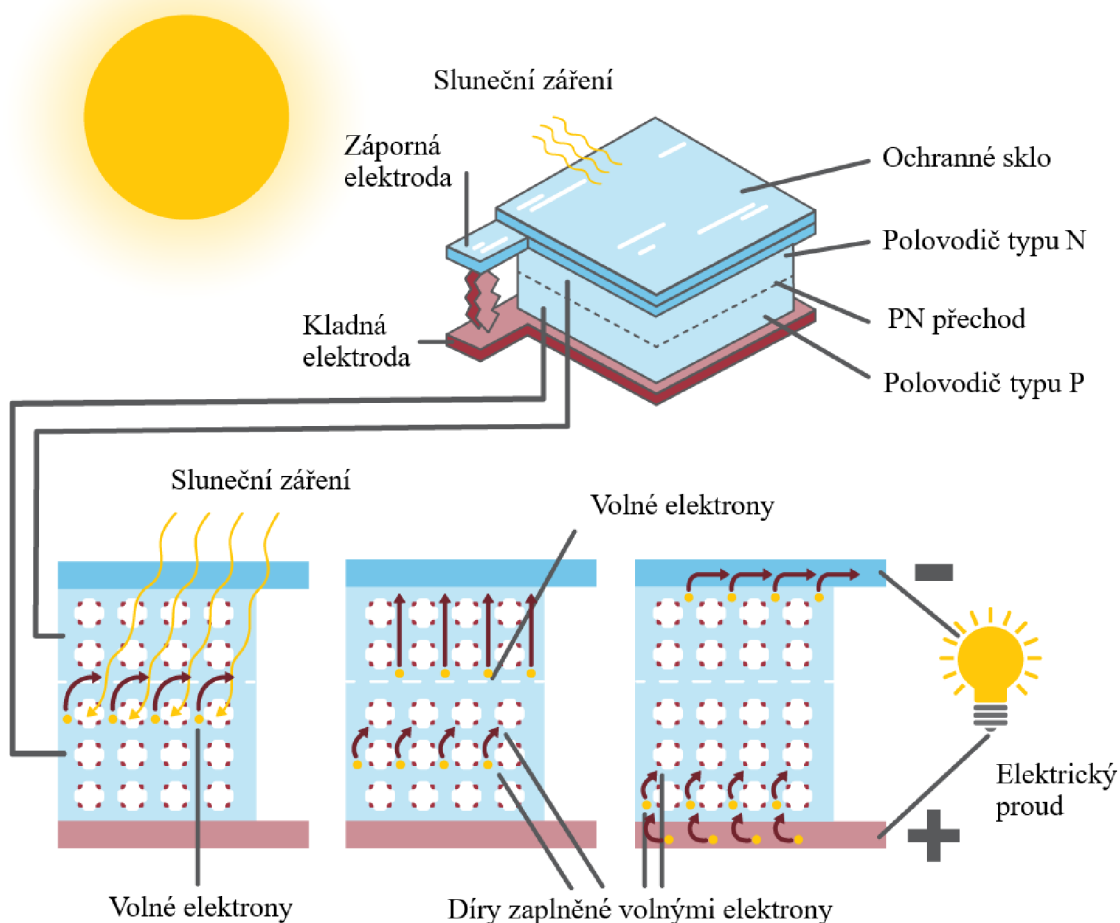
3.2 Fotovoltaický jev

Fotovoltaický jev je fyzikální jev, při kterém vzniká ve fotovoltaických článcích elektrické napětí. Ke vzniku fotovoltaického jevu je zapotřebí dostatečná energie fotonu slunečního záření, která musí být větší než 1,12 eV. Fotony o této energii odpovídají tzv. mezní vlnové délce 1105 nm. Fotony záření o větší vlnové délce nemají dostatek energie k vyvolání fotovoltaického jevu. Platí, že čím kratší má záření vlnovou délku, tím větší mají fotony záření energii. [5]

Přeměna světelné energie na elektrickou energii probíhá ve fotovoltaických článcích. Fotovoltaické články jsou složeny z polovodičů typu P a N, které dohromady tvoří přechod PN. Tyto křemíkové polovodiče vznikají nahrazením některých atomů křemíku atomy jiných prvků. Pro vytvoření polovodiče typu N je potřeba křemík dotovat atomy prvku z V. skupiny periodické tabulky prvků (As, P, Sb), které obsahují 5 valenčních elektronů. Křemík obsahuje pouze 4 valenční elektrony a přidáním prvku s 5 valenčními elektrony bude v krystalické mřížce jeden volný elektron. K získání polovodiče typu P musíme křemík dotovat prvkem z III. skupiny periodické tabulky prvků (B, Al, Ga). Tyto příměsi mají pouze 3 valenční elektrony oproti 4 valenčním elektronům křemíku, čímž bude jedna vazba atomu nezaplněna a vznikne díra. [6]

Na přechodu vzniklém spojením polovodičů typu N a typu P difundují přebytečné elektrony z polovodiče typu N do polovodiče typu P. Vznikne oblast prostorového náboje, která obsahuje malé množství volných nosičů náboje. V oblasti polovodiče typu N přechodu zůstávají kladné, v oblasti polovodiče typu P záporně nabitě dotované atomy. Vznikne elektrické pole, které je směřováno proti pohybu nosičů náboje, čímž zabraňuje probíhání difuze do nekonečna. [7]

Když na polovodič PN dopadne světlo s dostatečnou energií uvolní se elektrony z elektronové vazby. Volné elektrony jsou elektrickým polem přitahovány do oblasti polovodiče typu N. Vzniklé díry přecházejí do oblasti polovodiče typu P. Difúze nosičů až do elektrických kontaktů způsobí, že je na fotovoltaických článcích přítomno napětí. V nezatíženém případě se na FV článku vyskytuje napětí naprázdno a je-li elektrický obvod uzavřen může protékat proud. Napětí jednoho FV článku dosahuje hodnoty 0,5 V. Popis funkce fotovoltaického článku lze vidět na obrázku 2. [7]



Obrázek 2 – Popis funkce fotovoltaického článku [14]

3.3 Druhy fotovoltaických článků

3.3.1 První generace

První generace FV článků jsou převážně monokrystalické a polykrystalické FV články. Díky své relativně vysoké účinnosti je tato generace stále nejvyužívanější generací FV článků s 90 % zastoupením na celosvětovém trhu. Nevýhodou této generace jsou vysoké nároky na čistotu křemíku a celková spotřeba křemíku při výrobě těchto článků. [8]

3.3.2 Druhá generace

Druhá generace vznikla za účelem vytvoření levné alternativy FV článků první generace. Docílili toho snížením potřebného množství čistého křemíku k výrobě FV článků nahrazením čistého křemíku amorfním křemíkem. To způsobilo snížení hmotnosti, snížení ceny a zlepšení mechanických vlastností, hlavně pružnosti. Zlepšení parametrů v těchto oblastech zapříčinilo snížení účinnosti panelů na 5 až 12 %. [8], [9]

3.3.3 Třetí generace

U článků třetí generace je snaha maximalizovat využití energie dopadajících fotonů slunečního záření. Nejčastěji se k tomu využívá několikanásobných přechodů tenkých vrstev. Také je snaha o použití jiné metody oddělování nábojů než PN přechody. Tyto technologie zahrnují fotoelektrochemické články, použití nanostruktur ve formě uhlíkových trubiček a kvantové tečky nanosené na vhodné podložce. [9]

3.3.4 Čtvrtá generace

Čtvrtá generace článků jsou články složené z vícevrstevných profilů. Tyto články se využívají pro zachycení co největšího spektra slunečního záření. Jednotlivé vrstvy jsou nastavené na různé vlnové délky záření. Při dopadu slunečního záření o určité vlnové délce, kterou vrstva nedokáže využít, dojde k propuštění záření na vrstvu, která je vhodná k využití dané vlnové délky. [9]

3.3.5 Monokrystalické články

Nejstarším typem FV článků jsou články vyráběné z monokrystalického křemíku. Vyrábí se z ingotů polykrystalického křemíku zpravidla Czochralského metodou, tj. pomalým tažením zárodka krystalu z taveniny velmi čistého křemíku. [6]

Ingoty monokrystalického křemíku jsou následně rozřezané na plátky silné přibližně 0,25 až 0,35 mm. V poslední době lze vyrábět i články o tloušťce pouze 0,1 mm. Souběžně s poklesem tloušťky destiček se podařilo zmenšit i odpad při řezání. Plátky se zarovnávají na rovnoměrnou tloušťku, vyleští a na povrchu odleptají, aby se odstranily nepravidelnosti a nečistoty. [6]

Tyto plátky jsou již dotované příměsí typu P, nejčastěji borem. Polovodičový PN přechod se na destičkách vytvoří přidávkem fosforu, který na povrchu utvoří vrstvu s vodivostí typu N. Dále se nanese antireflexní vrstva a stínotiskem natisknou sběrné kontakty na přední a zadní stranu. [6], [7]

Tento postup je velice energeticky a technologicky náročný, což způsobuje vysokou cenu výroby monokrystalických článků. [6]

Účinnost monokrystalických článků se pohybuje od 15–19,3 %. Monokrystalické FV články mají napětí naprázdno okolo 0,6 V. Zkratový proud se pohybuje od 3 do 16 A podle velikosti článku a použité technologie. [7]

3.3.6 Polykrystalické články

Tyto články se vyrábějí odléváním polykrystalického křemíku dotovaného borem do vhodných forem a řezáním vzniklých ingotů na tenké plátky o velikosti 0,2 mm. Po očištění a dotaci fosforem se nanáší antireflexní vrstva. Odlévání je podstatně jednodušší metoda než tažení monokrystalu a lze také připravit bloky se čtvercovým nebo obdélníkovým průřezem. Takto vyrobené články mají o něco horší elektrické vlastnosti, protože na styku jednotlivých krystalických zrn, které mají rozměry řádově v milimetrech, je větší odpor. Tyto články dosahují účinnosti od 13 do 17,1 %. [6], [7]

3.3.7 Fotovoltaické články z amorfního křemíku

Proces výroby je založen na rozkladu vhodných sloučenin křemíku ve vodíkové atmosféře. Tímto způsobem se dají připravit velmi tenké vrstvy křemíku na skleněné, nerezové nebo plastové podložce. [6]

Takto nanesená vrstva křemíku je amorfni, tj. nemá pravidelnou krystalickou strukturu a obsahuje určité množství vodíku. Díky větší absorpci slunečního záření může být podstatně tenčí (už vrstva o tloušťce 1 μm pohltí 90 % slunečního záření). Takto lze připravovat velmi tenké a ohebné fotovoltaické články a moduly, které se dají používat jako krycí fólie na střechy. [6]

Tento materiál má ovšem oproti krystalickému křemíku daleko méně pravidelnou strukturu s větším množstvím poruch. Vznikají tak nenasycené vazby, které vytvářejí energetické hladiny uvnitř pseudozakázaného pásu. Tyto rekombinační centra pak snižují účinnost. Snížení hustoty nenasycených vazeb je možno docílit jejich pasivací, nejčastěji vodíkem. [6]

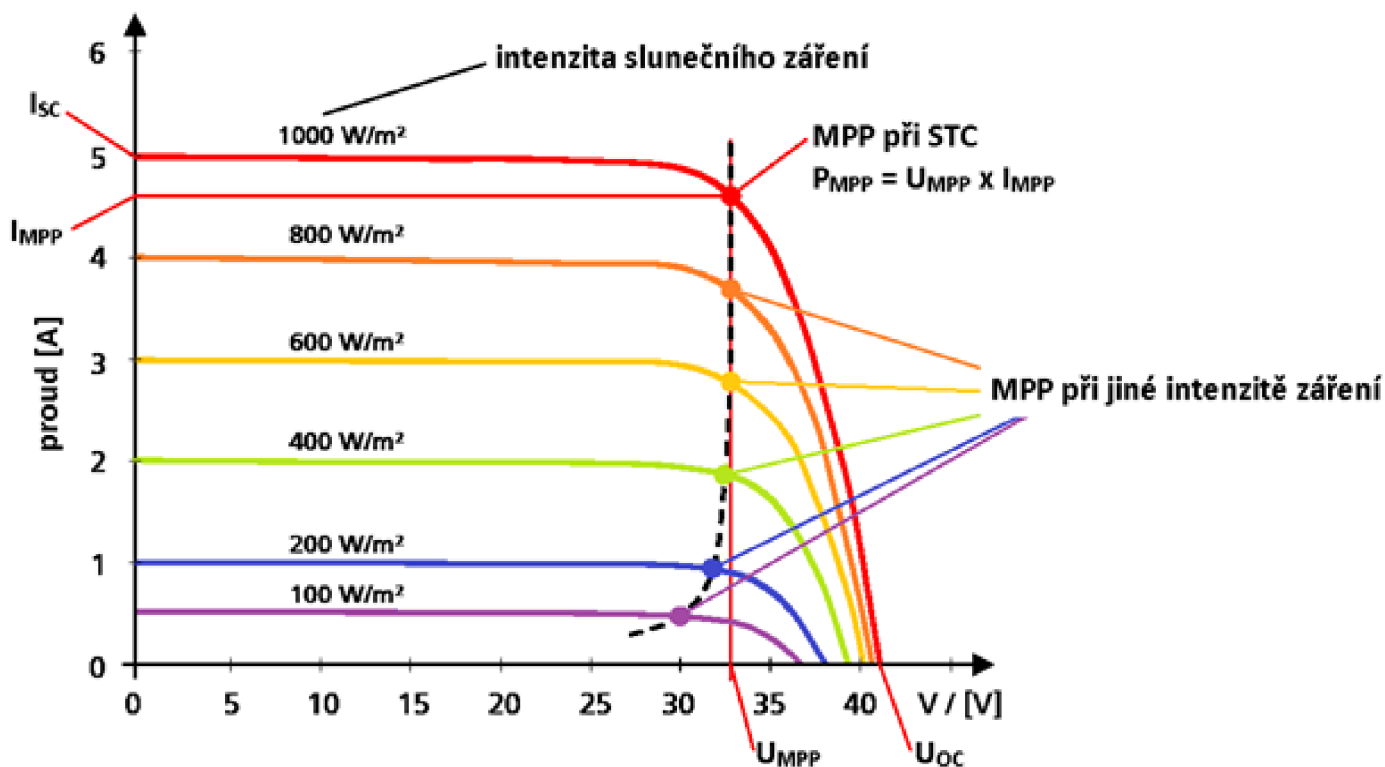
Články z amorfního křemíku mají oproti monokrystalickým a polykrystalickým článkům výhodu. Zaprvé spotřebují podstatně méně materiálu a zadruhé jsou při velkosériové výrobě znatelně levnější. Ovšem levnější výroba je vykoupena nižší účinností, která se pohybuje od 5 do 7 %. [6]

3.4 Elektrické vlastnosti fotovoltaických článků

Pro odečítání charakteristických vlastností fotovoltaických článků je důležitá voltampérová charakteristika (dále VA charakteristika). V literatuře se uvádí pouze 4. kvadrant VA charakteristiky, protože pouze v této části vyrábí FV článek proud. Tato část se pak uvádí jako charakteristická křivka FV článku, kterou můžeme vidět na obrázku 3. [7]

Aby bylo možné mezi sebou porovnávat různé FV články nebo FV moduly, byly k určení elektrických parametrů stanoveny jednotné testovací podmínky pro zjišťování charakteristické křivky FV článku dané normou EN 60904. Tyto podmínky se nazývají STC (*Standard Test Condition*). STC určuje tři testovací podmínky:

1. Intenzita kolmého slunečního záření $E = 1000 \text{ W/m}^2$
2. Teplota článku $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$
3. Definované spektrum světla s $AM = 1,5$



Obrázek 3 - VA charakteristika FV článku při různé intenzitě slunečního záření [10]

Hlavní elektrické parametry FV článků:

1. Hodnota MPP – je to bod na charakteristické křivce, při kterém FV článek pracuje s maximálním výkonem. Tento výkon v bodě MPP se značí jako P_{MPP} [Wp],

$$P_{MPP} = I_{MPP} \times U_{MPP}$$

2. I_{MPP} – [A] – proud v bodě MPP, bývá o 5 až 15 % menší než hodnota proudu na krátko,
3. U_{MPP} – [V] – napětí v bodě MPP,
4. I_{SC} – [A] – proud nakrátko – Je to maximální proud, který je FV článek schopen dodat při daném osvětlení a teplotě,
5. U_{OC} – [V] – napětí naprázdno – napětí na FV článku bez připojení zátěže při daném osvětlení a teplotě. U krystalických článků se tato hodnota pohybuje od 0,5 do 0,6 V a u amorfních článků od 0,6 do 0,9 V,

6. FF – [-] – Faktor plnění – popisuje kvalitu FV článků. Je definován jako podíl výkonu v bodě MPP a teoretického maximálního výkonu. U krystalických článků je tato hodnota 0,75 až 0,85 a u amorfních článků 0,5 až 0,7,

$$FF = \frac{U_{MPP} \times I_{MPP}}{U_{OC} \times I_{SC}}$$

7. η – [-] – účinnost – účinnost přeměny světelného záření na elektrickou energii FV článku. K výpočtu účinnosti je třeba znát kromě výkonu v bodě MPP P_{MPP} i intenzitu slunečního záření E a plochu FV článku A . [7]

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{A \times E} = \frac{FF \times U_{OC} \times I_{SC}}{A \times E}$$

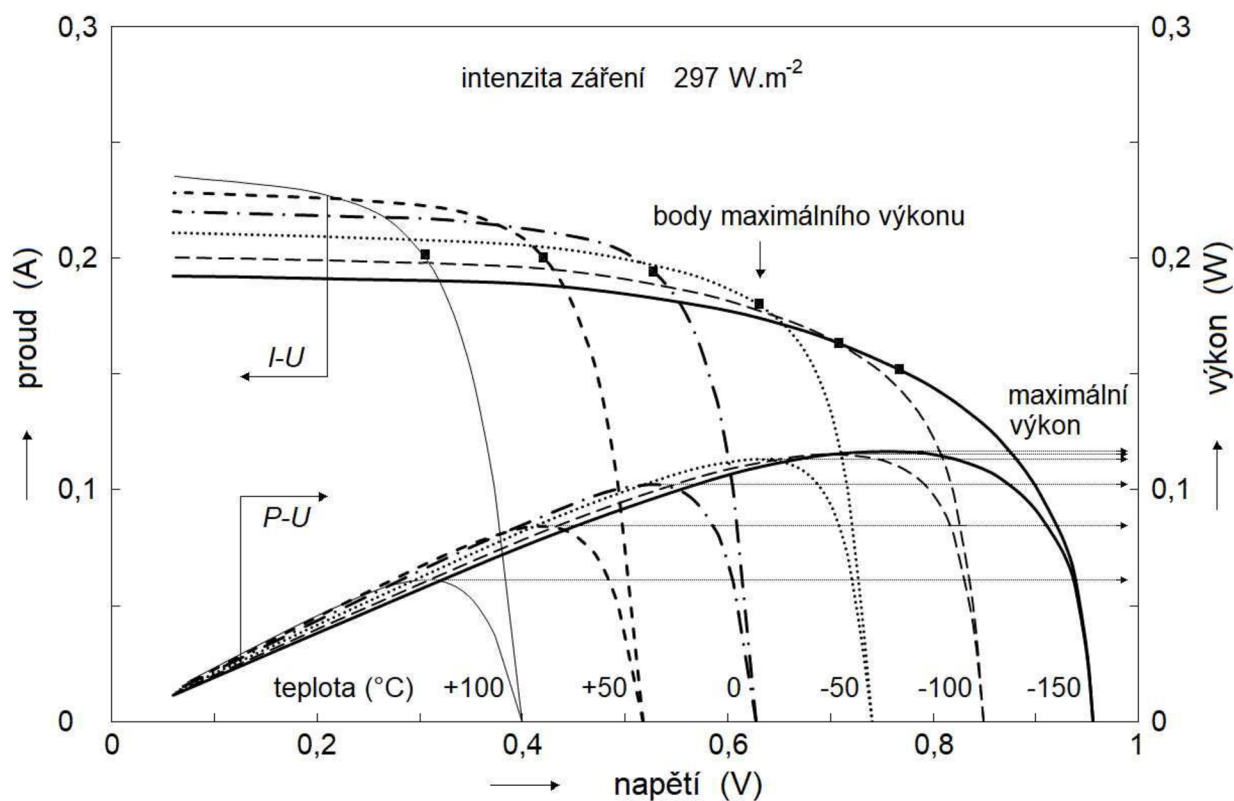
3.4.1 Faktory ovlivňující účinnost

3.4.1.1 Degradace v čase

Výrobci fotovoltaických panelů obvykle zaručují životnost modulů až na 25 let. Také obvykle zaručují, že moduly budou v prvních 10 letech generovat alespoň 90 % výkonu a po zbytek životnosti modulu neklesne generovaný výkon pod 80 %. Fotovoltaické panely obvykle degradují rychlejším tempem v prvních letech jejich životnosti. Obecně platí, že jejich výkon klesá přibližně o 0,5 % ročně. Rychlost degradace je také závislá na druhu fotovoltaického panelu. Například tenkovrstvé fotovoltaické panely degradují rychleji, než polykrystalické a monokrystalické fotovoltaické panely. Degradace výkonu v čase je převážně způsobena dlouhodobým vystavením fotovoltaických panelů nepříznivým přírodním vlivům. [11]

3.4.1.2 Vnější teplota

Fotovoltaické články, jako všechny polovodiče, jsou velice náchylné na změny teploty, a tudíž se zvyšující teplotou se jejich účinnost snižuje. V letních měsících, kdy je intenzita záření největší, se mohou FV články ohřát až na teplotu 60–65 °C. Taková teplota je schopná způsobit znatelné snížení účinnosti oproti parametrům udávaným výrobcem při STC. Zvýšená teplota článků způsobí lehký nárůst proudu, ale zároveň způsobí také velké snížení napětí, což zapříčiní snížení výkonu viz obrázek 4. [11]



Obrázek 4 - VA charakteristiky a výkonové křivky při různých teplotách a konstantní intenzitě záření (halogenová žárovka volená autory studie) [12]

3.4.1.3 Nečistoty

Nečistoty na povrchu fotovoltaických panelů, jako je prach, listí nebo sníh, mohou snižovat výkon. Je to zapříčiněno omezeným množstvím slunečního záření, které může dopadat na FV články, čímž dochází ke ztrátě výkonu. Znečištěním povrchu fotovoltaických panelů může docházet ročně ke ztrátám 5–17 %. Tato hodnota závisí na prašnosti okolí, kvalitě údržby a četnosti srážek. Udržováním čistoty povrchu panelů získáme nejenom snížení ztrát, ale můžeme tím i prodloužit životnost panelů. [11]

3.4.1.4 PID

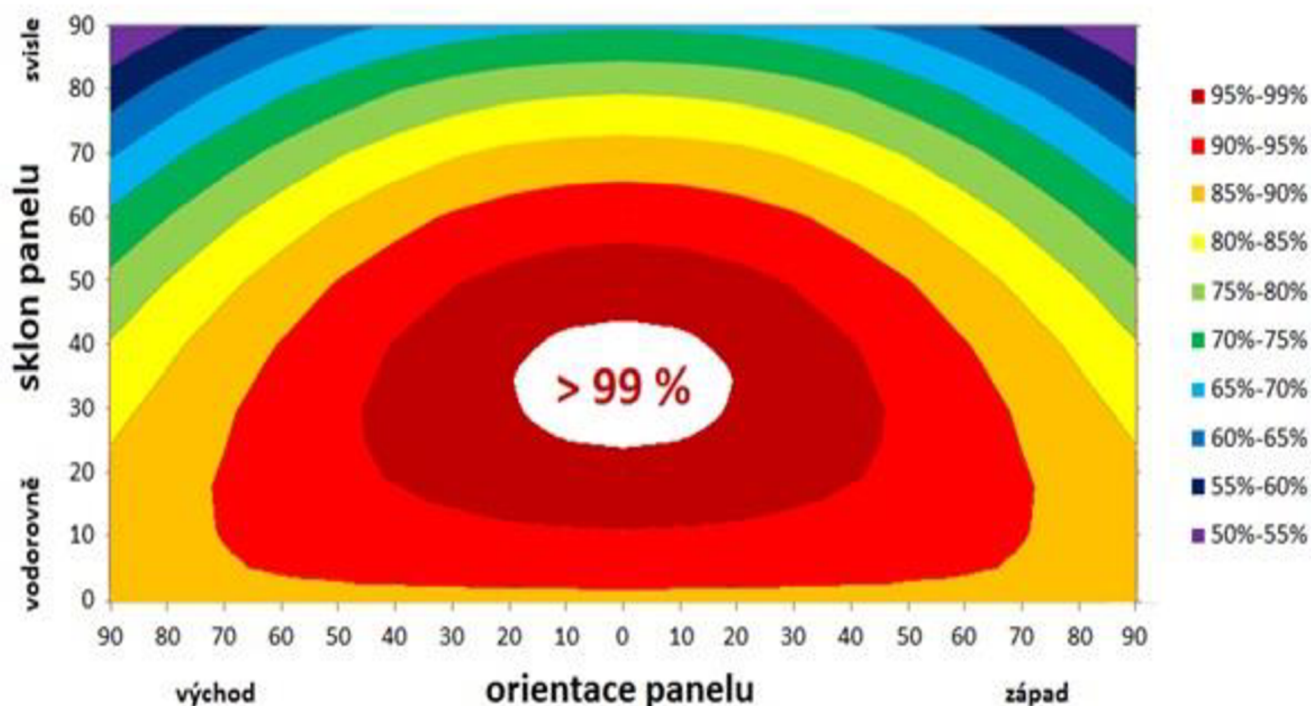
PID (*Potential Induced Degradation*) je jev, při kterém může docházet k velkým ztrátám výkonu i více než 30 % a k nevratnému poškození FV článků. Tento jev se nejčastěji vyskytuje u FV panelů, které se nacházejí na konci stringů (FV panely zapojené za sebou), kde vzniká velký rozdíl potenciálu vůči uzemněnému rámu panelu. Tento rozdíl potenciálu může způsobit, že se některé elektrony z FV článků uvolní

a vybijejí se přes uzemněný rám panelu, čímž vznikne svodový proud. To zapříčiní snížení hodnoty MPP a napětí na prázdko U_{OC} , a to vede ke snížení účinnosti. Nežádoucí vliv PID výrazně urychlují vysoké teploty a vlhkost. [11]

3.4.1.5 Orientace a úhel naklonění FV panelů

Optimální orientace plochy panelů je na jih, kvůli největšímu ročnímu množství dopadající sluneční energie a tím i největšímu výnosu energie. Při odchylce azimutu plochy od jihu o 90° může výnos energie klesnout i o více než 20 % viz obrázek 5. Optimální sklon s ohledem na maximální výnos energie je okolo 35° viz obrázek 5. U praktických aplikací se sklon volí tak, aby se dosáhlo maximální absorbované energie při té dané instalaci. Například při instalaci fotovoltaických parků může dojít ke vzájemnému stínění řad panelů, a proto se v těchto případech volí nižší sklon pro maximalizaci výnosu energie. [13]

Výnos energie v závislosti na sklonu a orientaci panelu



Obrázek 5 - Výnos energie v závislosti na sklonu a orientaci panelu [13]

3.5 Fotovoltaické systémy

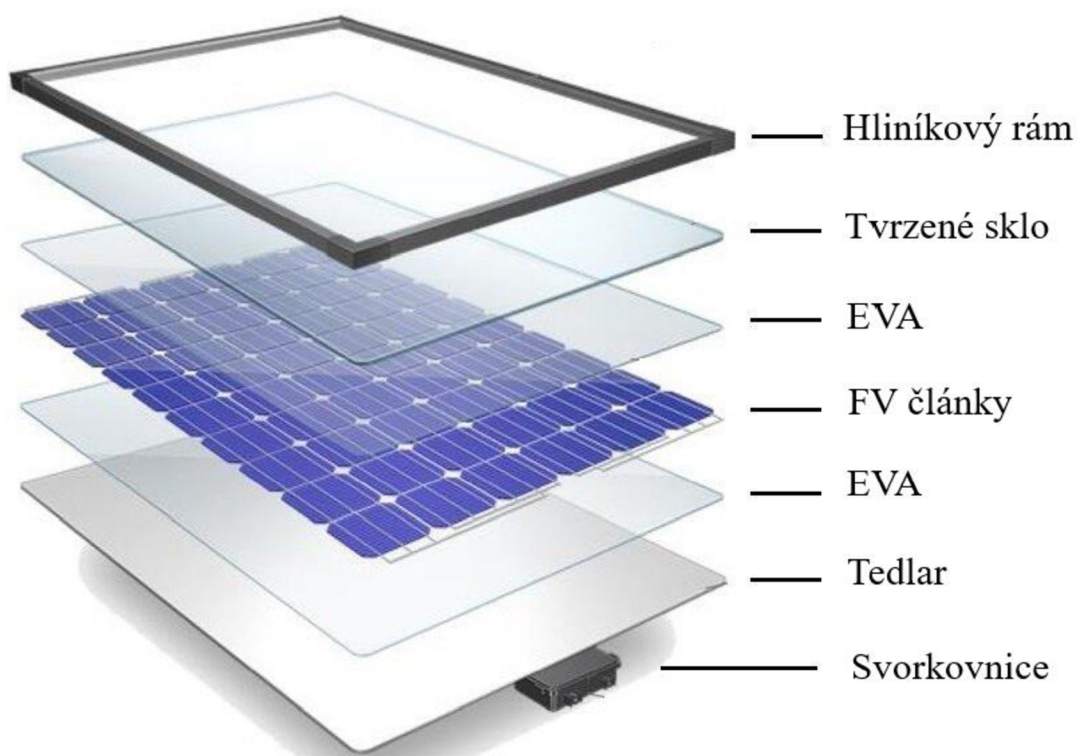
3.5.1 Fotovoltaické panely

Fotovoltaické panely se skládají z propojených fotovoltaických článků zapouzdřených v ochranných vrstvách, které chrání fotovoltaické články před vnějšími vlivy. Fotovoltaické články se propojují sériově a paralelně nebo kombinací těchto zapojení. Oba druhy spojení se projeví jinak na výstupních veličinách panelu. Při sériovém zapojení se napětí článků sčítá, ale proud všemi články teče stejný. U paralelní zapojení se proudy článků sčítají a napětí zůstává stejné. [1]

Obvykle se spojuje do série alespoň 36 fotovoltaických článků pro dosažení požadovaného napětí. Je důležité, aby byly jednotlivé články podobně osvětlené a nedocházelo k zastínění článků. V případě zastínění dochází k omezení proudu do série spojených fotovoltaických článků, čímž dochází k výrazné ztrátě výkonu. Při osvětlení jen části článků může proud procházet zastíněnými články, což může zahřívat a poškozovat neosvětlené články. Těmto nepříznivým vlivům lokálního zastínění lze částečně předcházet použitím překlenovacích diod. Při lokálním zastínění některého článku teče proud překlenovací diodou, která přemostí zastíněnou část řetězce. Výstupní napětí modulu se sníží o napětí překlenuté části, ale proud není omezen. [1]

Fotovoltaické články musí být chráněné proti nepříznivým vlivům okolního prostředí jako jsou teplotní změny, voda, sníh, krupobití, vítr a další faktory. Z toho důvodu jsou fotovoltaické články na přední straně kryté vysoce propustným tvrzeným sklem. Další ochranou vrstvou je etylenvinylacetát (EVA) se stejným indexem lomu jako tvrzené sklo, aby nedocházelo k optickým ztrátám na rozhraní se sklem. Ovšem i přes to, že se volí vysoce propustná skla a polymery, dochází k odražení zhruba 10 % dopadajícího záření nebo jeho absorpci. Výsledná účinnost fotovoltaických panelů je proto vždy nižší než účinnost samotných fotovoltaických článků, ze kterých je panel sestaven. EVA se nachází z obou stran fotovoltaických článků a napomáhá ke změkčení nárazů a tlumení vibrací. [1], [15]

Na zadní straně se nachází pevná fólie z polyvinylfluoridu (PVF), zvaného Tedlar. Fotovoltaické panely jsou dále opatřeny hliníkovým rámem pro dodatečnou ochranu a uchycení k nosným konstrukcím. Na zadní straně panelu je umístěna svorkovnice s vodotěsnými konektory a překlenovacími diodami. Typickou konstrukci fotovoltaického panelu můžeme vidět na obrázku 6. [1], [15]



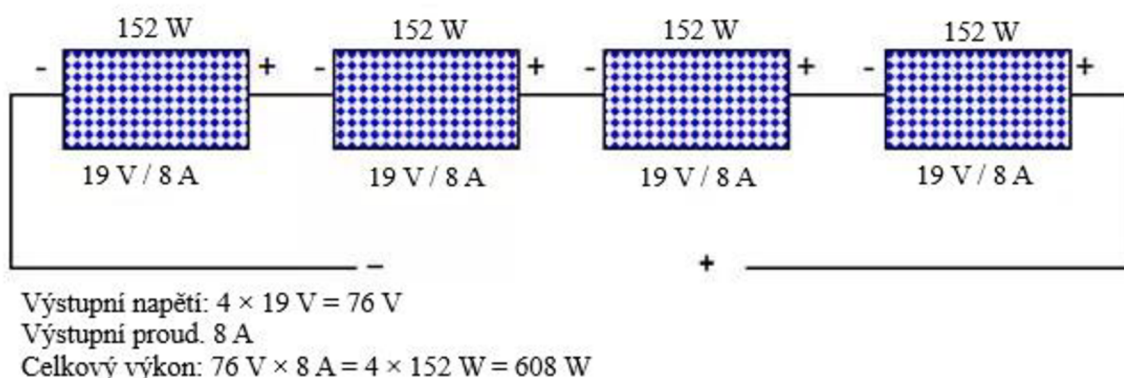
Obrázek 6 - Konstrukce fotovoltaického panelu [16]

3.5.1.1 Spojování fotovoltaických panelů

Fotovoltaické panely se propojují za účelem získání požadovaných hodnot napětí a proudu. Je důležité, aby se spojovaly pouze panely se stejnými technickými parametry od stejného výrobce. Na obrázcích 8 a 10 je patrné, že při změně jen jedné veličiny u jednoho fotovoltaického panelu, může docházet ke ztrátě celkového výkonu i v desítkách procent. Výrobci píší do technické dokumentace, jaké fotovoltaické panely mohou být propojeny a jejich maximální počet v řetězci pro zaručení optimálního chodu panelů. [6]

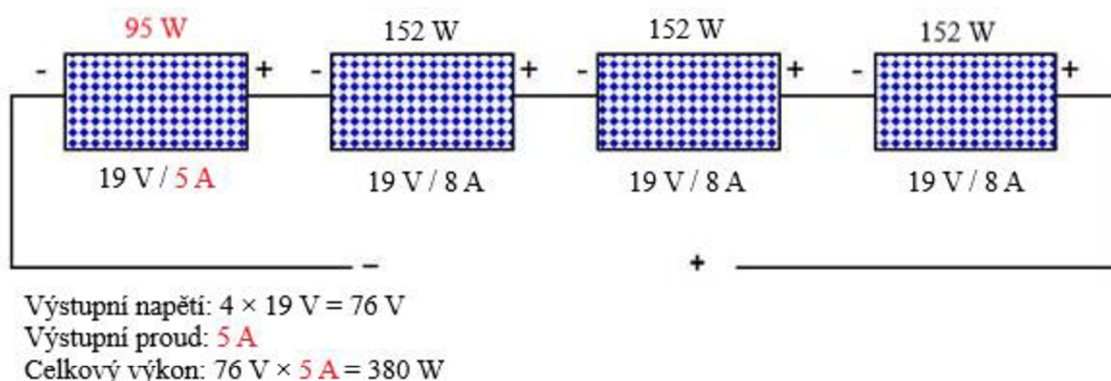
3.5.1.1.1 Sériové zapojení

Pokud systém požaduje vyšší napětí, než je schopný dodat jeden fotovoltaický panel spojují se fotovoltaické panely do série. Napětí jednotlivých fotovoltaických panelů se sčítají při zachování stejného proudu. Příklad zapojení fotovoltaických panelů do série viz obrázek 7. [15]



Obrázek 7 - Příklad sériového zapojení stejných FV panelů [17]

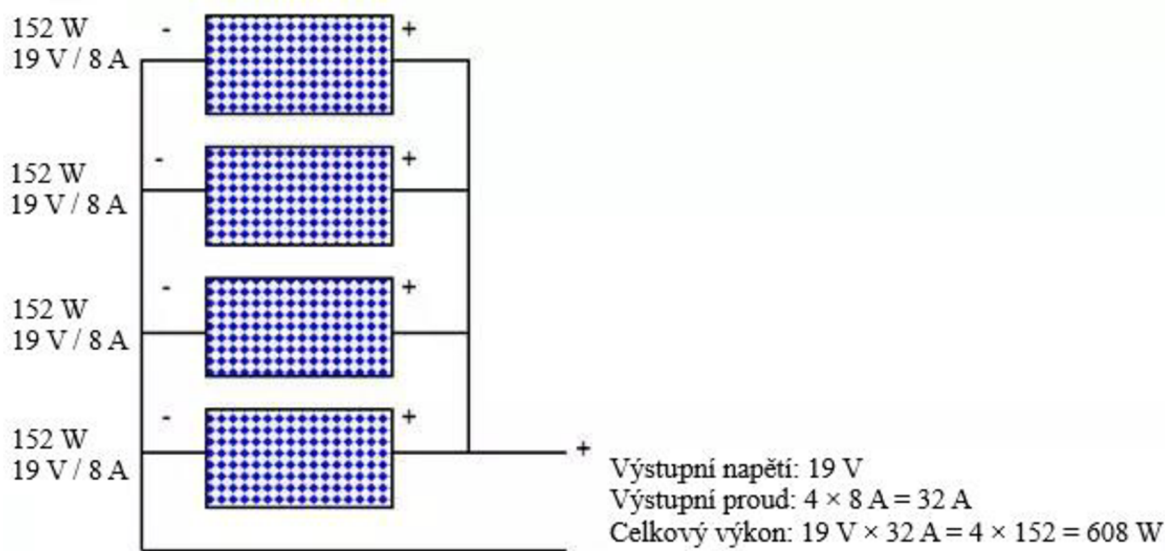
Při sériovém spojení fotovoltaických panelů s různými výstupními proudy bude na výstupu systému pouze výstupní proud panelu s nejnižším výstupním proudem. To významně ovlivní celkový výkon systému viz obrázek 8. V tomto případě výměna jednoho fotovoltaického panelu v řetězci za fotovoltaický panel s nižším proudem o 3 A vede ke snížení celkového výkonu o 228 W neboli 37,5 %. [15]



Obrázek 8 – Příklad sériové zapojení FV panelů s jedním panelem s nižším proudem [17]

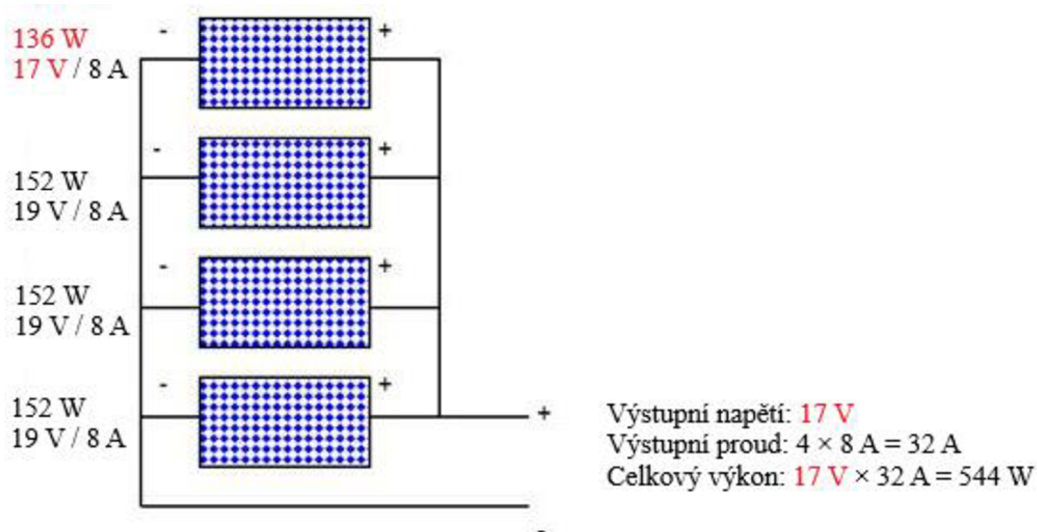
3.5.1.1.2 Paralelní zapojení

Při paralelním zapojení se proudy jednotlivých panelů sčítají při zachování stejné hodnoty napětí. Příklad paralelního zapojení fotovoltaických panelů viz obrázek 9. Tento typ zapojení je výhodný v případě, kdy není žádoucí zvyšovat napětí systému při zvýšení celkového výkonu. [15]



Obrázek 9 - Příklad paralelního zapojení FV panelů [17]

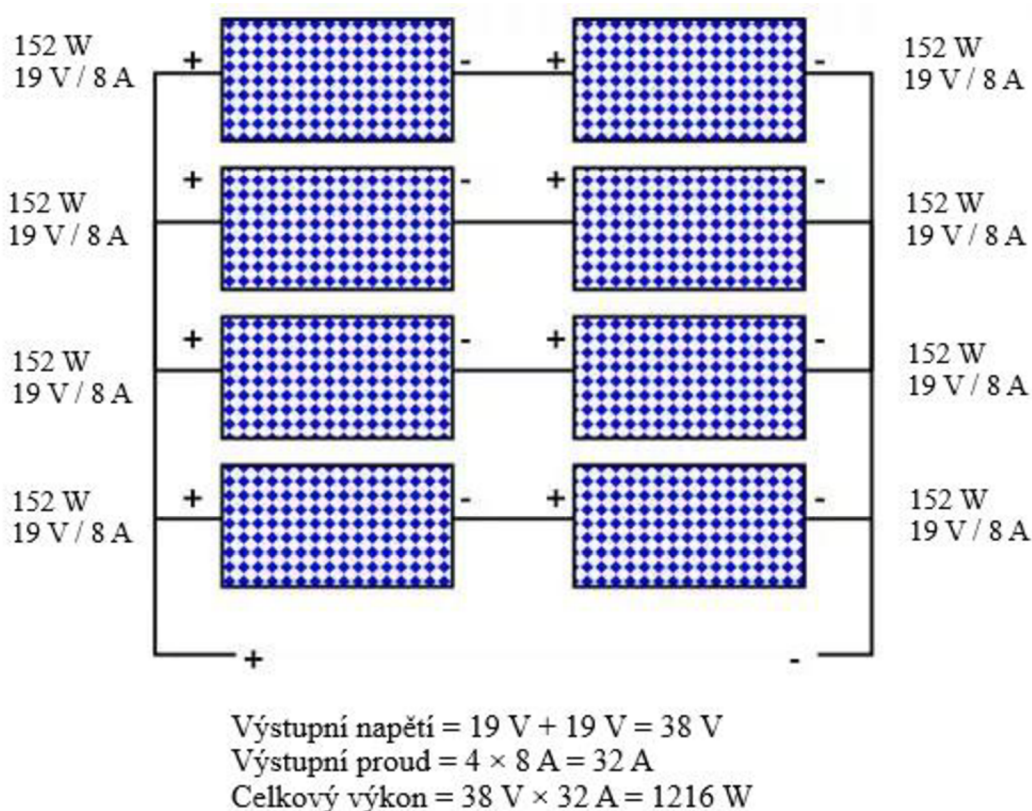
U paralelního zapojení se výstupní napětí rovná napětí panelu s nejnižším napětím, což sníží celkový výkon systému viz obrázek 10. Z příkladu je patrné, že při výměně jednoho panelu za panel s nižším napětím o 2 V se celkový výkon systému snížil 64 W neboli 10,5 %. [15]



Obrázek 10 - Příklad paralelního zapojení FV panelů s jedním panelem s nižším napětím [17]

3.5.1.1.3 Sérioparalelní zapojení

Sérioparalelní zapojení kombinuje vlastnosti sériového a paralelního zapojení. Dochází ke zvyšování výstupního proudu i výstupního napětí. Fotovoltaické panely se nejdříve sériově zapojují do řetězců, dokud není dosaženo požadovaného napětí. Tyto řetězce se propojují paralelně až do dosažení požadovaného proudu. Příklad sérioparalelního zapojení lze vidět na obrázku 11. [15]



Obrázek 11 - Příklad sérioparalelního zapojení FV panelů [17]

3.5.2 Akumulátorová baterie

Baterie není nutnou součástí všech fotovoltaických systémů, ale ve velké části systémů se využívá. Baterie v ostrovních systémech bez jiných možností zdroje elektrické energie je ovšem nutností. Baterie dává možnost k využití nashromážděné vyrobené energie v době, kdy je noc, zataženo nebo panují další nepříznivé podmínky pro výrobu energie. Baterie jsou výhodné zejména u fotovoltaických systému instalovaných v rodinných domech, kdy při

slunných hodinách většinou nikdo nebývá doma a největší spotřeba energie nastává večer. K akumulaci energie se nejčastěji používají elektrochemické akumulátory zejména olovené akumulátory a lithium iontové baterie (li-ion). Velkou výhodou elektrochemických akumulátorů je možnost napájení stejnosměrným proudem přímo z fotovoltaických panelů. [18]

Olovené baterie jsou starší, ale stále rozšířenou technologií. Předností olovených baterií je malé samovolné vybíjení baterie a relativně nízká cena. Hlavní nevýhoda je kratší životnost, která se pohybuje od 200 do 1 000 nabíjecích cyklů. Další nevýhodou olovených baterií je menší energetická hustota od 25 do 30 Wh/kg, s čímž se pojí, že jsou větší a těžší než li-ion baterie. Při využití olovených baterií je potřeba dodržovat určitá bezpečnostní opatření. Při špatné manipulaci či špatných podmínkách skladování může dojít k úniku kyseliny sírové či tvorbě výbušných plynů. [19], [7]

Lithium iontové baterie oproti oloveným bateriím disponují větší životností od 1 000 do 10 000 nabíjecích cyklů a vyšší energetickou hustotou od 75 do 200 Wh/kg. Díky své vyšší energetické hustotě jsou menší a lehčí, a navíc mají daleko lepší životnost než olovené baterie. Nevýhodou li-ion baterií je vyšší pořizovací cena a nutnost použití BMS, kvůli citlivosti li-ion baterií na hluboké vybití a nabití nad konečné nabíjecí napětí, které může vést k nevratnému zničení akumulátoru. [19], [7]

Lithium-železo-fosfátové (LiFePO_4) akumulátory mají energetickou hustotu od 90 do 160 Wh/kg a životnost od 2 000 do 10 000 nabíjecích cyklů. Především se vyznačují vysokou odolností vůči změnám teplot. Mohou fungovat při teplotách od $-20\text{ }^\circ\text{C}$ do $+60\text{ }^\circ\text{C}$. Jejich hlavní výhodou je absence nebezpečných těžkých kovů. [27]

3.5.3 BMS

BMS (*Battery Management System*) je systém, který se stará o optimální chod baterií a maximalizaci životnosti baterií. BMS měří napětí, proud a teplotu baterií. Díky nashromážděným datům BMS předchází přílišnému vybití, přebití nebo přehřívání baterie, které může vést k poškození či vzplanutí akumulátorů. Další funkcí zajišťující prodloužení životnosti baterie je hlídání rovnoměrného nabití jednotlivých článků. [20]

3.5.4 Solární regulátor

Kvůli nelineární charakteristice fotovoltaických panelů a atmosférickým podmínkám se výkon systému v průběhu dne výrazně mění. Solární regulátor zajišťuje maximalizaci možného výkonu z fotovoltaických panelů a ideální chod baterie. Chrání baterii před přebitím a odpojuje zátěž při riziku hlubokého vybití. [21]

3.5.4.1 PWM regulátory

Regulátory s pulzně šířkovou modulací PWM (*Pulse Width Modulation*) jsou nejefektivnějším prostředkem pro dosažení konstantního napětí při nabíjení baterie nastavením pracovního poměru spínačů MOSFET. V regulátoru s PWM se proud ze solárního panelu upravuje podle stavu baterie a potřeb jejího dobíjení. Když napětí baterie dosáhne nastavené hodnoty regulace, algoritmus PWM pomalu snižuje nabíjecí proud, aby se zabránilo zahřívání baterie. Přesto nabíjení pokračuje, aby se baterie nabíla v co nejkratším čase a nedocházelo k jejímu poškození. Oproti MPPT regulátorům není PWM regulátor stejnosměrný měnič, ale spínač propojující fotovoltaický panel s baterií. Se zvyšujícím se stavem nabití baterie začne PWM regulátor odpojovat a opětovně připojovat fotovoltaický panel, aby se předešlo přebíjení a zahřívání baterie. [21]

3.5.4.2 MPPT regulátory

V současné době je nejpokročilejší dostupný regulátor solárního nabíjení MPPT (*Maximum Power Point Tracking*). Je sofistikovanější a dražší, ale oproti PWM regulátoru má několik výhod. Je o 30 až 40 % účinnější při nízkých teplotách. Regulátor MPPT snižuje vyšší napětí solárního panelu na nabíjecí napětí baterie. Přizpůsobí své vstupní napětí tak, aby získal maximální výkon ze solárního panelu, a poté tento výkon transformuje tak, aby dodával měnící se požadované napětí baterii a zátěži. Obecně platí, že MPPT předčí PWM v podnebí s nízkými teplotami, zatímco v subtropickém a tropickém podnebí vykazují oba regulátory přibližně stejný výkon. Z toho důvodu jsou regulátory MPPT v našich podmínkách mnohem efektivnější. Regulátor MPPT je stejnosměrný měnič, který dokáže transformovat výkon z vyššího napětí na výkon s nižším napětím. Množství výkonu se nemění, proto pokud je výstupní napětí nižší než vstupní napětí, výstupní proud bude vyšší než vstupní proud, takže součin $P = U \times I$ zůstává konstantní. Proto, aby bylo možné ze solárního panelu získat maximum, měl by být regulátor nabíjení schopen zvolit optimální bod proudu a napětí na

VA charakteristice pro získání bodu maximálního výkonu při dané intenzitě záření. Vstupní napětí regulátoru PWM se v zásadě rovná napětí baterie připojené k jeho výstupu. Solární panel proto ve většině případů není využíván v bodě maximálního výkonu. [21]

3.5.5 Střídač

Hlavní funkcí střídače je převádět stejnosměrný proud z výstupu fotovoltaických panelů na střídavý proud, který vyžaduje většina spotřebičů a distribuční síť. Střídač dále hlídá optimální výkon fotovoltaických panelů pomocí MPPT. Podle daného nastavení řídí střídač rozvod elektrické energie do spotřebičů, do baterií a do sítě. Moderní střídače disponují prostředky pro monitoring. Díky monitoringu může majitel sledovat, kolik fotovoltaické panely vyrábějí elektřiny a kam vyrobená elektřina teče. [22]

3.5.5.1 Modulový střídač

Modulové střídače se instalují do systému přímo za fotovoltaický modul. Každý fotovoltaický modul má svůj střídač. Jednotlivé střídače jsou paralelně spojeny a jsou připojené k síti. Výhodou je snížení ztrát na stejnosměrném vedením, protože je potřebná délka stejnosměrného vedení je minimální. Tento systém lze také snadno rozšiřovat o další moduly a tím zvyšovat celkový výkon systému. Nevýhodou je vysoká cena systému. [1]

3.5.5.2 Centrální střídač

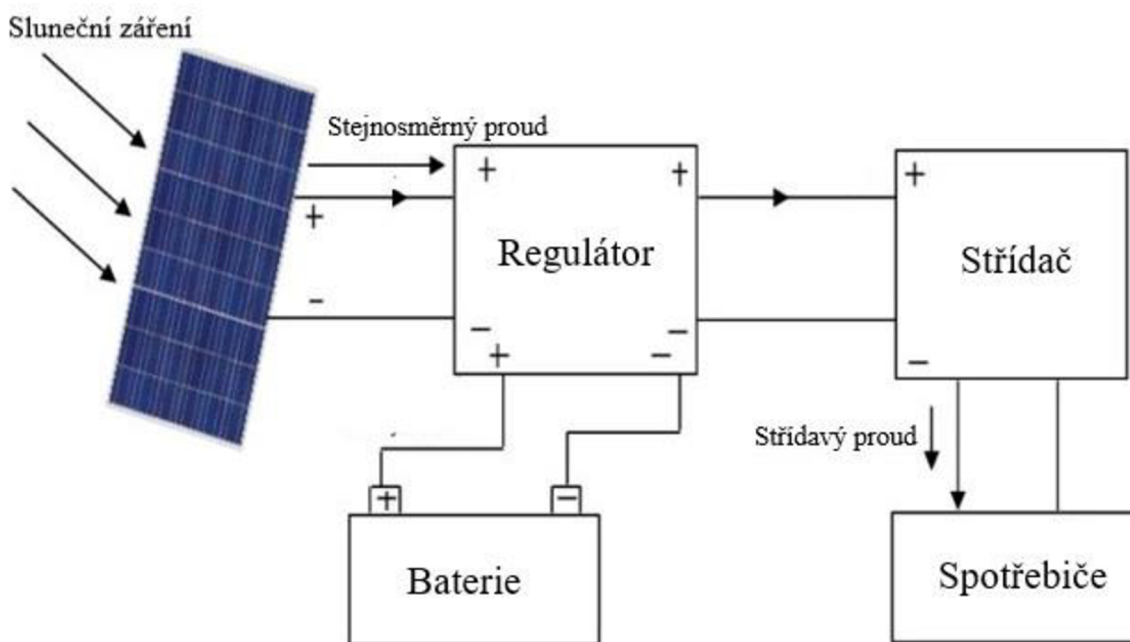
Převádí celkový výkon všech fotovoltaických modulů. Výhodou systému je vyšší pracovní napětí a lepší účinnost střídače. Tento systém lze rozšiřovat o další moduly pouze při zvýšení nominálního napětí střídače, což může znamenat výměnu za výkonnější typ střídače. Další nevýhodou je poměrně složité lokalizování poruch. [1]

3.5.5.3 Řetězový střídač

Užívá se při zapojení modulů do série, kdy jeden střídač zpracovává výkon jednoho řetězce. Těchto řetězců může být v systému několik, díky čemuž lze systém mnohem snadněji rozšiřovat než u centrálního střídače. Také lokalizace případných poruch je mnohem jednodušší než u centrálního střídače. [1]

3.6 Ostrovní systémy (off-grid)

Ostrovní systémy se instalují na místech, kde není možné připojení k distribuční síti. Toto řešení je velice výhodné například pro odlehle chatové oblasti nebo samotách. Určitě dalším zajímavým využitím ostrovních systémů je v rozvojových zemích, kde jsou možnosti připojení k distribuční síti minimální a stále 30 % světové populace žije bez elektrické energie. Ostrovní systémy můžou, ale nemusí obsahovat akumulaci energie, ale je to velice vhodné pro využívání elektrické energie i v noci a při špatném počasí. V systémech s baterií je potřeba použít vhodný regulátor. Když je potřeba napájet běžné spotřebiče střídavým proudem je nutné do systému přidat střídač. Příklad možného zapojení ostrovního systému včetně baterie a střídače viz obrázek 12. [7]

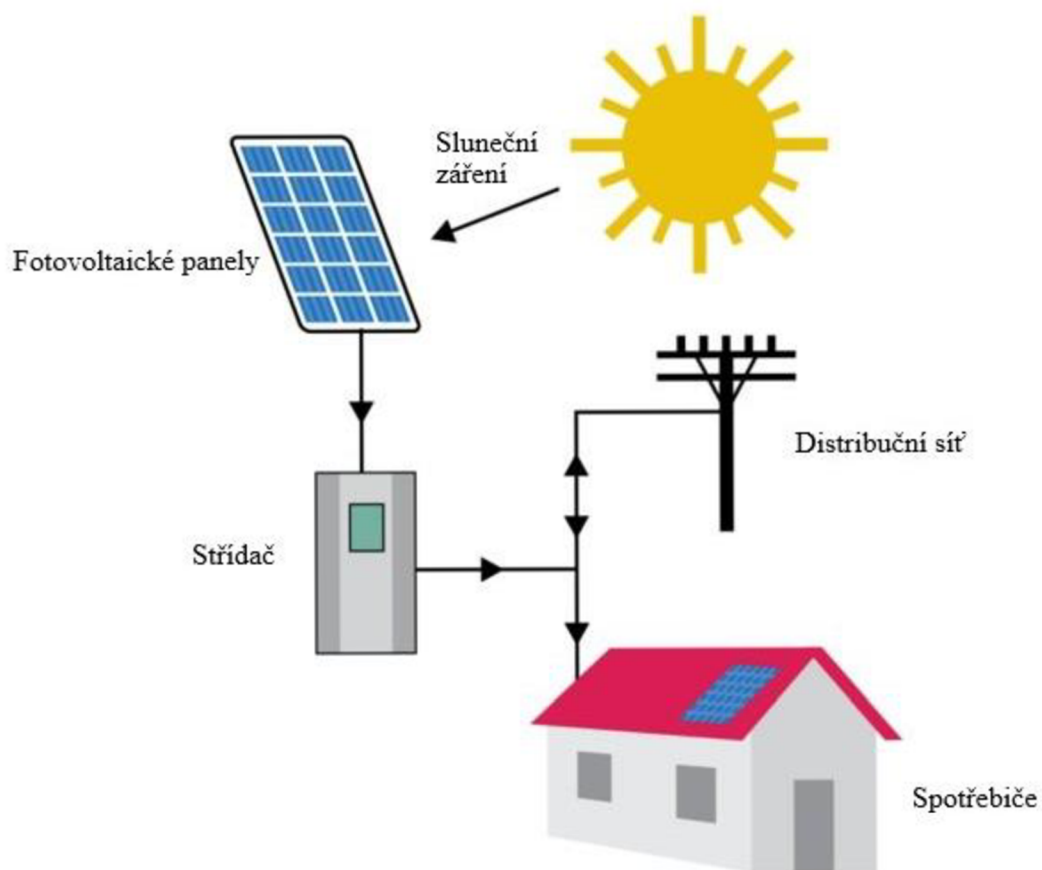


Obrázek 12 - Příklad zjednodušeného zapojení ostrovního systému [23]

3.7 Systémy připojené k rozvodné síti (on-grid)

Systémy připojené k rozvodné síti se vyznačují tím, že při nadbytku vyrobené energie jí mohou dodávat do sítě, a naopak při nedostatečné výrobě mohou ze sítě napájet spotřebiče. Velmi důležité v těchto systémech jsou střídače, které převádějí stejnosměrný proud z fotovoltaických panelů na střídavý proud, který může být dále dodáván do sítě nebo do spotřebičů. V těchto systémech mohou akumulátory zajišťovat uchování vyrobené

energie, která může být využita například při výpadku rozvodné sítě. S těmito systémy se nejčastěji setkáme na rodinných domech, kvůli snížení závislosti na rozvodné síti a snížení účtů za elektřinu. Na obrázku 13 můžeme vidět příklad zjednodušeného zapojení systému připojeného k rozvodné síti.[7]



Obrázek 13 - Příklad zjednodušeného zapojení systému připojeného k rozvodné síti [26]

4 Praktická část

4.1 Popis instalovaného systému

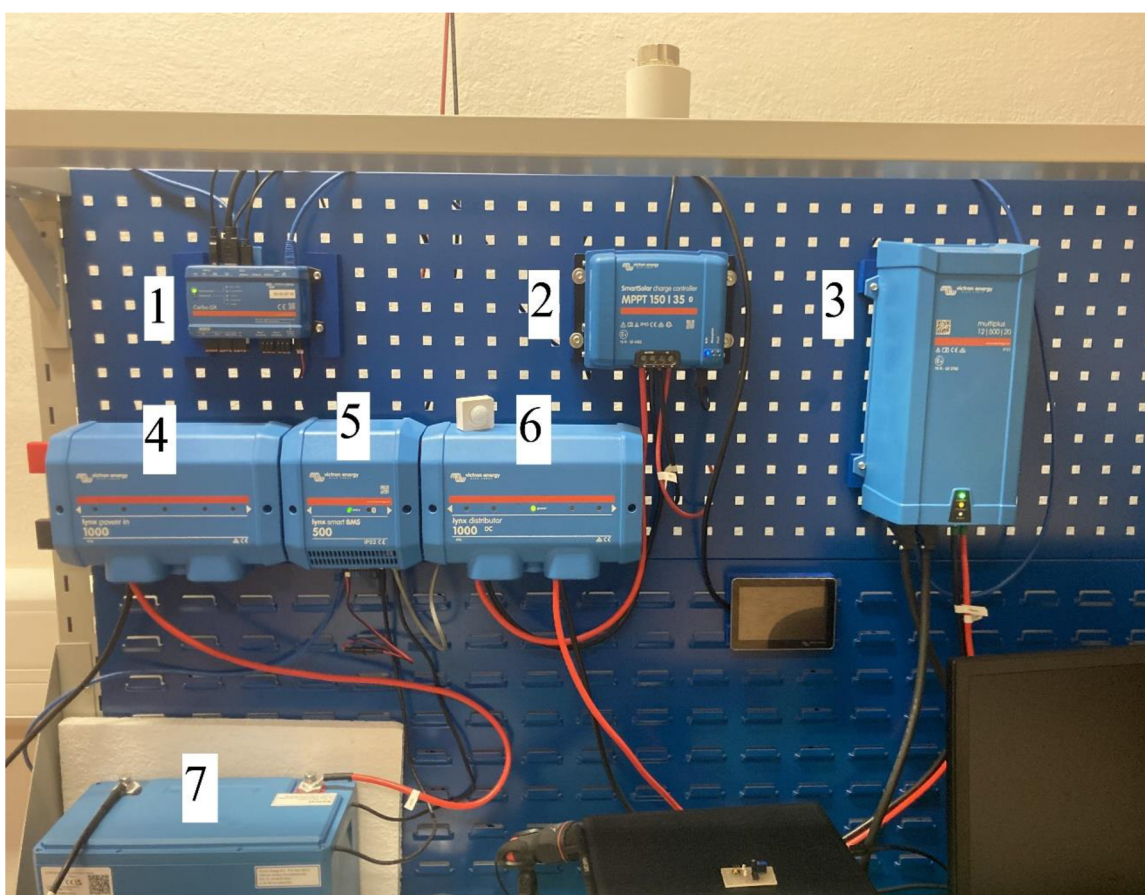
Fotovoltaický systém, ze kterého pocházejí naměřená data, se nachází na Technické fakultě ČZU a jedná se o systém připojený k rozvodné síti. Skládá se ze čtyř monokrystalických fotovoltaických panelů od značky Solarfam, konkrétně se jedná o typ SZ-120-36M. Jeden tento fotovoltaický panel má výkon 120 Wp, což dohromady tvoří celkový instalovaný výkon systému 480 Wp. Fotovoltaické panely jsou umístěné na nosné konstrukci pod úhlem 39° a jsou orientované na jihovýchod s azimutem 140° . Instalované fotovoltaické panely lze vidět na obrázku 14.



Obrázek 14 - Instalované fotovoltaické panely

Instalovaný systém (obrázek 15) se skládá z:

1. komunikační centrum Victron Energy Cerbo GX – slouží ke komunikaci s celým systémem a maximalizaci výkonu systému,
2. solárního regulátoru Victron Energy SmartSolar 150/35 s technologií MPPT pro získání maximálního možného výkonu při aktuální intenzitě záření,
3. střídač Victron Energy Multiplus 12V/500VA/20A-16A – slouží pro připojení spotřebičů a připojení k rozvodové síti. Disponuje čistě sinusovým výstupním napětím a přepínačem napájení mezi baterií a externím zdrojem, kterým je v tomto případě rozvodná síť, ale může být použit například generátor,
4. modulární přípojnice Lynx Power In – je určena k připojení baterie k modulární pojistkové jednotce,
5. správa baterií Lynx Smart BMS 500 s vestavěným stykačem,
6. modulární pojistková jednotka Lynx Distributor,
7. baterie Victron Energy LiFePo 12,8V/100Ah – slouží pro uchovávání vyrobené energie.



Obrázek 15 - Instalovaný fotovoltaický systém

4.2 Odhadnutá výroba energie

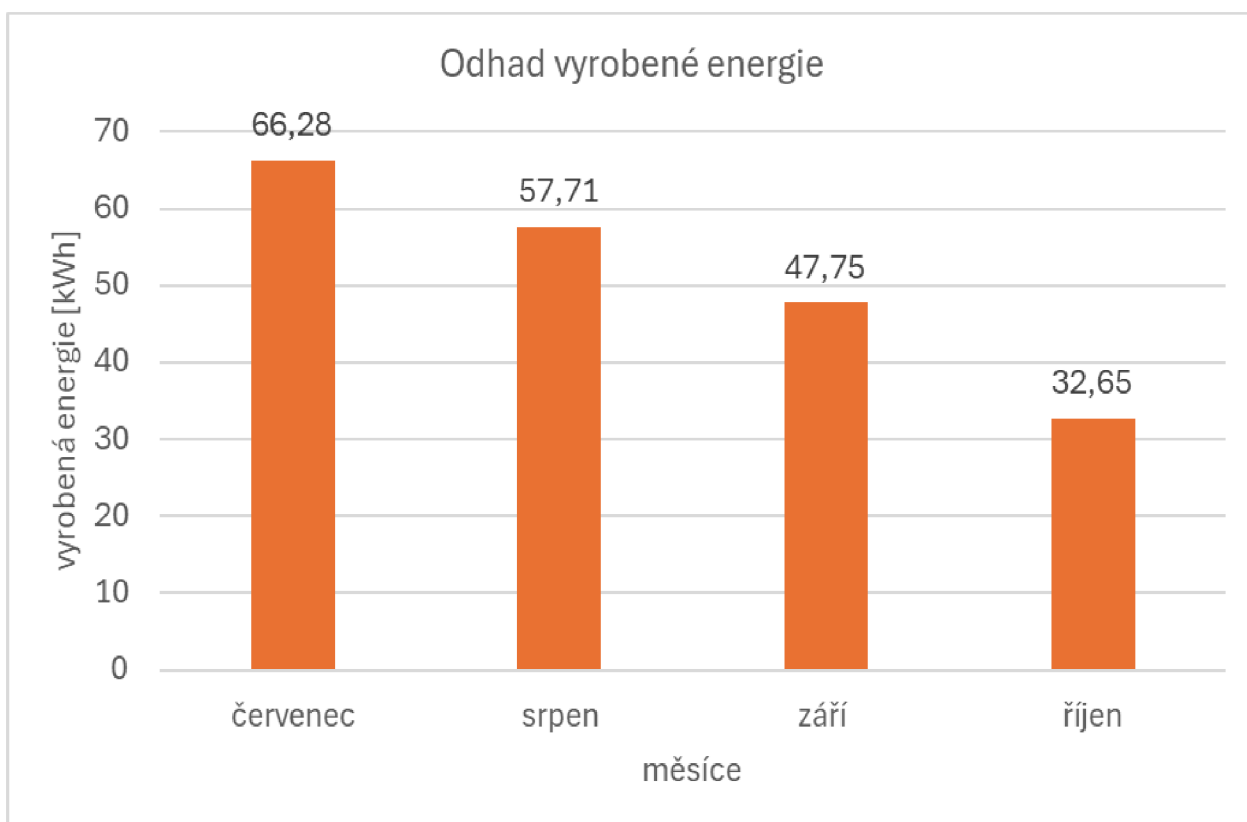
Pro získání očekávaného množství vyrobené energie byl použit systém PVGIS (*Photovoltaic Geographical Information System*) dostupný na: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/. Jedná se o systém, který byl vyvinut za pomoci Evropské unie. Umožňuje uživatelům získat data o intenzitě slunečního záření a simulaci očekávané výroby energie fotovoltaických systémů. PVGIS obsahuje 4 databáze o intenzitě slunečního záření v různých částech světa a dohromady pokrývají všechny kontinenty kromě severního a jižního pólu. V tomto případě byla vybrána databáze PVGIS-SARAH2, která obsahuje vypočítaná data o intenzitě slunečního záření ze satelitních snímků z Evropy, Afriky, většiny Asie a části jižní Ameriky. Sběr dat pro tuto databázi probíhal v letech 2005 až 2020. [24]

K výpočtu očekávané výroby energie je potřeba doplnit další údaje:

- technologie fotovoltaických panelů – na výběr jsou dané tři možnosti: fotovoltaické panely na bázi křemíku, CIS, CdTe. PVGIS nerozlišuje při výpočtech monokrystalické a polykrystalické panely, proto pro výpočet byla vybrána souhrnná možnost fotovoltaických panelů na bázi křemíku,
- instalovaný výkon – instalovaný výkon tohoto fotovoltaického systému je 480 Wp,
- ztráty fotovoltaického systému – jedná se převážně o ztráty na vedení a na střídači. Tato hodnota je již předem nastavena na 14 %. PVGIS dále k této hodnotě připočte odhadované ztráty odrazivostí a odhadované ztráty vlivem teploty. PVGIS stanovil celkové ztráty tohoto systému na 20,74 %,
- způsob upevnění fotovoltaických panelů – zde jsou nabízené dvě možnosti: fotovoltaické panely umístěné na volně stojící konstrukci a fotovoltaické panely připevněné na střeše. Upevnění fotovoltaických panelů ovlivňuje možnost proudění vzduchu v okolí panelů, což ovlivňuje jejich účinnost. V našem případě jsou fotovoltaické panely umístěné na volně stojící konstrukci,
- sklon fotovoltaických panelů – instalované fotovoltaické panely mají sklon 39°,

- orientace fotovoltaických panelů – velikost úhlu natočení od jihu, kde jih je 0° , východ -90° a západ $+90^\circ$. Fotovoltaické panely jsou orientované na jihovýchod s azimutem 140° , tudíž zvolená hodnota je -40° . [24]

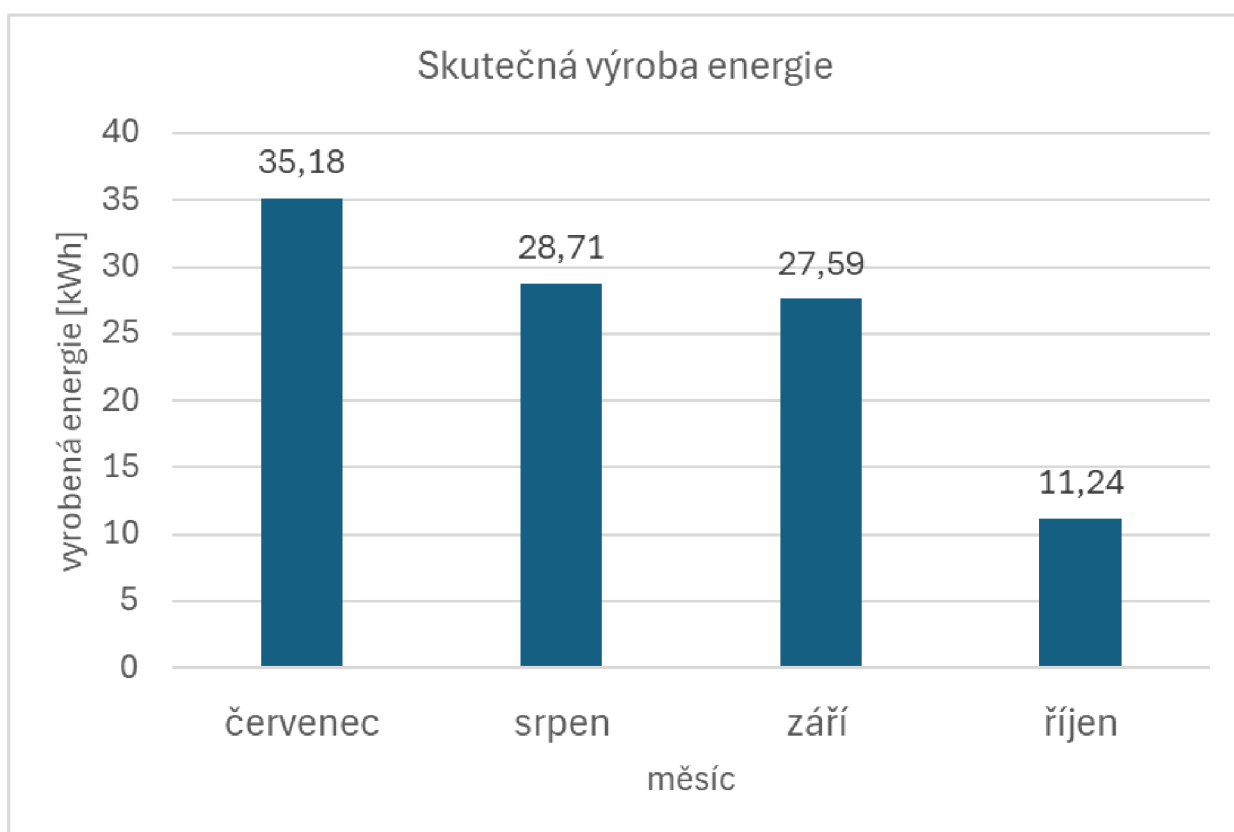
PVGIS vypočítá a vypíše očekávané hodnoty vyrobené energie za celý rok a za jednotlivé měsíce. Z důvodu dostupnosti kompletních naměřených dat pouze za období červenec až říjen 2023 budu využívat data pouze čtyř měsíců. Srovnání odhadované a skutečně vyrobené energie viz kap. 4.4. Na obrázku 16 lze vidět odhadovanou výrobu energie v jednotlivých zkoumaných měsících.



Obrázek 16 - Odhad vyrobené energie

4.3 Skutečná výroba energie

Data o skutečné výrobě energie byla stažena z monitoringu Victron Energy. Kompletní dostupná data byla k dispozici z měsíců červenec až říjen 2023, proto budou porovnávána data s očekávanou výrobou energie pouze za tyto měsíce. Data skutečné vyrobené energie v jednotlivých měsících lze vidět na obrázku 17.

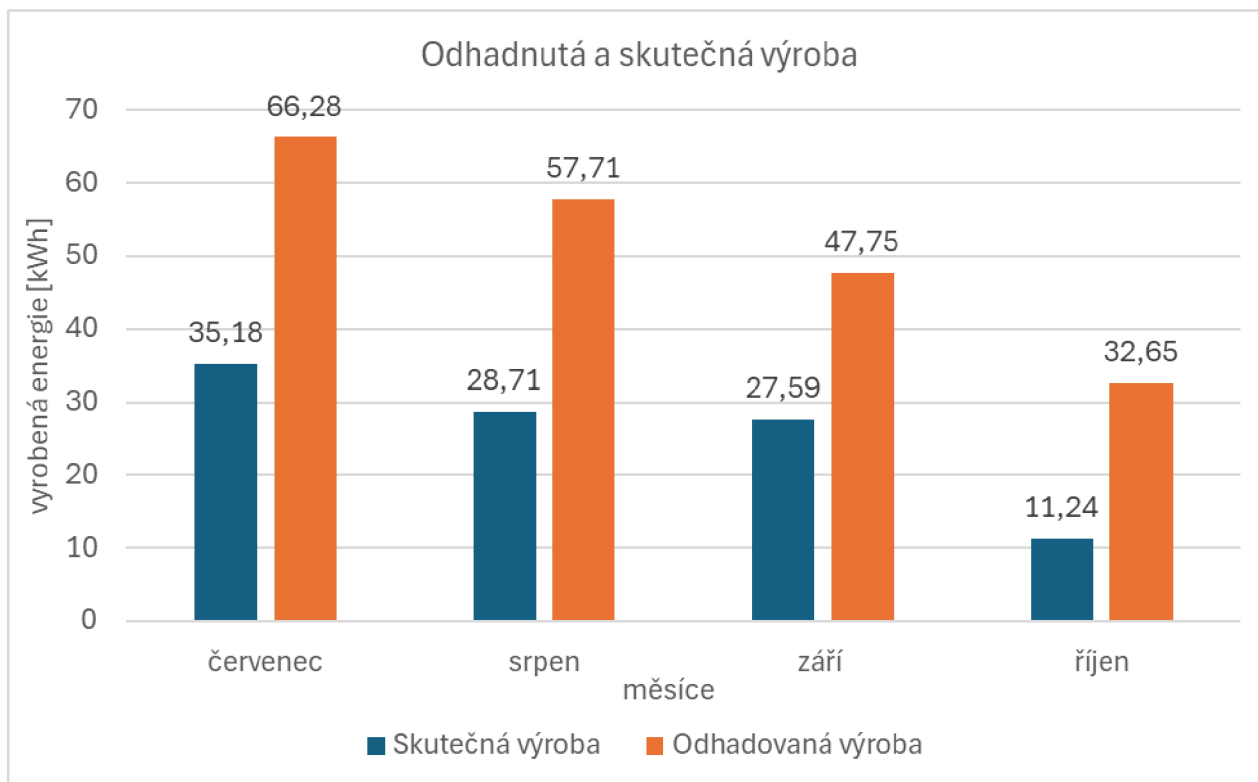


Obrázek 17 - Skutečná výroba energie

Instalovaná FVE vyrobila v tomto období celkem 102,72 kWh, přičemž nejvíce červenec a nejméně za říjen. Jedná se o očekávaný trend, kdy skutečná výroba klesá se snižující se intenzitou záření s koncem léta a nástupem podzimu. Rozdíl mezi vyrobenou energií v srpnu a září je pouze 1,12 kWh, což bylo zapříčiněno mimořádně slunným počasím v září 2023. K o to většímu poklesu množství vyrobené energie došlo v říjnu, kdy došlo k poklesu vyrobené energie o 16,35 kWh.

4.4 Porovnání odhadnuté a skutečné výroby energie

Na obrázku 18 jsou porovnávány odhadnuté hodnoty vyrobené energie za dané měsíce ze systému PVGIS a skutečné hodnoty vyrobené energie.



Obrázek 18 - Odhadnutá a skutečná výroba

Skutečná vyrobená energie byla oproti odhadované výrobě výrazně menší. Nejvíce se liší odhadovaná výroba od skutečné výroby v červenci, kdy skutečná výroba s 35,18 kWh byla o 31,1 kWh nižší oproti očekávaným 66,28 kWh. Naopak nejmenší rozdíl, ale přesto významný, byl v září, kdy rozdíl mezi skutečnou a očekávanou výrobou činil 20,16 kWh. Celková skutečná výroba činila 102,72 kWh a celková očekávaná výroba za tyto měsíce je 204,39 kWh. Skutečná vyrobená energie tvoří pouze 50,26 % očekávané vyrobené energie.

Tento rozdíl mezi odhadnutou a skutečně vyrobenou energií je nejspíše způsobem stíněním okolních budov (více viz kapitola 4.7 Diskuse naměřených výsledků). Na obrázku 19 lze vypořadovat nevhodné umístění panelu.



Obrázek 19 - Umístění fotovoltaických panelů mezi budovami

4.5 Měsíční skutečná výroba energie

V tabulce 1 jsou vypsaná souhrnná data vyrobené energie z jednotlivých dnů v měřených měsících. Jednotlivé grafy, které zobrazují detailní průběhy denní vyrobené energie analyzovaných měsíců, jsou přiloženy v příloze 1–4.

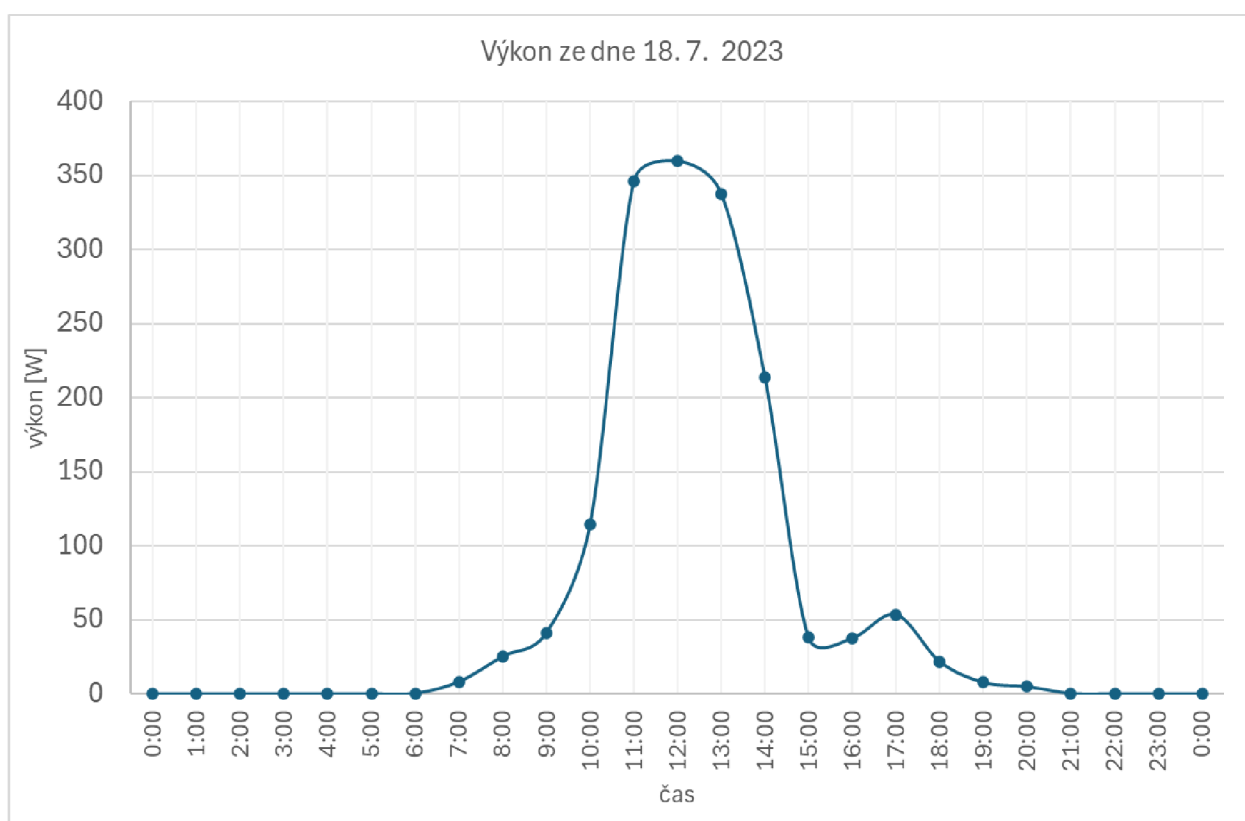
měsíc	nejvíce vyrobeno [kWh]	nejméně vyrobeno [kWh]	denní průměr [kWh]	celkem vyrobeno [kWh]
červenec	1,57	0,58	1,13	35,18
srpen	1,41	0,16	0,93	28,71
září	1,31	0,21	0,92	27,59
říjen	0,77	0,1	0,36	11,24

Tabulka 1 - Souhrnná data vyrobené energie jednotlivých dnů v měřených měsících

Nejvíce vyrobené energie bylo v červenci s denním průměrem vyrobené energie 1,13 kWh, oproti tomu nejméně vyrobené energie bylo v říjnu s denním průměrem 0,36 kWh. Srpen a září mají velice podobné denní průměry vyrobené energie s tím, že v srpnu byl denní průměr 0,93 kWh a v září 0,92 kWh. Zároveň v srpnu můžeme pozorovat nejvyšší rozdíl mezi dnem s nejvíce vyrobenou energií a dnem s nejméně vyrobenou energií.

4.6 Denní skutečná výroba energie

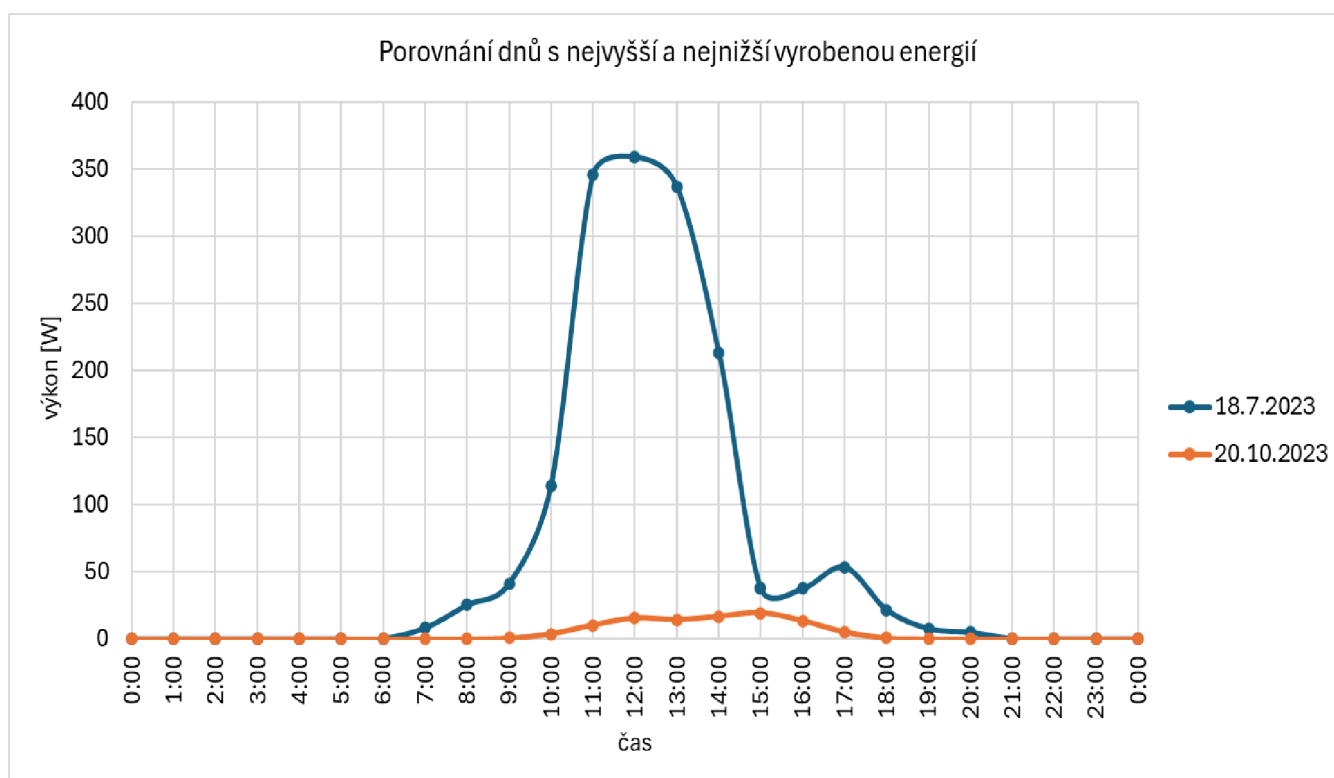
Na obrázku 20 je vidět průběh výkonu na výstupu fotovoltaických panelů z 18. 7. 2023. Jednalo se o den, kdy bylo vyrobeno nejvíce energie za celé čtyři měsíce s 1,57 kWh.



Obrázek 20 - Výkon ze dne 18. 7. 2023

Z obrázku 20 je patrné, že mezi 6:00 a 7:00 začalo na fotovoltaické panely dopadat první sluneční záření a výkon začal pomalu stoupat. Dodávaný výkon, však z počátku moc nepřibývá z důvodu stínění od východní budovy. Po 9:00 se slunce začíná přesouvat do lepší pozice, kde východní budova přestává tolik stínit a po 10:00 už nedochází k zastínění východní budovou a okamžitý výkon prudce roste. Nejvíce výkonu dodávají fotovoltaické panely ve 12:00, kdy je slunce v ideálním úhlu a nedochází k žádnému stínění. V tu chvíli

se okamžitý výkon dostane k 359,6 W. Mezi 13:00 a 15:00 dojde k významnému poklesu výkonu, protože fotovoltaickým panelům začne stínit západní budova. V tento den byl pokles výkonu nejspíše ještě podpořen oblačností, protože mezi 16.00 a 17:00 došlo ještě k mírnému zvýšení výkonu, kdy nejspíše oblačnost polevila. Nejedná se o opakovaný jev, protože v jiných dnech k tomuto poklesu a opětovnému nárůstu v těchto hodinách nedocházelo. Od té doby dodávaný výkon klesal až do 21:00, kdy fotovoltaické panely přestaly dodávat jakýkoliv výkon.



Obrázek 21 - Porovnání dnů s nejvyšší a nejnižší vyrobenou energií

Na obrázku 21 je porovnávám den s nejvyšší dodanou energií a nejnižší dodanou energií za celé čtyři měsíce. Jedná se o 18. 7, kdy bylo vyrobeno 1,57 kWh a o 20. 10, kdy bylo vyrobeno pouze 0,1 kWh. Dne 18. 7 okamžitý výkon dosahoval hodnota až 359,6 W, oproti tomu dne 20. 10 nejvyšší okamžitý výkon dosahoval pouze 19,3 W. Tento mimořádně nízký objem vyrobené energie byl nejspíše zapříčiněn tím, že celý den, nebo aspoň jeho velkou část, bylo zataženo, kdy na povrchu fotovoltaických panelů dopadalo pouze difuzní záření.

4.7 Diskuse naměřených výsledků

Z obrázku 17 a z tabulky 1 je patrná klesavá tendence vyrobené energie v analyzovaných měsících. Jak na obrázku 17 tak v tabulce 1 lze vidět, že mezi srpnem a zářím byl rozdíl ve vyrobené energii pouze 1,12 kWh. Takto malý pokles vyrobené energie v září oproti srpnu byl způsoben tím, že září 2023 bylo velmi suché a slunečné. Jednalo se o nejteplejší září od roku 1961 a měsíční srážky na mnoha meteorologických stanicích byly méně než 10 mm. [25]. Denní průměry vyrobené energie jednotlivých měsíců, až na mimořádně slunné září, potvrzují očekávanou klesavou tendenci s koncem léta a příchodem podzimu.

Z obrázku 18, který porovnával odhadnutou a skutečnou výrobu, lze vypožorovat, že je velmi patrný rozdíl mezi skutečně vyrobenou energií a odhadem vyrobené energie. Tento markantní rozdíl ve vyrobené energii je nejspíše způsoben umístěním fotovoltaických panelů. Fotovoltaické panely jsou umístěné tak, že mají vedle sebe, jak na východě, tak na západě budovy Technické fakulty viz obrázek 19. Tím dochází ke stínění v dopoledních i odpoledních hodinách. Instalované fotovoltaické panely proto mají ideální podmínky pro výrobu energie bez stínění pouze pár hodin kolem poledne, kdy je slunce vysoko a nedochází ke stínění okolními budovami. Toto je patrné na obrázku 20, kde z grafu vyplývá, že v tento den (18. 7. 2023) měly fotovoltaické panely pouze 4 hodiny, kdy mohly pracovat bez stínění, které dramaticky ovlivňuje jejich schopnost výroby energie. Toto stínění má za následek nízké hodnoty skutečně vyrobené energie oproti očekávaným hodnotám vyrobené energie.

Vyrobena energie se využívá k napájení profesorského počítače v učebně M017/2. Spotřeba počítačů je velice proměnlivá, ale pokud budeme brát průměrnou spotřebu 150 W a dobu v provozu 6 hodin denně, tak by vyrobená energie za celé analyzované období byla schopna napájet tento počítač po dobu 114 dní. [28]

Z hrubého ekonomického odhadu při velkoobchodní ceně elektřiny 2,04 Kč za 1 kWh ze dne 21. 3. 2024 [29] byla za toto období vyrobena elektrická energie v hodnotě 209,5 Kč. Ovšem reálná ušetřená hodnota je vyšší z důvodu nezahrnutí daní a poplatků distributora podle smluveného tarifu, kdyby stejné množství energie bylo dodáno ze sítě.

5 Závěr

Bakalářská práce analyzuje technické a provozní vlastnosti fotovoltaických panelů. Nejdříve v teoretické části byly rozebírány jednotlivé možnosti využití sluneční energie, různé technologie fotovoltaických článků, elektrické vlastnosti fotovoltaických článků, druhy fotovoltaických systémů a jejich části.

V praktické části byla zkoumána naměřená data vyrobené energie fotovoltaického systému umístěného na Technické fakultě České zemědělské univerzity. Jednalo se o data vyrobené energie za období červenec až říjen 2023. Ze získaných dat jsme vyzorovali klesavou tendenci vyrobené energie v měřených měsících. Nejvíce vyrobené energie bylo v červenci s 35,18 kWh s tím, že hodnoty vyrobené energie v dalších měsících klesaly až na říjnovou hodnotu vyrobené energie 11,24 kWh. To odpovídá očekávání, že s koncem vrcholu léta a nástupem podzimu bude vyrobená energie klesat. Avšak vyrobená energie ze srpna na září klesla pouze o 1,12 kWh, což bylo nejspíše způsobeno velmi slunným počasím v září. [25]

Naměřená data byla dále porovnávána s teoretickými hodnotami, které po vyplnění požadovaných parametrů vypočítal systém PVGIS. Výsledky skutečně vyrobené energie a odhadované vyrobené energie byly velmi odlišné. Z očekávaných 204,39 kWh bylo za analyzované období vyrobeno pouze 102,72 kWh. Takto nízká hodnota vyrobené energie je nejspíše způsobena nevhodným umístěním fotovoltaických panelů.

Vyrozená energie za analyzované období byla celkem 102,72 kWh, tato energie by byla schopna napájet jeden počítač po dobu 114 dní a podle hrubého ekonomického odhadu ceny vyrobené elektrické energie je její hodnota 209,5 Kč. Tyto hodnoty by se ovšem mohly téměř zdvojnásobit při umístění fotovoltaických panelů na místo, kde by ke stínění nedocházelo. FVE převážně slouží pro výukové účely a při reálné instalaci, kde je vyžadován vyšší výkon by bylo jinak řešeno umístění a nejspíše instalováno více fotovoltaických panelů.

6 Seznam použitých zdrojů

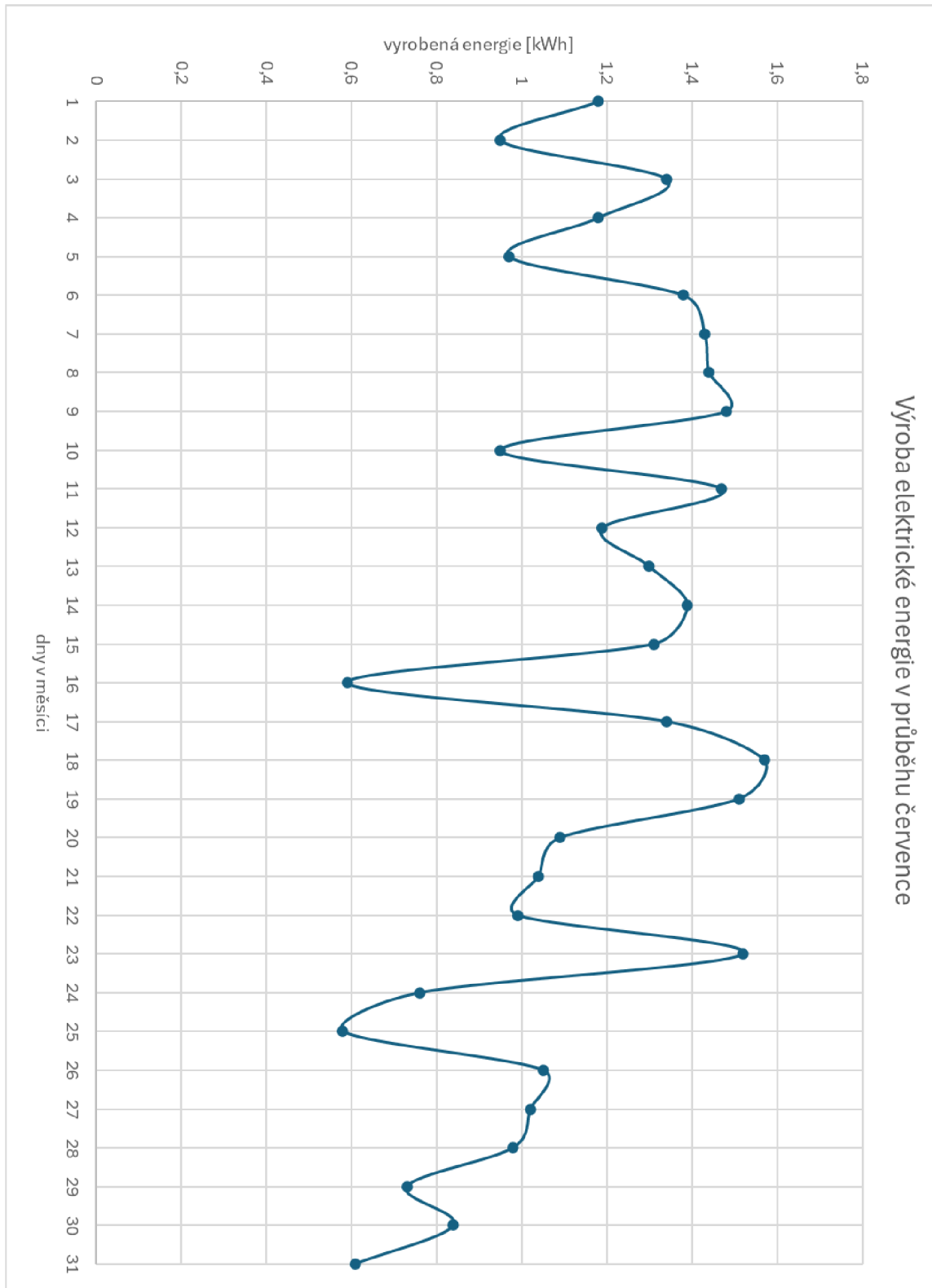
- [1] BENDA, V. a Matuška, T. Energie ze Slunce. In *Obnovitelné zdroje energie*. Praha: Profi Press, 2012. s. 82-113. ISBN 978-80-86726-48-9.
- [2] ŠKORPÍK, Jiří. Sluneční záření jako zdroj energie, *Transformační technologie*, Brno: Jiří Škorpík, [online]. 2021 [cit. 2023-12-12]. Dostupné z: <https://www.transformacni-technologie.cz/02.html>. ISSN 1804-8293.
- [3] *Isofen energy*. [online]. [cit. 2023-12-15]. Dostupné z: <http://www.isofenenergy.cz/slunecni-zareni-v-cr.aspx>
- [4] KUSALA, Jaroslav. *Topení ze Slunce*. [online]. In: Solární energie. 2006. [cit. 2024-01-07]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k22.htm>.
- [5] KUSALA, Jaroslav. *Topení ze Slunce*. [online]. In: Solární energie. 2006. [cit. 2024-01-07]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/f8.htm>
- [6] CHMEL, Ladislav a HAMERNÍK, Ivo. *Fotovoltaika, fototermika*. Brno: Publi. 2014. ISBN 978-80-88058-02-1. [cit. 2024-01-10]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/91/Impresum.html>
- [7] HASELHUHN, Ralf a MAULE, Petr. *Fotovoltaické systémy*. Plzeň: Česká fotovoltaická asociace. 2017. ISBN 978-80-906281-5-1.
- [8] PASTUSZAK, Justyna a WEĞIEREK, Pawel. Photovoltaic Cell Generations and Current Research Directions for Their Development. [online]. *Materials (Basel)*. 2022, roč. 15, č. 16. [cit. 2023-11-26]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9414585/>.
- [9] MASTNÝ, Petr a kol. Konstrukce fotovoltaických článků. In *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [10] BECHNÍK, Bronislav. *Nejpoužívanější pojmy ve fotovoltaiice*. [online], poslední úprava 29. září 2014. [cit. 2023-12-15]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaiika/11772-nejpouzivanejsi-pojmy-ve-fotovoltaiice>.
- [11] VIDYANANDAN, K. V. An Overview of Factors Affecting The Performance of Solar PV Systems. [online]. *Energy Scan*. 2017, roč. 27, č. 28. [cit. 2023-12-19]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/319165448_An_Overview_of_Factors_Affecting_the_Performance_of_Solar_PV_Systems.
- [12] LIBRA, Martin. Teplota významně ovlivňuje účinnost fotovoltaické elektrárny. [online]. *Třípól*. 2022, poslední úpravy 30. března 2022. [cit. 2032-12-19]. Dostupné z: <https://www.3pol.cz/cz/rubriky/obnovitelne-zdroje/2821-teplota-vyznamne-ovlivnuje-ucinnost-fotovoltaiicke-elektrarny>. ISSN 2464-7888.

- [13] BEHCNÍK, B. *Optimální orientace a sklon fotovoltaických panelů*. [online], poslední úprava 23. června 2014 [cit. 2024-01-15]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/114865-optimalni-orientace-a-sklon-fotovoltaickych-panelu>.
- [14] U.S. Energy Information Administration: *Solar explained*. [online], poslední úpravy 26. května 2023 [citováno 30. ledna 2024]. Dostupné z: <https://www.eia.gov/energyexplained/solar/photovoltaics-and-electricity.php>
- [15] YILDIRIM, Mehmet Ali. *Maximum Power Point Tracking Techniques For Solar Photovoltaic Applications*. [online]. Thesis. Cracow: Cracow University of Technology, 2020. [cit. 2024-02-16]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/342845925_MAXIMUM_POWER_POINT_TRACKING_TECHNIQUES_FOR_SOLAR_PHOTOVOLTAIC_APPLICATIONS#pf14
- [16] SVARC, Jason. Clean Energy Reviews. *Solar Panel Construction*. [online], poslední úprava 2. února 2022 [cit. 2024-02-16]. Dostupné z: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/solar-panel-components-construction>
- [17] *Solar Power Secrets*. [online], poslední úprava 27. února 2021. [cit. 2024-03-02]. Dostupné z: <https://solarpanelsvenue.com/mixing-solar-panels/>
- [18] LUQUE, Antonio a HEGEDUS, Steven. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. [online] New Jersey: Wiley. 2003. s. 784–787. [cit. 2024-02-20]. ISBN 0-471-49196-9. Dostupné z: <https://kashanu.ac.ir/Files/Content/Handbook.pdf>
- [19] VEGA – GARITA, Victor, HNIF, Ali a spol. Selecting a suitable battery technology for the photovoltaic battery integrated module. [online]. *Journal of Power Sources*. 2019. Vol. 438. [cit. 2024-01-30]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775319310043#sec2>
- [20] SPERTINO, Filippo, CIOCIA, Alessandro a spol. A Smart Battery Management System for Photovoltaic Plants in Households Based on Raw Production Forecast [online]. In *Green Energy Advances*. [cit. 2024-03-05]. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/chapters/63225>
- [21] OSARETIN, Charles Aimiwu a EDEKO, F. O. Design and Implementation of a Solar Charge Controller With Variable Output. [online]. *Journal of Electrical and Electronic Engineering*. 2016. Volume 2. s. 40–52. [cit. 2024-02-16]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/303683238_DESIGN_AND_IMPLEMENTATION_OF_A_SOLAR_CHARGE_CONTROLLER_WITH_VARIABLE_OUTPUT
- [22] ZILVAR, Jiří. *Strídače pro domácí fotovoltaiku I. – funkce a parametry*. [online], poslední úpravy 28. listopadu 2022 [cit. 2024-02-20]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/24668-stridace-pro-domaci-fotovoltaiku-i-funkce-a-parametry>

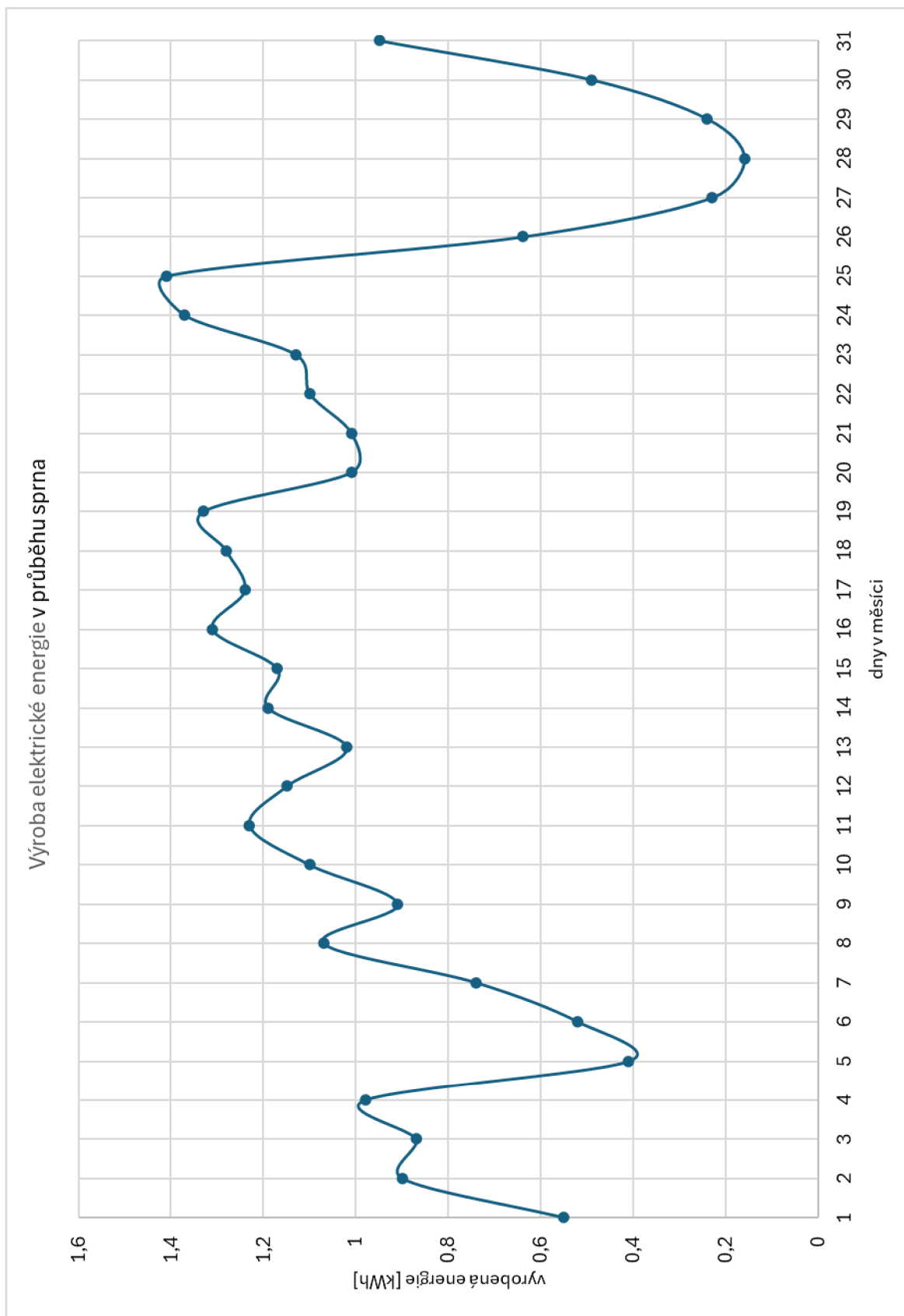
- [23] ASOWATA, Osamede, SWART, Arthur, PIENAAR, H.C., SCHOEMAN, Ruaan. *Optimizing The Output Power of a Stationary PV panel*. [online]. 2013. [cit. 2024-03-15]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/258148774_Optimizing_the_output_power_of_a_stationary_PV_panel
- [24] Evropská komise. PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System). Version 5. [cit. 2024-03-01]. Dostupné z: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis/getting-started-pvgis/pvgis-user-manual_en#ref-1introduction
- [25] Český hydrometeorologický ústav. Září 2023 na území ČR [tisková zpráva]. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2023. [cit. 2024-03-10]. Dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/tiskove_zpravy/2023/TZ_zari_2023.pdf
- [26] SCHOLTZ, Louise, et al. *Renewable Energy: Facts and Futures The Energy Future We Want*. [online]. Cape Town, 2017. [cit. 2024-02-25]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/319505523_Renewable_Energy_Facts_and_Futures_The_energy_future_we_want/figures
- [27] MURDEN, Dave. *A Comprehensive Guide To Lifepo4 Batteries Specific Energy*. 2023. [online], poslední úprava 24. dubna 2023 [cit. 2024-03-08]. Dostupné z: <https://ecotreelithium.co.uk/news/lithium-iron-phosphate-battery-specific-energy/>
- [28] Spotřeba počítače a notebooku: Tipy, jak ušetřit. [online blog]. Provident, [online], poslední úprava 8. listopadu 2022 [cit. 2024-03-15]. Dostupné z: <https://www.provident.cz/blogs/spotreba-pocitace-a-notebooku>
- [29] Vývoj ceny elektřiny [online]. [citováno 21. března 2024]. <https://www.kurzy.cz/komodity/cena-elektřiny-graf-vyvoje-ceny/1kWh-czk-3-mesice>

7 Přílohy

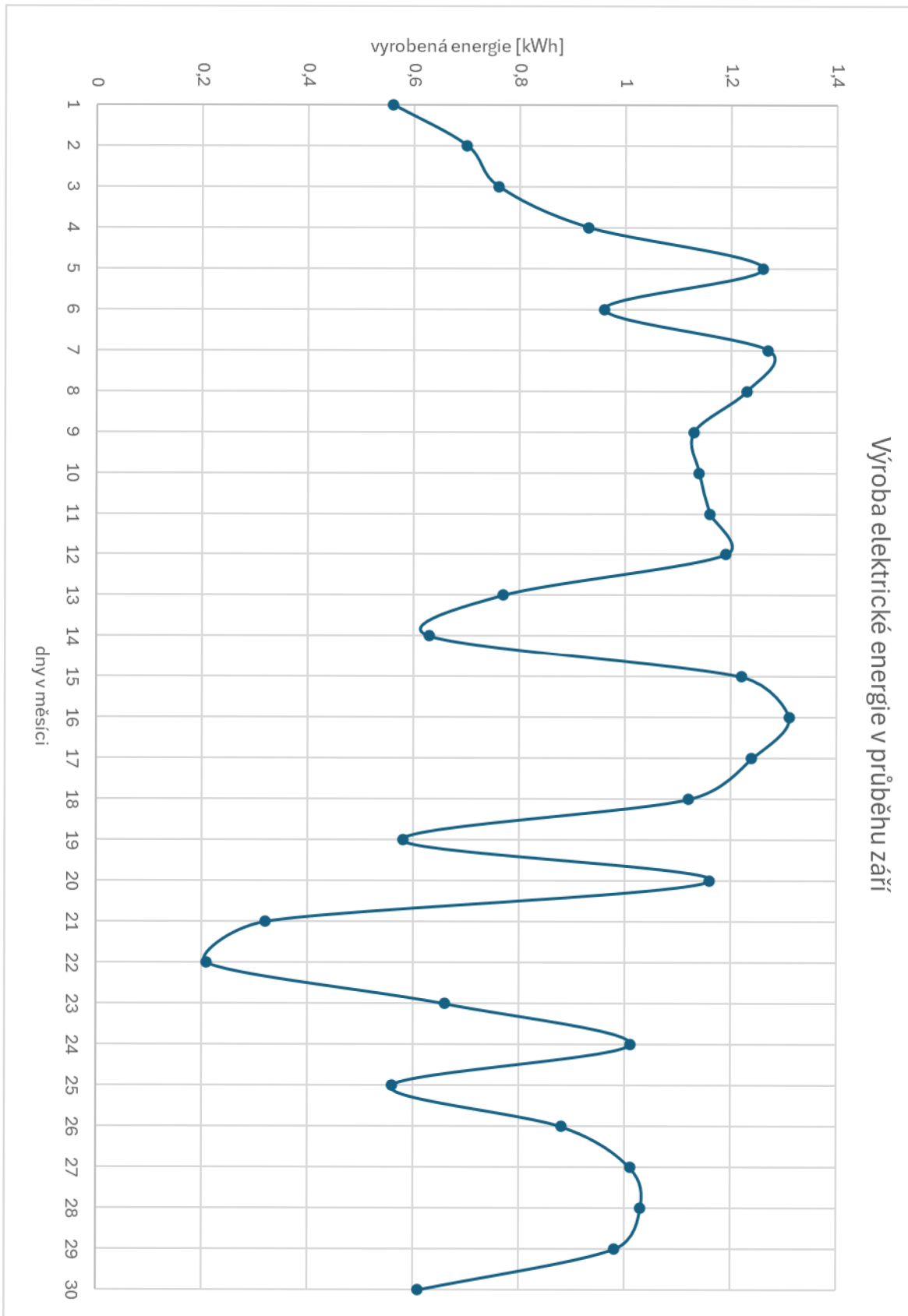
Příloha 1: Kolik energie bylo vyrobeno denně v průběhu července



Příloha 2: Kolik energie bylo vyrobeno denně v průběhu srpna



Příloha 3: Kolik energie bylo vyrobeno denně v průběhu září



Příloha 4: Kolik energie bylo vyrobeno denně v průběhu října

