

Fakulta elektrotechnická

Katedra materiálů a technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Technologie přeměny energie s ohledem na využití obnovitelných
zdrojů a celkovou bilanci

Autor práce: **Bc. Vojtěch Mészáros**

Vedoucí práce: prof. Ing. Pavel Trnka, Ph.D., MBA

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Vojtěch MÉSZÁROS**
Osobní číslo: **E22N0010P**
Studijní program: **N0713A060011 Materiály a technologie pro elektrotechniku**
Téma práce: **Technologie přeměny energie s ohledem na využití obnovitelných zdrojů a celkovou bilanci**
Zadávající katedra: **Katedra materiálů a technologií**

Zásady pro vypracování

1. Popište principy získávání elektrické energie.
2. Popište nové energetické zdroje vhodné pro budoucnost s ohledem na vznikající legislativu.
3. Popište použité technologie a zhodnoťte dopady na životní prostředí.
4. Určete možné výkony, účinnosti a cenovou bilanci ve srovnání se stávajícími zdroje elektrické energie.
5. Zhodnoťte celkové dopady na životní prostředí.

Rozsah diplomové práce: **40-60**
Rozsah grafických prací: **4**
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**


Seznam doporučené literatury:

1. Elektronické informační zdroje.
2. Materiály MPO.
3. Materiály MŽP.

Vedoucí diplomové práce: **Prof. Ing. Pavel Trnka, Ph.D.**
Katedra materiálů a technologií

Datum zadání diplomové práce: **7. října 2022**
Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2024**




L.S.

Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Prof. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 6. října 2023

Abstract

Předkládaná práce je zaměřena na technologie fotovoltaické elektrárny. Nejprve jsou popsány fyzikální jevy související s fotovoltaickými články, typy fotovoltaických panelů, možnosti zapojení FVE, druhy baterií a princip fotovoltaických střídačů. Dále byla zpracována ekologická analýza enviromentálních dopadů fotovoltaických panelů na životní prostředí pomocí metody Life cycle assesment. Poslední část se věnovala ekonomickému zhodnocení uvažované fotovoltaické elektrárny o výkonu 192,5 kWp na střeše společnosti CICM s.r.o.

Klíčová slova

Obnovitelné zdroje energie, fotovoltaika, fotovoltaická elektrárna, Fotovoltaický článek ekologické hodnocení, ekonomické hodnocení

Abstract

The presented work is focused on the technologies of photovoltaic power plants. First, physical phenomena related to photovoltaic panels, types of photovoltaic panels, PVE connection options, types of batteries and the principle of photovoltaic inverters are described. Furthermore, an ecological analysis of the environmental impacts of photovoltaic panels on the environment was processed using the Life cycle assessment method. The last part was devoted to the economic evaluation of the considered photovoltaic power plant with an output of 192.5 kWp on the roof of CICM s.r.o.

Key Words

Renewable energy sources, photovoltaics, photovoltaic power plant, photovoltaic cell environmental evaluation, economic evaluation

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce, panu prof. Ing. Pavlovi Trnkovi, Ph.D., MBA za jeho cenné rady.

Obsah

Seznam symbolů a zkratk	4
Úvod.....	6
1 Princip fotovoltaického článku.....	8
1.1 P-N přechod.....	8
1.2 Fotoelektrický jev	9
1.3 Fotovoltaický článek	9
2 Výroba fotovoltaického článku	11
2.1 Czochralského metoda.....	11
2.2 Výroba polykrystalického ingotu	13
2.3 Výroba desek z ingotu monokrystalického křemíku	13
2.3.1 Broušení.....	13
2.3.2 Řezání křemíkových desek	13
2.3.3 Čištění křemíkových desek.....	14
2.3.4 Texturace	14
2.3.5 Difúze.....	14
2.3.6 Antireflexní vrstva	15
2.3.7 Kontaktování.....	15
3 Druhy fotovoltaických článků	17
3.1 Monokrystalický článek	17
3.2 Polykrystalické články.....	17
3.3 Tenkovrstvé články.....	18
3.3.1 Telurid kadmia (CdTe)	18
3.3.2 Amorfni křemík (a-Si)	18
3.3.3 Měď Indium Galium Selenid (CIGS)	19
3.3.4 Perovskitový článek	19

4	Fotovoltaický panel	21
4.1	Orientace a sklon fotovoltaických panelů	21
4.2	Fotovoltaický střídač	22
5	Baterie.....	25
5.1	Lithium-polymerové baterie (Li-Pol)	25
5.2	Lithium-nikl-mangan-kobalt oxid (NMC).....	26
5.3	Lithium-železo-fosfátové akumulátory (LiFePO ₄).....	26
6	Topologie zapojení fotovoltaických elektráren	28
6.1	Off-grid systém.....	28
6.2	On-grid systém	28
6.3	Hybridní systém.....	29
7	Life cycle assesment.....	30
7.1	Doba energetické návratnosti panelů.....	30
7.1.1	Definice.....	30
7.2	Návratnost energetické investice FV panelů	31
7.2.1	Definice.....	31
7.3	Výpočet spotřeby energie FV panelu	31
7.4	Uhlíková stopa.....	33
7.4.1	Definice.....	33
7.5	Doba uhlíkové návratnosti panelů	33
7.5.1	Definice.....	33
7.6	Výpočet množství vyprodukovaného CO ₂	33
7.7	Výběr fotovoltaických panelů	35
7.8	Množství energie slunečního záření dopadající na FV panely	36
7.9	Produkce elektrické energie fotovoltaickými panely	37
7.10	Chronologický postup výpočtu LCA.....	39

7.11	Výsledky life cycle assesment.....	40
7.11.1	Citlivostní analýza life cycle assesment	43
8	Ekonomické vyhodnocení	45
8.1	Případová studie	45
8.2	Spotřeba elektrické energie uvažovaného objektu	47
8.3	Cena elektrické energie	49
8.4	Množství vyprodukované elektrické energie.....	51
8.5	Výpočet cenové bilance.....	51
8.6	Čistá současná hodnota.....	51
8.7	Chronologický postup ekonomické analýzy případové studie	53
8.8	Výsledky ekonomického hodnocení.....	54
	Závěr	58
	Seznam obrázků.....	60
	Seznam tabulek	63
	Seznam literatury a informačních zdrojů.....	64
	Přílohy.....	I

Seznam symbolů a zkratek

AC	alternating current, střídavý proud	
a-Si	amorfní křemík	
CaTiO ₃	minerál oxidu vápenatého a titanu	
CO ₂	oxid uhličitý	
CdTe	kadmium-telurid	
CIGS	měď-indium-galium-diselenid	
DC	direct current, stejnosměrný proud	
EVA	ethylene-vinyl acetate	
FV	fotovoltaický, -á, -é	
FVE	fotovoltaické elektrárna	
FVS	fotovoltaický systém	
LiFePO ₄	fosforečnan lithno-železitý	
Li-pol	Lithium-polymer	
NMC	lithium-nikl-mangan-kobalt oxid	
Si	křemík	
PMMA	polymethylmethakrylát	
PEG	polyethylenglykol	
PSG	fosforo-silikátové sklo	
PVGIS	photovoltaic geographical information system	
PWM	pulse width modulation, pulzně šířková modulace	
CF	carbon footprint, uhlíková stopa	(-)
CF _t	peněžní tok	(Kč)
CPBT	carbon payback time, doba uhlíkové návratnosti	(rok)

E_{FV}	elektrická energie fotovoltaických panelů	(kWh)
E_{emb}	celková energetická náročnost FV panelu	(kWh)
E_P	energie potřebná k získání čistého křemíkového ingotu	(kWh)
E_S	energie potřebná k získání křemíkových waferů	(kWh)
E_{pro}	energie potřebná k sestavení FV panelu	(kWh)
E_R	energie potřebná k produkci hliníkového rámu panelu	(kWh)
E_{BOS}	energie použita při výrobě a montáži nosných systémů	(kWh)
$E_{FV/rok}$	roční produkce energie FV panelu	(kWh)
EF	emisní faktor	(gCO ₂ /kWh)
$EPBT$	energy payback time, doba energetické návratnosti	(rok)
$EROI$	return on investment, Návratnost energetické investice	(-)
G_{ref}	referenční sluneční ozáření	(kWh/m ²)
IK	investiční kapitál	(Kč)
k	teplotní koeficient	(K.m ² /W)
NPV	net present value	(Kč)
P_{pk}	maximální výkon panelů	(kWp)
Q_S	skutečné množství dopadající energie	(Wh/m ²)
r	diskontní úroková míra	(-)
t_{FV}	teplota fotovoltaického článku	(° C)
t_{ref}	referenční teplota článku	(° C)
t_V	teplota vzduchu	(° C)
γ	teplotní součinitel	(%/K)
η_{FV}	účinnost fotovoltaických panelů	(%)
η_{ref}	referenční účinnost fotovoltaických panelů	(%)

Úvod

Obnovitelné zdroje elektřiny (OZE) se stávají klíčovým prvkem v boji proti změně klimatu a zajišťování energetické soběstačnosti. Konvenční způsoby produkce energie zejména z fosilních paliv (uhlí, ropa nebo zemní plyn) sebou přináší řadu problému. Spalování uhlí, ropy nebo zemního plynu totiž způsobuje znečištění ovzduší toxickými plyny. Problematický může být také oxid uhličitý, který má nejspíše přímý negativní účinek na globální klima [1]. Naopak obnovitelné zdroje, při produkci elektřiny nezpůsobují žádné emise nežádoucích toxických látek. Členské státy Evropské unie tak vydaly v platnost směrnici o obnovitelných zdrojích energie, která stanovuje, že jednotlivé státy EU mají mít do roku 2030 až 42,5 % podíl obnovitelných zdrojů elektrické energie z celkového energetického mixu daného státu [2].

Mezi obnovitelné zdroje elektrické energie patří vodní, větrné, geotermální nebo solární elektrárny. Vzhledem k omezenému rozsahu diplomové práce a značné komplexnosti problematiky jednotlivých druhů OZE bude tato práce zaměřena pouze na jeden typ obnovitelného zdroje energie. Práce se tak bude zaměřovat pouze na princip fotovoltaické technologie. Na téma alternativních obnovitelných zdrojů energie existuje spousta odborné literatury. Tato literatura [3] poskytuje základní koncept principu přeměny větrné energie na elektrickou a pojednává o otázkách integrace a stability sítě, metodách zvýšení přechodné stability a minimalizaci kolísání výkonu systémů větrných generátorů. Tato práce [4] potom analyzuje větrné elektrárny z hlediska restriktivních, ekonomických a ekologických aspektů. V případě vodních elektráren tento článek [5] shrnuje aktuální výzkumné a vývojové aktivity v oblasti hydroenergetických technologií a zahrnuje vznikající a pokročilé technologie ke zmírnění nestability proudění. V této publikaci [6] je možné se dočíst o enviromentálních dopadech na životní prostředí ve formě případové studie, která se zaměřuje na vliv malých vodních elektráren na ryby v pramenných tocích Karpat. Technologii geotermální energie potom popisuje tato práce [7]. Tento článek [8] potom představuje přehled celosvětových aplikací geotermální energie pro přímé využití a aktualizuje předchozí průzkum provedený v roce 2015.

Překládaná diplomová práce je rozdělena do tří částí. První, teoretická, část se zaměřuje na popis principu funkce fotovoltaické technologie a s tím spojené fyzikální jevy (P-N přechod, fotoelektrický jev). Dále jsou zde uvedeny základní informace o nejznámějších typech fotovoltaických článků, jejich vlastnostech a způsobech zapojení. V první části je také popsán způsob výroby monokrystalických a polykrystalických článků.

Druhá část se potom věnuje ekologickému zhodnocení technologie fotovoltaických článků. Bude zde představena metoda posuzování enviromentálních dopadu na životní prostředí, tzv. Life cycle assessment. V rámci této metody budou představeni a vyhodnoceni čtyři ekologičtí ukazatelé. Mezi tyto ukazatele patří doba energetické návratnosti, návratnost energetické investice, uhlíková stopa a doba uhlíkové návratnosti.

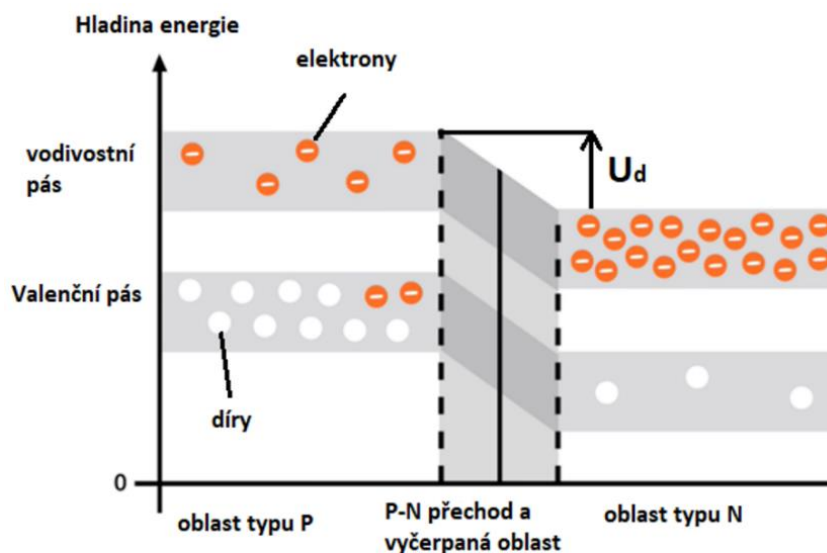
Třetí část se zabývá ekonomickým hodnocením uvažované fotovoltaické elektrárny na budovu společnosti CICM s.r.o. Pro určení výhodnosti této elektrárny budou stanoveny vstupní parametry, které ovlivňují výši finančních toků plynoucí z úspory finančních prostředků za elektřinu. Mezi tyto vstupní parametry patří například počáteční investice do fotovoltaické elektrárny, cena elektrické energie v rámci celkové životnosti elektrárny, stanovení spotřeby uvažovaného objektu nebo výpočet produkce elektrické energie uvažovanými panely.

1 Princip fotovoltaického článku

V následující kapitole bude popsán princip funkce přeměny energie slunečního záření na elektrickou energii pomocí fotovoltaického článku a s tím spojené fyzikální jevy (P-N přechod a fotoelektrický jev).

1.1 P-N přechod

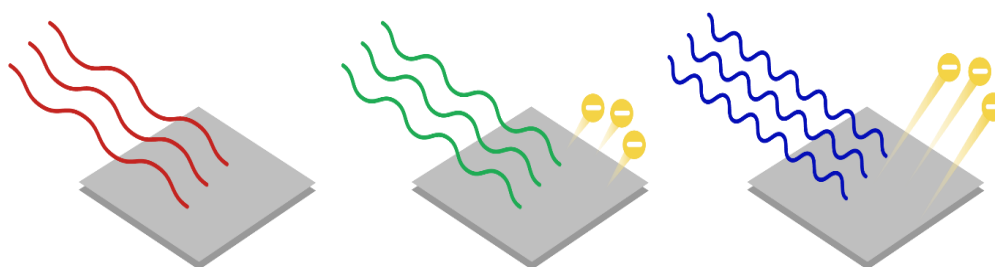
P-N přechod vzniká, když se spojí polovodič typu P a typu N, které mají různou koncentraci nosičů náboje. Na jedné straně je polovodič typu P, kde majoritními nosiči elektrického náboje jsou elektrony, na druhé straně je polovodič typu N, kde majoritními nosiči jsou díry (fiktivní náboj). Ihned po vytvoření P-N přechodu se začnou difundovat díry z polovodiče typu P do polovodiče typu N a elektrony z polovodiče typu N do polovodiče typu P. Když se majoritní nosiče jednoho typu dostanou do prostředí s majoritními nosiči opačného typu, začnou rekombinovat, což znamená, že elektron přechází na nižší energetickou hladinu a spojí se s dírou. To vytváří vyčerpanou oblast na rozhraní dvou polovodičů, kde se téměř nevyskytují žádné volné nosiče náboje. Šířka této oblasti závisí na koncentraci donorů a akceptorů v příměsi. Důležitým parametrem je tzv. difuzní napětí, které udává, jak velké napětí je potřeba připojit na P-N přechod v propustném směru, aby se vodivostní pásy obou polovodičů vyrovnaly a začal procházet proud. [10]



Obr. 1: PN přechod, převzato z [10]

1.2 Fotoelektrický jev

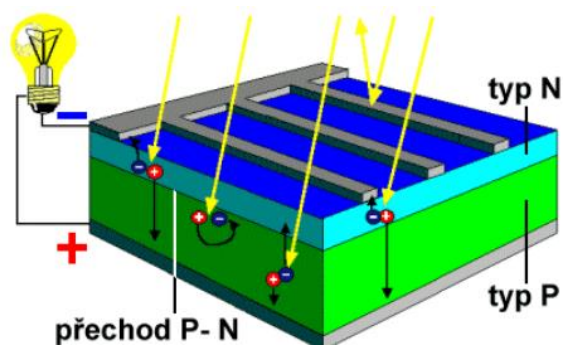
Jde o fyzikální jev objevený Albertem Einsteinem, při kterém se elektrony dokážou uvolňovat z obalu atomu a následně se z dané látky díky absorpci elektromagnetického záření látky mohou vyzařovat. Tyto elektrony se nazývají též fotoelektrony. Z hlediska jejich chování a vlastností se fotoelektrony neliší od jiných elektronů. Předpona foto-je označení toho, že elektrony byly vyraženy ze své pevné vazby dopadajícím světlem. Fotoelektrony se mohou uvolnit na povrchu látky (vnější fotoelektrický jev) nebo zůstat uvnitř látky jako volné elektrony a zvyšovat tak její elektrickou vodivost (vnitřní fotoelektrický jev). Fotovoltaické články pro svou funkci využívají vnitřního fotoelektrického jevu. [10], [11]



Obr. 2: Princip fotoelektrického jevu [11]

1.3 Fotovoltaický článek

Fotovoltaický článek je v podstatě polovodičová dioda, která využívá fotoelektrického jevu k produkci elektrické energie. Je složen z polovodičového P-N přechodu, přičemž horní strana je typu N a spodní vrstva je polovodič typu P. Na obou stranách článku se dále nacházejí kovové elektrody, které zde zastupují funkci kontaktů. Horní vrstva má kontakt ve tvaru tenké mřížky, díky čemuž může na fotovoltaický článek dopadat vyšší množství elektromagnetického záření. Pokud dopadne sluneční záření na fotovoltaický článek, fotonová energie dokáže uvolnit záporně nabitě elektrony z jejich vazeb v atomové mřížce, přičemž fotony jsou absorbovány. Volné elektrony opouštějí svá původní místa a zanechávají za sebou kladně nabitě díry. Elektrony přecházejí k vrchní elektrodě a díry ke spodní. Tento proces umožňuje vznik rozdílu potenciálů, což znamená vznik stejnosměrného napětí. Fotovoltaický článek čelí různým druhům ztrát, které významně ovlivňují jejich celkovou účinnost. Mezi nejvýznamnější ztráty patří ztráty vlivem rekombinace nosičů náboje. Dále jsou to tepelné ztráty vzniklé průchodem proudu. Účinnost se dále snižuje vlivem odrazu dopadajícího slunečního záření od plochy článku nebo zastínění článku předními kontakty. Největší podíl na snížené účinnosti článku má však nedostatečná energie fotonů dlouhovlnného záření a poté příliš velká energie fotonů krátkovlnného záření. [10], [12]



Obr. 3: Fotovoltaický článěk [12]

2 Výroba fotovoltaického článku

Základním prvkem pro výrobu fotovoltaických panelů je křemík. Standardní polykrystalický křemík se získává z přírodního křemene pomocí procesu zonální rafinace v elektrické obloukové peci, přičemž dosažená čistota hutného křemíku se pohybuje přibližně v rozmezí 97–99 %. Pro výrobu fotovoltaických panelů se však vyžaduje mnohem vyšší čistota vstupního materiálu, na úrovni ppb (part per bilion) a vyšší. Tuto vysokou čistotu materiálu lze často dosáhnout pomocí tzv. Siemensova postupu, kde probíhá chemická reakce chlorovodíku s hutným polykrystalickým křemíkem ve fluidním reaktoru, což vede k vytvoření těkavého trichlorsilanu. Následně se trichlorsilan vede přes vrstvu čistého křemíku, kde dochází k jeho rozkladu a následné kontrolované krystalizaci na zárodečném jádře. Čistota takto získaného polykrystalického křemíku může dosahovat hodnot na úrovni ppt (part per trilion). [13]

2.1 Czochralského metoda

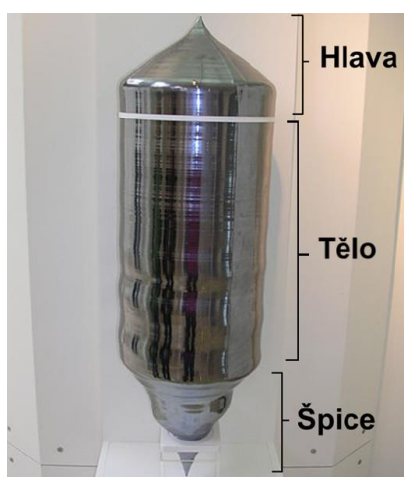
Czochralského metoda představuje techniku krystalického růstu využívanou mimo jiné pro výrobu monokrystalických fotovoltaických článků. Tato metoda odvozuje svůj název od polského vědce Jana Czochralského, který ji objevil v roce 1915 při zkoumání rychlosti krystalizace kovů. [13]

Na začátku procesu je vstupní materiál (v případě výroby fotovoltaických článků se jedná o kusy polykrystalického křemíku o rozměrech 5 až 10 cm) umístěn do válcově tvarovaného kelímku. Pokud jsou podmínky uvnitř nádoby vhodné, zahájí se tavení připravené vsádky, které probíhá v řádu hodin. Teplota uvnitř nádoby při tavení dosahuje 1425 °C. Po roztavení vsádky probíhá proces stabilizace, jehož účelem je udržet stabilní proudění a teplotu taveniny. [13], [14]

V dalším kroku nastává legování. Jedná se o proces, při kterém se do taveniny přidává určitý typ dopantu (tzv. legura). Druh a množství tohoto dopantu potom ovlivňuje výsledné parametry krystalu v závislosti na tom, zda je vyžadován polovodič typu P nebo typu N. Legování může probíhat dvěma způsoby. Pokud má použitý dopant má vyšší sublimační teplotu, než je teplota tavení vsádky, může se legura vkládat přímo do vsádky. Nehrozí tak odpaření legury předtím, než se roztaví samotná vsádka. V opačném případě existuje hrozba předčasného odpaření. Využívá se proto tzv. legovacích ampulí, vyrobených z velmi čistého křemenného skla. Přesně definované množství a specifický druh legury se vloží do legovací

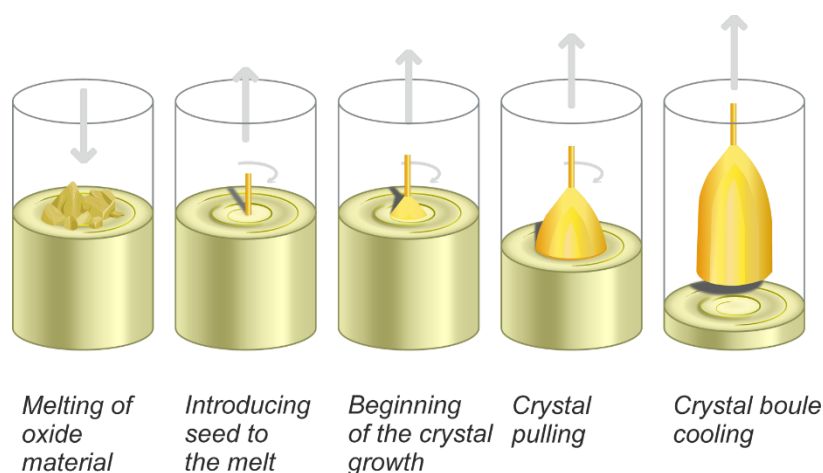
ampule. Po úplném roztavení vsádky se tato ampule rozpustí do taveniny, která ji absorbuje. [13]

Následuje klíčová fáze tažení monokrystalu. Pro tento proces je nezbytný monokrystalický zárodek s přesnou krystalografickou orientací, který má průměr přibližně 10 mm. Zárodek je spuštěn do taveniny pomocí lanka, což způsobuje, že tavenina krystalizuje na jeho konci. Během krystalizace se zárodek, na kterém vznikají nové krystaly otáčí. Jakmile je krystal dostatečně velký, začne se pomalu vytahovat z taveniny. Postupné vytahování vytváří kontinuální monokrystalickou strukturu. Rychlost vytahování je pečlivě kontrolována, za účelem dosažení požadované velikosti a kvality krystalu. Výsledný monokrystal je následně chlazen, aby se upevnila jeho struktura. Po úspěšném růstu krystalu je vytaženo přibližně 90 % materiálu z původní vsádky, zatímco zbytek zůstává na dně křemenného kelímku a není dále využitelný. [13]



Obr. 4: Monokrystal s hlavou, tělem a špicí vyroben Czchoralskiho metodou, převzato z [15]

Výsledný rozměr monokrystalů závisí na hmotnosti vsádky a velikosti topné zóny, ze které je krystal tažen. Standardní požadované průměry leštěných křemíkových desek (waferů) jsou obvykle 200 a 300 mm. Délka krystalu se obvykle pohybuje v rozmezí jednoho až dvou metrů, přičemž hmotnost krystalu může dosahovat až stovek kilogramů. [14], [16]



Obr. 5: princip Czchoralskiho metody [17]

2.2 Výroba polykrystalického ingotu

Výroba polykrystalických ingotů je o něco jednodušší a energeticky méně náročná. Materiál se roztaví a nalije do krychlové formy, ve které se následně nechá definovanou rychlostí chladnout. Proces chladnutí musí být pozvolný a řízený pomocí indukčního ohřevu, aby se vytvořila co největší monokrystalická zrna a aby v materiálu byl minimální počet dislokací, pnutí atd. Před samotným chladnutím ještě nastává proces legování za účelem vytvoření polovodiče typu P nebo N podobně jako u monokrystalického článku. Tento proces byl podrobněji popsán v kapitole 2.1.

2.3 Výroba desek z ingotu monokrystalického křemíku

V následující podkapitole bude popsán podrobný postup výroby a dalších uprav desek z ingotu jak monokrystalického, tak i polykrystalického křemíku. Všechny procesy s výjimkou broušení (které probíhá pouze u monokrystalu) jsou shodné pro oba typy křemíku. [18]

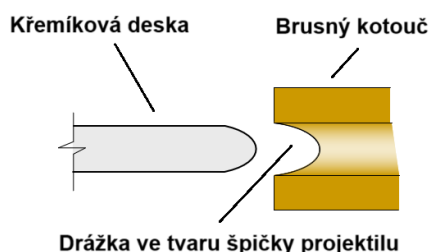
2.3.1 Broušení

Výsledný křemíkový ingot je rozřezán na několik částí. Hlava i špice monokrystalu se odřeže od zbytku těla, protože nedosahuje potřebných kvalit pro další zpracování. Vnější obvod monokrystalického ingotu je potom zbroušen za účelem sjednocení rozměrů po celé délce výsledného monokrystalu. [13]

2.3.2 Řezání křemíkových desek

Výroba křemíkových desek začíná touto operací. Pro řezání se obvykle používají kotoučové pily s vnitřním borem nebo drátové pily. Oba typy pil využívají diamantové částice k provedení řezu, přičemž místo řezu je chlazeno a oplachováno vodou s detergentem. Tím se zvyšuje

výtěžnost a minimalizuje narušení povrchu desek. Křemíkové válce se řezou na plátky silné přibližně 0,1 až 0,35 mm. Po provedení řezu jsou hrany nařezaných desek zaobleny do tvaru špičky projektilu brusným kotoučem s drážkou, což předchází štípání hran a zvyšuje mechanickou pevnost desek. [19]



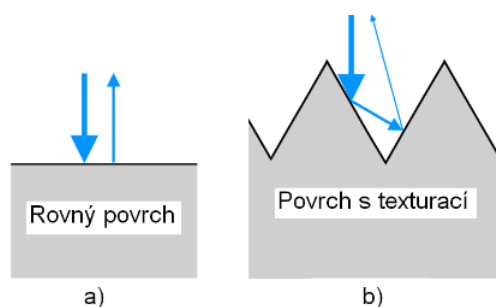
Obr. 6: Princip broušení hrany křemíkové desky, převzato z [19]

2.3.3 Čištění křemíkových desek

Křemíkové desky jsou po nařezání plně škrábanců a různých nečistot, což je nežádoucí stav pro další zpracování desek. Je tak nezbytně nutné zajistit, aby byly všechny desky hladké a povrch byl bez jakýchkoliv vad a nečistot. K tomu se využívají procesy lapování, leptání, leštění, chemické čištění, a nakonec finální mechanické čištění. [19]

2.3.4 Texturace

Texturace povrchu se používá s cílem snížit odraz dopadajícího slunečního záření, což přispívá ke zlepšení celkové účinnosti fotovoltaického panelu. Obr. 7 ilustruje princip fungování textury. Když sluneční paprsek dopadne na rozhraní vzduch-křemík, část z něj je absorbována a část odražena. U povrchu upraveného texturací existuje větší pravděpodobnost, že zbylá část paprsku se neodrazí do volného prostoru, ale spíše se opět odrazí na povrch křemíku, kde může být znovu absorbována. [18]



Obr. 7: Schematické znázornění účinnosti zachycení záření u rovného povrchu (a) a u povrchu s texturou (b) [18]

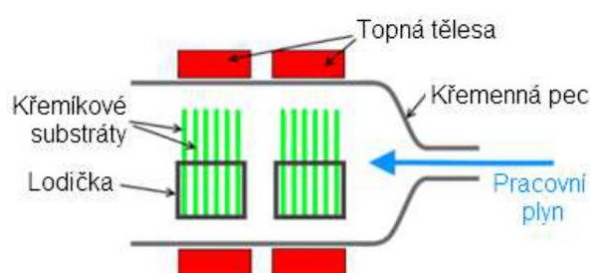
2.3.5 Difúze

Vytváření tenké vrstvy s opačnou vodivostí (často N typu na P typovém substrátu) probíhá vysokoteplotní difúzí, kde se částice přesunují z oblasti s vyšší koncentrací do oblasti s nižší

koncentrací. Umístění P-typového substrátu do prostředí s vysokou koncentrací pětimocných atomů, zejména fosforu, způsobí jejich difúzi do materiálu. Vytvoření vrstvy P typu se dosahuje difúzí boru. Difúze atomů obvykle probíhá z plynné fáze. [18]

Při difúzi z plynné fáze rozlišujeme předdifúzi a rozdifundování. Při předdifúzi je reaktor naplněn zdrojovým plynem, chemická reakce produkuje dopant v atomární formě a tyto atomy se difundují do substrátu. Při rozdifundování již nedochází k nasycení zdrojovým plynem a příměs v povrchové vrstvě může difundovat do substrátu. [18]

Difúze fosforu z plynné fáze se často provádí při teplotách mezi 800 °C až 1100 °C, kdy je do prostředí s waferem přiváděn plyn obsahující fosfor, obvykle trichlorid fosforu (POCl_3). Předdifúze zahrnuje reakci s kyslíkem, vytvářející fosforo-silikátové sklo (PSG), následovaným rozdifundováním pro vytvoření požadovaného přechodu v substrátu. Tím vzniká vrstva opačné vodivosti s tloušťkou 500 nm na substrátu. [18]



Obr. 8: Křemíková pec pro difúzi [16]

2.3.6 Antireflexní vrstva

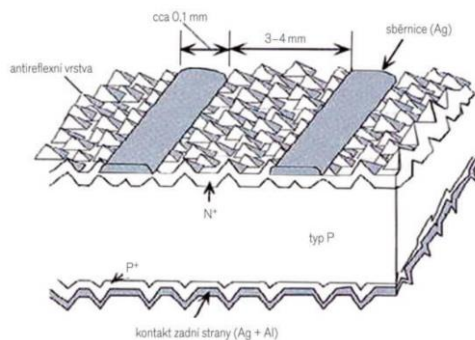
Antireflexní vrstva z nevodivého nitridu křemíku slouží k omezení odrazivosti povrchu, podobně jako postup texturování. Tato vrstva rovněž poskytuje ochranu povrchu před mechanickým poškozením. S tloušťkou přibližně 80 nm způsobuje modré zabarvení povrchu fotovoltaických článků. [20]

Nitrid křemíku se aplikuje pomocí chemické depozice z plynné fáze. Jde o proces, při němž chemické látky v plynné fázi reagují poblíž nebo přímo na ohřátém substrátu a vytvářejí na něm tzv. depozit v pevné formě. [18]

2.3.7 Kontaktování

Dalším důležitým procesem při výrobě fotovoltaických článků je kontaktování elektrod. Vodivé kontakty pro odběr elektrické energie z fotovoltaického článku se zhotovují nejčastěji sítotiskovou metodou, pomocí které se na povrch fotovoltaického článku nanáší vodivá pasta (nejčastěji Ag pasta). Na spodní neosvětlené ploše se vytvoří hustá mřížka, sběrnice (kontakty)

na osvětlené části povrchu má podobu tenkých vodivých "prstů". Vysušením pasty a následným vypálením dochází k rozrušení antireflexní nitridové vrstvy a vytvořením ohmických kontaktů. Tím je zhotoven kompletní fotovoltaický článek. [21]

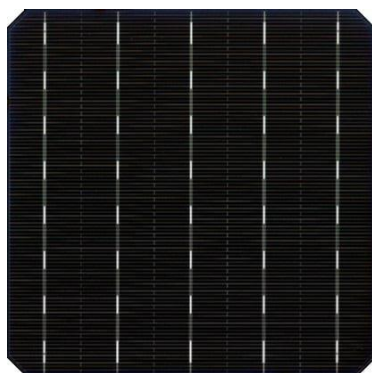


Obr. 9: struktura fotovoltaického článku [18]

3 Druhy fotovoltaických článků

3.1 Monokrystalický článek

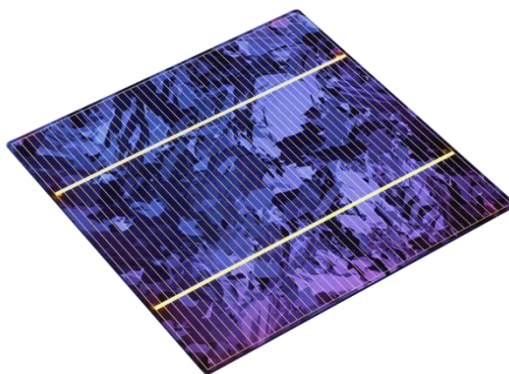
Monokrystalické články jsou složeny z jednoho krystalového ingotu, který je upraven na požadovaný rozměr článku. Tento typ článku je energeticky a finančně náročnější než články polykrystalické. Výhodou je jednotná molekulární struktura křemíkového plátku, která je ideální pro přenos volných elektronů materiálem, což vede k vysoké účinnosti přeměny energie. Za laboratorních podmínek s pevně definovanými světelnými a teplotními faktory, je možné dosáhnout účinnosti těchto článků na hodnotu až 27 %. V reálných podmínkách se účinnost pohybuje v rozmezí 19 až 22 %. Životnost těchto článků je obvykle až 25 let. [10], [22], [23]



Obr. 10: Monokrystalický článek [24]

3.2 Polykrystalické články

Polykrystalický článek často označovaný jako multikrystalický článek je složen z mnoho krystalových ingotů křemíku. Molekulová struktura křemíku je složena z několika zrn krystalů, které mezi sebou utvářejí hranice (tzv. hranice zrn). Tento typ fotovoltaických článků je méně účinný než předchozí FV články založené na monokrystalu. To je dáno tím, že tyto hranice zrn omezují tok elektronů skrz ně tím, že podněcují záporně nabitě elektrony k rekombinaci s kladně nabitými dírami. V běžných provozních podmínkách se obvykle dosahuje účinnosti mezi 16 a 19 %, ale při optimálních podmínkách může být až 23 %. Polykrystalický křemík je výrobně jednodušší a levnější než monokrystalický. Životnost těchto článků se potom odhaduje na 25 let provozu. [22], [23]



Obr. 11: Polykrystalický článek [25]

3.3 Tenkovrstvé články

Dalším typem FV článků jsou tzv. tenkovrstvé fotovoltaické články. Ty byly původně vyvinuty pro vesmírné aplikace, neboť se mohou pyšnit lepším poměrem výkonu k jejich velikosti a hmotnosti než předchozí zmíněné typy. Vyrábí se za pomoci nástřiku, popř. tisku velmi tenké polovodičové vrstvy materiálu na podklad ze skleněné, kovové nebo plastové fólie. Díky tomu je výrobní proces mnohem rychlejší a méně nákladný. Ačkoli mají materiály použité v tenkovrstvé technologii vyšší absorpci světla než ekvivalentní krystalické materiály, trpí malou účinností (9-14 %) kvůli jejich nehomogenní krystalové struktuře. Životnost může dosahovat až 20 let. Mezi nejpoužívanější materiály patří telurid kadmia, amorfni křemík a selenid mědi a india neboli CIS. [22]

3.3.1 Telurid kadmia (CdTe)

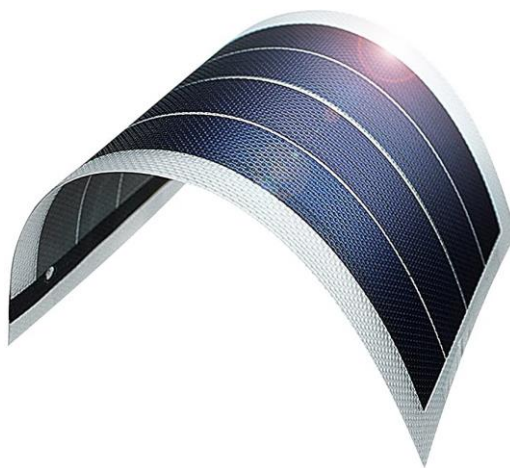
Jedná se o polovodičový materiál složený z kadmia a telluru. Tento materiál má vysokou úroveň absorpce světla, díky čemuž je možné snížit potřebné množství CdTe na minimum. I přesto, že je výroba levná a jednoduchá je zde jedna zásadní nevýhoda. Hlavní materiál kadmium je těžký a velice toxický kov, který při nesprávném zacházení může znečišťovat životní prostředí. Účinnost těchto článků je méně než 10 %. [22]

3.3.2 Amorfni křemík (a-Si)

Tato forma křemíku s amorfni strukturou může mít až 40krát vyšší absorpci světla než krystalický křemík. To má za následek potřebu nižšího množství křemíku při výrobě fotovoltaických článků, čímž se snižuje výsledná cena. Nicméně, jeho dvě hlavní nevýhody jsou nízká konverzní účinnost v rozmezí 7 až 9 % v počáteční fázi a degradace během několika měsíců vystavením slunečnímu záření, kdy účinnost klesne pod 5 %. [22]

3.3.3 Měď Indium Galium Selenid (CIGS)

Jedná se v podstatě o polykrystalický tenký filmový materiál typu P založený na polovodičovém materiálu selenidu mědi, india (CIS) a malého množství Galia (Ga). Tím vzniká fotovoltaický článek s účinností kolem 12-14 %. Tento výsledek je dosažen tím, že galium zvyšuje pásmovou mezeru článku a zlepšuje jeho vodivost. Tím je elektronům umožněno volně se pohybovat skrz článek k elektrodám. [22]

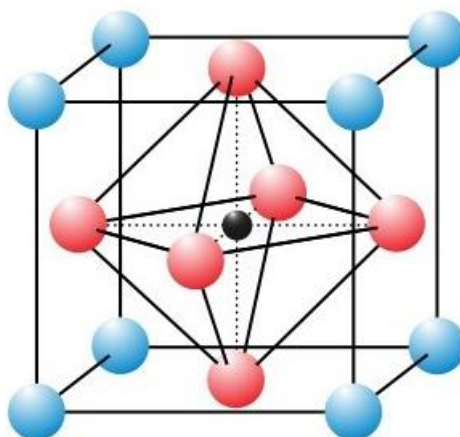


Obr. 12: Tenkovrstvý článek [26]

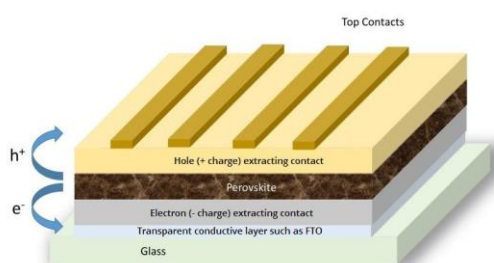
3.3.4 Perovskitový článek

Perovskitové solární články jsou novou třídou FV článků, které mají potenciál být levnější, efektivnější a snadněji vyráběné než tradiční křemíkové solární články. Tento typ článků využívá perovskitových materiálů jako aktivní vrstvy pro absorpci slunečního záření a generování elektrické energie. [27]

Perovskit je v podstatě jakýkoli materiál s krystalovou strukturou podle vzorce ABX_3 , který byl poprvé objeven u minerálu oxidu vápenatého a titanu ($CaTiO_3$). Tyto materiály mají vynikající optické a elektronické vlastnosti, což z nich dělá ideální materiál pro solární články. Perovskitové solární články mají vysokou účinnost přeměny solárního záření na elektrickou energii (aktuálně dosahuje účinnosti 29,8 % v laboratorních podmínkách) a mohou být vyráběny za relativně nízkou cenu pomocí jednoduchých procesů, jako je například tisk. [27]



Obr. 13: schéma krystalové struktury perovskitu [27]

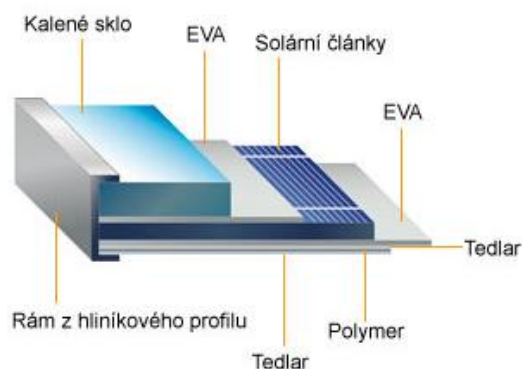


Obr. 14: Průřez perovskitového článku [27]

Studiem tohoto typu článku se zabývají odborníci z celého světa. Tyto studie [53], [54] se například zabývaly možnými způsoby výroby perovskitových článků, které by měli být jednodušší a levnější než proces výroby klasických článků na bázi křemíku. Problémem však bylo dosažení velice malé aktivní plochy vzhledem k účinnosti, která v nejlepším případě dosahovala hodnoty pouze $1,5 \text{ cm}^2$ při účinnosti 18 %. Jejich stabilita při působení vnějších vlivů (UV-záření, vysoké teploty, vlhkost, kyslík) je další překážkou bránící jejich komercializaci [55], [56]. Dalším problémem tohoto typu článku je jeho ekologická zátěž na životní prostředí, neboť perovskitový článek obsahuje olovo [57]. Nicméně existují studie zabývající se náhradou problematického olova za cín [58]. Bohužel účinnost tohoto článku nepřesáhla 6 %. V současné době však stále probíhají intenzivní výzkumy na vývoj a komercializaci tohoto typu článku.

4 Fotovoltaický panel

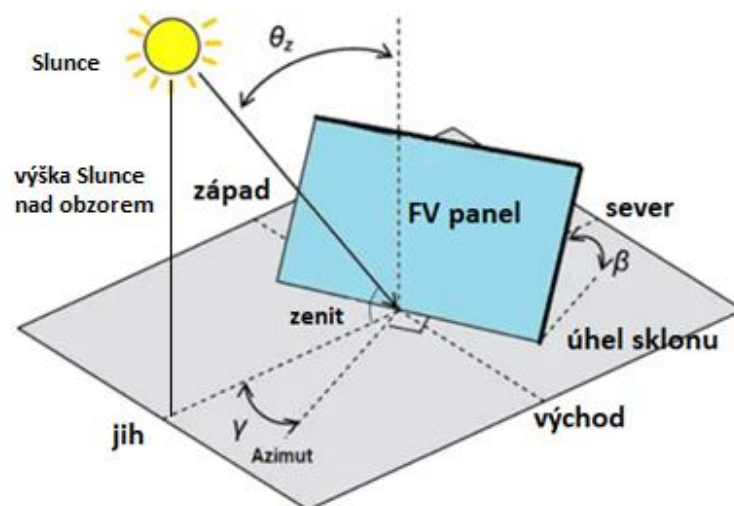
Fotovoltaický panel je konstruován z určitého množství fotovoltaických článků, které jsou inkorporovány do ochranného systému. Počet článků v panelu se typicky pohybuje v rozmezí 36 a 72 a jsou konfigurovány do sériových, paralelních či kombinovaných zapojení za účelem dosažení specifikovaného výkonu. Vzhledem k sensitivitě a fragilitě fotovoltaických článků je zásadní, aby byly chráněny prostřednictvím aplikace tvrzeného skla na vrchní straně a kompozitní vrstvy z polyesteru a Tedlaru na dolní straně. Panely jsou dále obaleny z obou stran vrstvou EVA (ethylvinylacetátu), což je materiál s vysokou propustností, zajišťující ochranu křehkých křemíkových článků před potenciálním poškozením sklem. Kompletovaný panel je následně umístěn do rámu z hliníkové slitiny, který je vybaven montážními otvory pro instalaci na předurčené lokace. Na zadní straně modulu se obvykle nachází spojovací box, který umožňuje vzájemné propojení jednotlivých modulů. Maximální výkon fotovoltaického modulu je specifikován v jednotkách Wp (watt-peak), což reprezentuje špičkový výkon fotovoltaického panelu, a může dosahovat hodnot v rozmezí přibližně 100 Wp až 560 Wp za optimálních podmínek. [10]



Obr. 15: složení solárního panelu [10]

4.1 Orientace a sklon fotovoltaických panelů

Pro jakoukoli fotovoltaickou elektrárnu je naprosto klíčové zohlednit orientaci a sklon FV panelů vůči slunečnímu záření. Pozice Slunce se určuje za pomoci dvou úhlů: azimutu a zenitu. Azimut je úhel, jehož hodnota se mění při pohybu Slunce od východu na západ. Pokud je azimut 0° je možné tvrdit, že se Slunce nachází přesně na jihu pro severní polokouli. Zenit je zase úhel mezi paprsky Slunce a plochou ve vodorovné poloze. Zenit je úzce spojen s výškou Slunce nad obzorem. Svoji maximální hodnotu nabývá v poledne, v tento čas se úhel rovná 90° . Výška Slunce pro daný čas je však proměnlivá vzhledem k aktuálnímu ročnímu období. [10]



Obr. 16: azimut a zenit FV panelu [10]

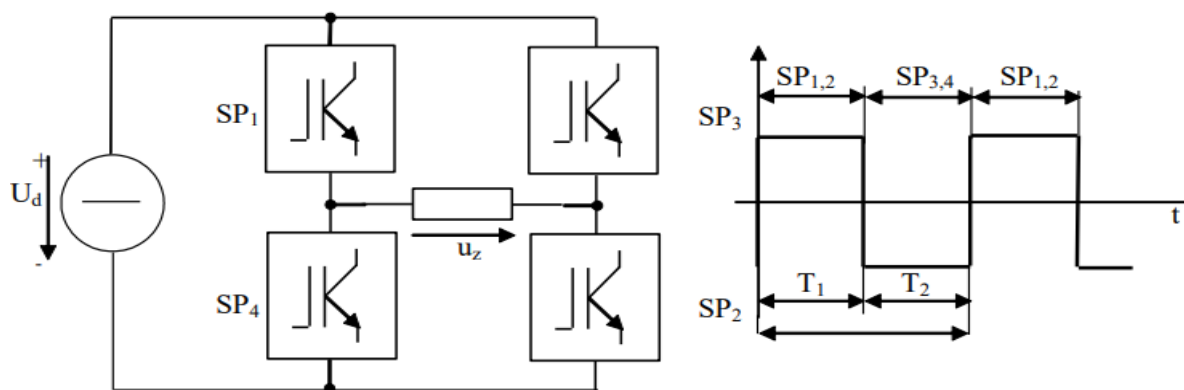
Azimut Slunce se tedy vztahuje k samotné orientaci fotovoltaických panelů. Je nutné si uvědomit, že nejvíce energie dokážou panely vyrobit v případě, že budou natočeny ke slunečním paprskům v úhlu 90° . Jsou-li panely odchýleny od jejich optimálního úhlu o $\pm 45^\circ$, nastává snížení produkce elektrické energie o přibližně 5%. Je-li odchylka $\pm 70^\circ$, je snížení vyrobené elektrické energie dvojnásobné. Úhel sklonu fotovoltaických panelů je potom spojený se zenitem. Za předpokladu, že je zenit neměnný, je možné dosáhnout maximálního ozáření mezi úhly 30° až 45° . Při srovnání s vodorovnou plochou je zisk produkce elektrické energie asi o 10% vyšší. Na plochy umístěné v horizontální rovině se často ukládá prach, sníh a listí, což zákonitě vede ke snížení špičkového výkonu panelů. Pokud je zenit panelů alespoň 12° , vzniká tzv. samočistící jev vlivem deště a gravitace. [10]

4.2 Fotovoltaický střídač

Fotovoltaické panely dokážou produkovat pouze stejnosměrné napětí. Většina elektrických spotřebičů v domácnostech však funguje na napětí střídavé. Je proto nezbytně nutné používat střídače v kombinaci s těmito panely.

Střídač je elektrické zařízení, které umožňuje změnu stejnosměrného napětí (DC) na střídavé napětí (AC). Střídač je obvykle složen ze stejnosměrného zdroje napětí a sady spínačů (častokrát se jedná o IGBT tranzistory). Tyto spínače potom střídavě připojují k zátěži (spotřebiči) kladný nebo záporný pól stejnosměrného zdroje. Současným sepnutím spínačů 1 a 2 začne připojenou zátěží protékat kladný proud I_z . Vypnutím spínačů 1 a 2 současným zapnutím spínačů 3 a 4 změní proud svoji polaritu a zátěží začne protékat proud záporné

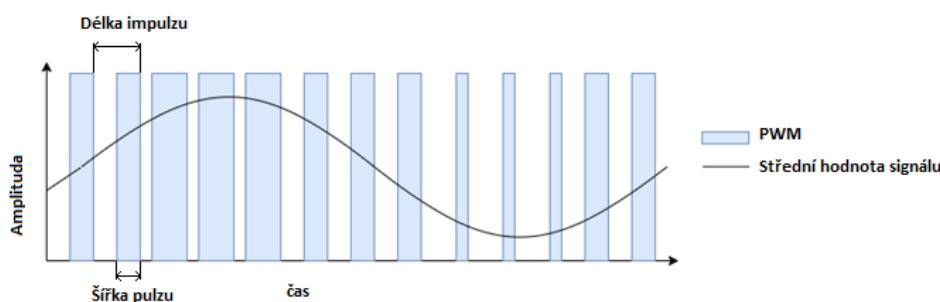
polarity. Tímto způsobem se docílí obdélníkového průběhu proudu (což se teoreticky dá nazvat střídavým proudem). [34]



Obr. 17: princip střídače [34]

Pro dosažení střídavého průběhu proudu, který svým tvarem blíže připomíná sinusový průběh, se využívá metoda pulzní šířkové modulace (PWM). Princip spočívá v periodické změně šířky impulsů na vstupu obvodu, které umožňují regulovat hodnotu výstupního signálu. [35]

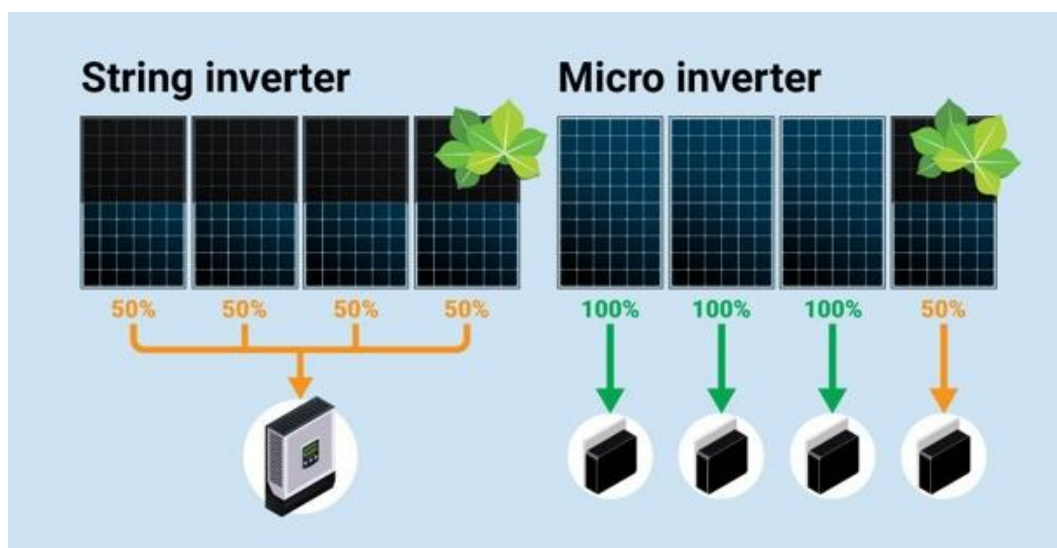
Při PWM je vstupní signál tvořen impulzy o konstantní amplitudě a variabilní šířce. Délka impulsu (perioda) zůstává konstantní, ale šířka impulsu (tzv. duty cycle) se mění v závislosti na požadovaném výkonu. Šířka impulsu se obvykle vyjadřuje v procentech a udává poměr mezi dobou, po kterou je signál vysoký (logická "1") a dobou, po kterou je signál nízký (logická "0"). [35]



Obr. 18: princip PWM, převzato z [35]

Co se fotovoltaiky týče, existují 3 základní druhy střídačů. První z nich nese název Stringový střídač. Jedná se o nejběžnější a nejjednodušší typ. Funguje tak, že připojuje řadu solárních panelů k jedinému střídači, který převádí celkový stejnosměrný vstup na střídavý výstup. I přes to, že se jedná o velice spolehlivé zařízení, má ze všech typů nejnižší účinnost, čímž snižuje celkový výkon FV elektrárny. Druhý typ je tzv. mikro inverter. Jedná se o nejnovější

technologii fotovoltaických střídačů. Tento střídač převádí stejnosměrné napětí na střídavé přímo ze zadní strany každého panelu. To umožňuje minimální ovlivnění systému v případě zastínění jednotlivých panelů. Pokud stín zakryje jeden panel, bude pouze tento panel produkovat menší výstupní výkon, na rozdíl od snížení výkonu celého systému, jako v případě stringového střídače. Jedná se však o velice nákladné řešení. Jeho výhody však mohou v některých případech převážit vyšší pořizovací cenu. Poslední typ nese název hybridní střídač. Ten funguje stejně jako stringový střídač s přidanou funkcí dodávání přebytečné energie generované fotovoltaickým systémem do bateriového úložiště. Hybridní střídače jsou cenově nejefektivnějším typem. [36], [37]



Obr. 19: princip zapojení FV střídačů [38]

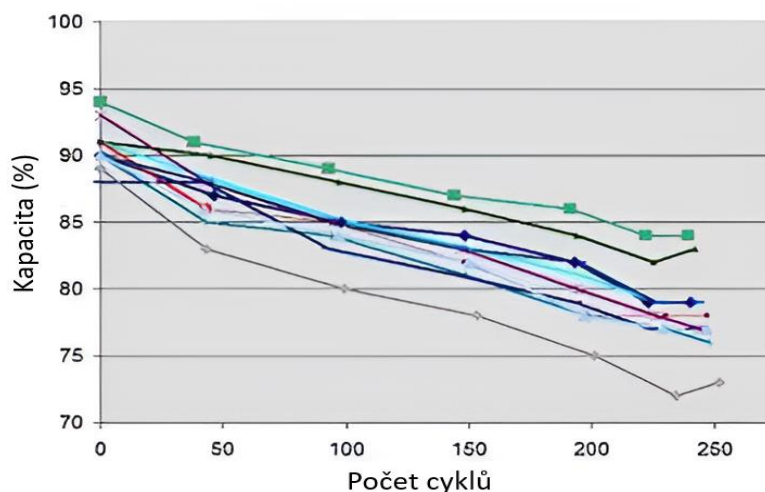
5 Baterie

Elektrochemické baterie (resp. akumulátory), jsou zařízení, která uchovávají a uvolňují elektrickou energii prostřednictvím reverzibilních redoxních reakcí. Skládají se z elektrochemických článků, které jsou vzájemně propojeny a slouží k přeměně chemické energie na elektrickou a naopak. Základem elektrochemického článku je elektrolyt, roztok iontové sloučeniny, který umožňuje migraci iontů mezi elektrodami. Kladná elektroda (anoda) a záporná elektroda (katoda) jsou vyrobeny z materiálů s odlišným redoxním potenciálem. Existují dva typy článků, primární a sekundární. Primární články (baterie) je možné použít pouze jednou, na druhou stranu sekundární články (akumulátory) je možné opakovaně nabíjet a vybíjet. Důležitým parametrem sekundárních článků je jejich životnost. Ta se definuje jako doba, za kterou se sníží kapacita akumulátoru na 80 % původní hodnoty. Životnost je silně ovlivněna hloubkou vybíjení (DoD). [10]

Existuje mnoho typu akumulátorů, které se od sebe liší zejména použitými materiály. V závislosti na použitých materiálech se potom různí jejich klíčové parametry jako je životnost, rychlost nabíjení, účinnost nebo gravimetrická hustota energie (hmotná energie). Co se fotovoltaické elektrárny týče, nejčastěji využívanou technologií jsou lithiové akumulátory, kterých je opět celá řada. V následujících podkapitolách budou blíže popsány některé z nich.

5.1 Lithium-polymerové baterie (Li-Pol)

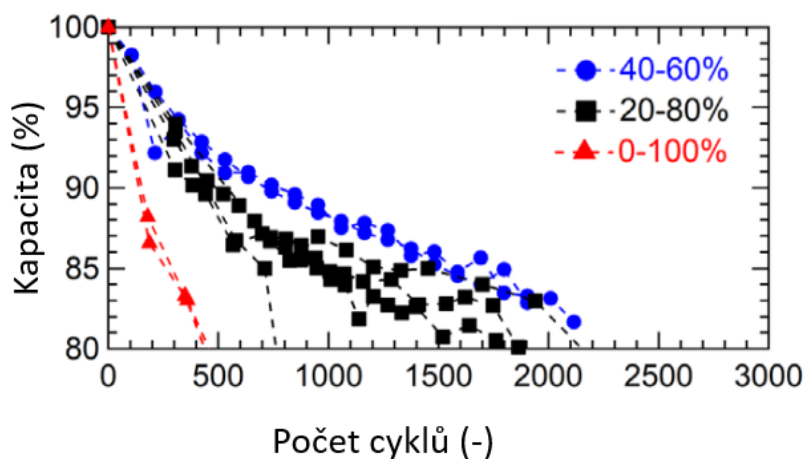
Tento typ baterie nevyužívá kapalného elektrolytu, ale místo toho obsahuje iontově vodivou polymerní látku jako je polyethylenglykol (PEG), polyakrylonitril (PAN), polymethylmethakrylát (PMMA) nebo polyvinylidenfluorid (PVdF). Tyto akumulátory disponují vysokou hmotnou energií. Ta se pohybuje v rozmezí 90 až 270 Wh/kg. Jsou často používány v telefonech, tabletech, powerbankách nebo dronech, protože elektrody lze vrstvit na sebe a akumulátory tak mohou být tvarovány do netypických geometrických útvarů. Další výhodou je potom minimální samovybíjení, které činí přibližně 5 % snížení nabitě energie za měsíc. Nevýhodou těchto baterií je jejich bezpečnost. Tyto články se při vysokém stavu nabití nebo přebití mají tendenci rozpínat, což může v horším případě mít za následek explozi. Napětí tohoto článku se pohybuje od 2,7 V (plně vybitý) do 4,2 V (plně nabitý). [40]



Obr. 20: Závislost ztráty kapacity na počtu cyklů pro 11 baterií typu Li-Pol, převzato z [57]

5.2 Lithium-nikl-mangan-kobalt oxid (NMC)

Tento sekundární typ článku používá pro svou katodu kombinaci niklu, manganu a kobaltu. Pro anodu je zde využit grafit. Tyto články mohou být použity po dobu až 2 000 cyklů v závislosti na hloubce vybití, která počet cyklů výrazným způsobem ovlivňuje (viz Obr. 21). Dalším velmi důležitým parametrem tohoto typu akumulátoru je gravimetrická hustota energie, která se nachází v rozmezí 150 až 220 Wh/kg. Důvodem proč se od tohoto typu spíše ustupuje je fakt, že se zde nachází ekologicky velice problematický vzácný kov, kobalt. [39]

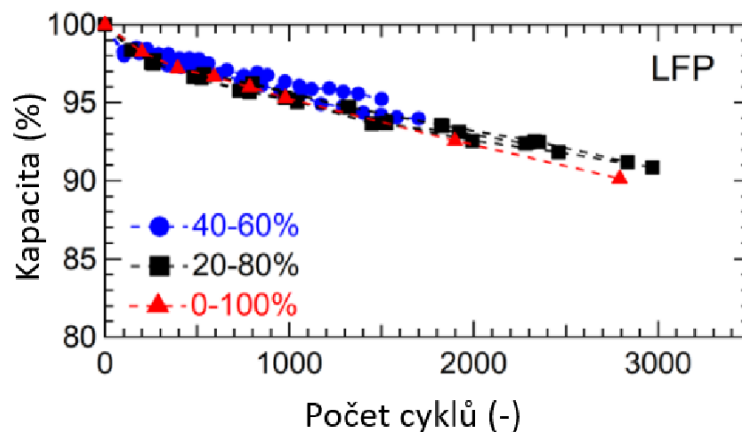


Obr. 21: Závislost ztráty kapacity na počtu cyklů při různých hloubkách vybití pro NMC, převzato z [58]

5.3 Lithium-železo-fosfátové akumulátory (LiFePO₄)

Tento typ akumulátoru používá uhlíkovou elektrodu jako anodu a Lithium-železo fosfát jako katodu. Největší předností této baterie je někdy až mnohonásobně delší životnost oproti jiným typům baterií. Životnost tohoto typu může být až 3 000 cyklů a v případě ideálních podmínek

se tato hodnota může dostat až na 12 000 cyklů. Další výhodou je potom bezpečnost, která je mnohem vyšší, než v případě Li-Pol článku, a to díky vysoké tepelné a chemické stabilitě. Jako nevýhodu je potom potřeba zmínit mírně menší hodnotu gravimetrické hustoty energie, která se pohybuje v rozmezí 90 až 210 Wh/kg. Maximální napětí se zastavilo na hodnotě 3,65 V. [41]



Obr. 22: Závislost ztráty kapacity na počtu cyklů při různých hloubkách vybití pro LiFePO₄, převzato z [58]

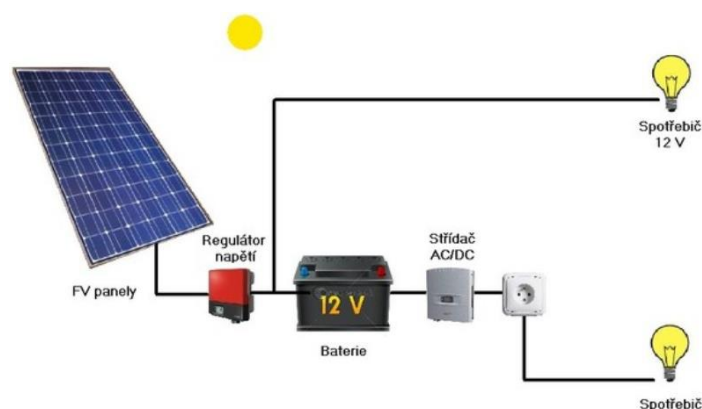
Na vývoji nových a vylepšení stávajících druhů akumulátorů pracují experti z celého světa. Ku příkladu tato práce [60] nabízí rozsáhlý přehled nejnovějších pokroků ve vývoji lithium-iontové baterie, které přineslo použití čistého grafenu jako anodu. V tomto článku [61] jsou potom komplexně popsány akumulátory Ni-Cd (nickel-cadmium) nebo Ni-MH (nickel-metal hybride). Stejně tak jsou zde prezentovány vývojové trendy směrem k nové generaci baterií a budoucí zaměření výzkumu.

6 Topologie zapojení fotovoltaických elektráren

Důležitou záležitostí fotovoltaických elektráren je jejich způsob zapojení. V následujících podkapitolách budou tyto způsoby blíže popsány.

6.1 Off-grid systém

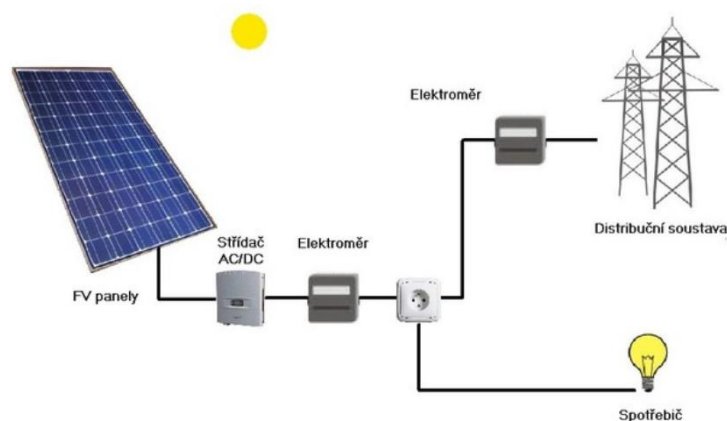
Off-grid systém, známý také jako ostrovní instalace, je způsob zapojení fotovoltaické elektrárny, která není připojena na distribuční síť. Jedná se o nejstarší aplikaci fotovoltaiky. Nespotřebovaná elektřina z FV elektrárny je akumulována do připojených akumulátorů. Tento systém se často používá v odlehlých oblastech, kde není možné nebo je technicky a stavebně komplikované připojit se k distribuční soustavě. Příklady takových míst zahrnují odlehlé chaty, zahradní domky nebo obytné přívěsy. Ostrovní systémy se také aplikují na systémy pro čerpání vody. Při návrhu takového systému je důležité zajistit, aby vyhovoval energetickým nárokům ve špičce, kdy je spotřeba elektřiny nejvyšší. [10], [42]



Obr. 23: Zapojení off-grid systému [42]

6.2 On-grid systém

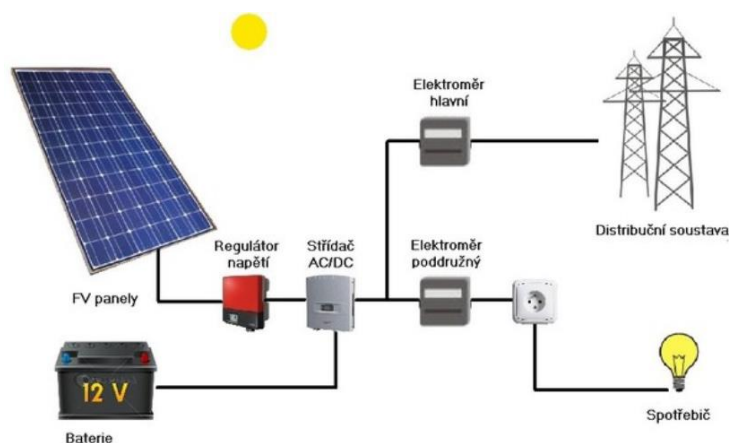
On-grid systémy jsou napojeny na místní rozvodné síť. Většina uživatelů tohoto systému vyrábí elektrický proud pro vlastní spotřebu a přebytek vyprodukované energie potom „prodává“ distributorům do veřejné distribuční sítě. V případě výpadku proudu bude dodávka elektřiny narušena. [10], [42]



Obr. 24: zapojení on-grid systému [42]

6.3 Hybridní systém

Hybridní fotovoltaický systém je alternativní řešení, které integruje přednosti dvou předchozích systémových uspořádání. Tento režim je aplikován na fotovoltaické systémy, jež jsou napojeny na elektrickou síť a současně disponují kapacitou pro ukládání elektrické energie do akumulátorů. V situaci, kdy je akumulátor plně nabitý a není vyžadována energie pro provoz domácích spotřebičů, lze nadbytečnou energii vrátit zpět do veřejné sítě. V momentě, když dojde k přerušení dodávky elektrické energie z veřejné sítě, systém automaticky přechází do autonomního režimu a zajišťuje pokračování v dodávce energie z akumulovaných zásob v bateriích. [10], [42]



Obr. 25: zapojení hybridního systému [42]

7 Life cycle assesment

Life Cycle Assessment (LCA) je strukturovaná, komplexní metoda kvantifikace a hodnocení materiálových a energetických toků a s nimi spojených emisí z výroby, dopravy, instalace, používání a konce životnosti (nejenom) fotovoltaických panelů. Pomocí této metody je možné určit například dobu energetické návratnosti panelů, návratnost jejich energetické investice, jejich uhlíkovou stopu nebo dobu uhlíkové návratnosti. [43]

7.1 Doba energetické návratnosti panelů

7.1.1 Definice

Doba energetické návratnosti (energy payback time – EPBT) je metoda, která se využívá pro určení doby, za kterou fotovoltaický panel vyprodukuje takové množství energie, které bylo zapotřebí pro jeho výrobu. Jedná se o jeden z důležitých ekologických ukazatelů této technologie. Pro stanovení doby energetické náročnosti je nutné nejprve provést důkladnou analýzu všech energetických vstupů do celého řetězce životního cyklu fotovoltaického systému. Kalkulace by tedy měla zahrnovat vše od energie potřebné k těžbě, přepravě, rafinaci, výrobě a dodání všech dílčích komponentů panelu až po energii potřebnou k sestavení panelu a jeho následné likvidaci. EPBT se obvykle vyjadřuje následujícím vztahem (1). [43]

$$EPBT = \frac{E_{emb}}{E_{FV/rok}} \quad (1)$$

Kde E_{emb} je celková energetická náročnost FV panelu (kWh), $E_{FV/rok}$ je roční produkce energie FV panelu (kWh).

$$E_{emb} = E_P + E_S + E_{pro} + E_R + E_{BOS} \quad (2)$$

Kde E_P je energie potřebná k získání čistého křemíkového ingotu, E_S je energie potřebná k získání křemíkových waferů, E_{pro} je energie potřebná k sestavení FV panelu, E_R je energie potřebná k produkci hliníkového rámu FV panelu a E_{BOS} je energie použitá při výrobě a montáži mechanických a elektrických nosných systémů. Všechny výše popsané energie jsou vyjádřeny v jednotkách kWh. [43]

7.2 návratnost energetické investice FV panelů

7.2.1 Definice

Návratnost energetické investice (energy return on investment-EROI) je poměr, který měří množství využitelné energie získané z energetického zdroje oproti množství energie vynaložené na jeho získání. Jinými slovy, funkce EROI porovnává množství energie, kterou fotovoltaický panel poskytne za celou dobu svojí životnosti, s množstvím energie spotřebované na jeho nalezení, těžbu, zpracování a samotné fungování elektrárny. Pokud se očekává, že konkrétní modul vydrží 25 let a vykazuje EROI rovno hodnotě 5, lze tak očekávat, že se z panelu vyprodukuje asi 5krát více energie, než bylo použito k jeho výrobě. Pro výpočet je možné použít následující vztah (3). [43]

$$EROI = \frac{E_{lifetime}}{E_{emb}} \quad (3)$$

Kde $E_{lifetime}$ je celková energie vyprodukovaná fotovoltaickým panelem za celou dobu jeho životnosti (kWh). [37]

7.3 Výpočet spotřeby energie FV panelu

Během výrobního procesu fotovoltaických panelů hraje spotřeba energie klíčovou roli. Energie nutná pro výrobu solárního křemíku je shodná jak pro polykrystalický, tak pro monokrystalický panel a to 125,01 kWh/m². Při čištění výsledného křemíku se spotřebuje zhruba 240 kWh/m² pro oba typy panelů. [45]

Pokud jde o výrobu křemíkových ingotů, energetická náročnost je rozdílná podle použité metody. Pro monokrystalický křemík vyráběný Czochralského metodou je to přibližně 275 kWh/kg. Vzhledem k tomu, že pro výrobu 1 m² panelu je zapotřebí zhruba 1,448 kg křemíkového ingotu [37], je možné tuto hodnotu přepočítat na 398,92 kWh/m² jednoho panelu. U polykrystalického křemíku metodou blokového lití je energetická náročnost odhadována na 153 kWh/kg, což představuje zhruba 208,35 kWh/m². [45]

Spotřeba energie při řezání ingotů na desky či wafery je stejná pro oba typy FV panelů a odhaduje se na přibližně 69,45 kWh/m². [45]

Při výrobě článků je energetická náročnost kolem 156,68 kWh/m² pro polykrystalické články a 152,79 kWh/m² pro monokrystalické. [46]

Sestavování panelů vyžaduje energii v rozmezí 80 až 97 kWh/m², bez ohledu na konkrétní typ. [46]

Zapouzdření panelů do hliníkových rámu spotřebovává kolem 30 až 75 kWh/m², což platí pro oba typy FV panelů. [47]

Nakonec, výroba a montáž mechanických a elektrických nosných systémů, známých jako balance of system (BOS), spotřebuje kolem 358 kWh/m², a to jak pro polykrystalické, tak pro monokrystalické FV panely. [47]

Tab. 1: Energetická náročnost při výrobě polykrystalického a monokrystalického FV panelu. [43], [45], [46], [47]

Proces	Polykrystalický panel (kWh/m²)	Monokrystalický panel (kWh/m²)
Výroba křemíku (MG-Si)	125,01	125,01
Čištění křemíku	242	240
Krystalizace a konturování	208,35	398,92
Řezání waferů	69,45	69,45
Zpracování článků	156,68	152,79
Hliníkový rám	75	75
Sestavování panelu	97,23	97,23
BOS	358	358
Celkem	1331,72	1 516,40

Tab. 2: energetická náročnost při výrobě tenkovrstvého FV panelu. [55]

Proces	CdTe (kWh/m²)	CIGS (kWh/m²)
Sestavení panelu	208,91	33,61
Hliníkový rám	44,17	44,17
Zapouzdření panelu	49,45	34,73
Konektory + kabely	3,47	3,47
Celkem	306	115,98

7.4 Uhlíková stopa

7.4.1 Definice

Uhlíková stopa (carbon footprint – CF) fotovoltaických panelů odkazuje na množství emisí oxidu uhličitého, které jsou spojeny s celým životním cyklem FV panelů. Jedná se o měřítko, které zohledňuje celkový environmentální dopad celého procesu, od těžby surovin a výroby přes instalaci, provoz až po likvidaci na konci životního cyklu. Uhlíkovou stopu lze vyjádřit následujícím vzorcem (4). [43]

$$CF = \frac{CCE}{E_{lifetime} \cdot EF} \quad (4)$$

Kde CCE ($\text{kg CO}_2/\text{m}^2$) je celkové množství vzniklých emisí během výroby a instalace panelů. EF je emisní faktor energetického mixu České republiky (energetický mix je podíl jednotlivých zdrojů energie na území daného státu). Je to měrný ukazatel, který určuje, kolik se uvolní oxidu uhličitého spálením jednotkového množství paliva. Jeho hodnota pro ČR je rovna $0,413$ ($\text{t CO}_2/\text{MWh}$). [49]

7.5 Doba uhlíkové návratnosti panelů

7.5.1 Definice

Jedná se o dobu, za kterou fotovoltaický panel vykompenzuje uhlíkové emise vzniklé při jeho výrobě a instalaci pomocí ušetřených emisí CO_2 oproti výrobě elektrické energie z energetického mixu daného státu. Jedná se o další velice důležitý ekologický ukazatel, který je třeba brát v potaz. Pro správný výpočet doby uhlíkové návratnosti fotovoltaických panelů (CPBT – carbon payback time) je potřebné znát následující vztah (5). [44]

$$CPBT = \frac{CCE}{E_{FV/rok} \cdot EF} \quad (5)$$

7.6 Výpočet množství vyprodukovaného CO_2

Během výrobního procesu solárních panelů se uvolňuje určité množství CO_2 do atmosféry. Podle odhadů je množství CO_2 vyprodukovaného při výrobě solárního křemíku pomocí Siemensova postupu a jeho následném čištění přibližně 290 kg CO_2 na každý kilowatt peak (kWp) výkonu. Pro monokrystalický křemík vyráběný Czochralského metodou se odhaduje množství vyprodukovaného CO_2 na 139 $\text{kg CO}_2/\text{kWp}$, zatímco pro polykrystalický křemík vyráběný metodou blokového lití je odhadováno 116 $\text{kg CO}_2/\text{kWp}$. [50], [51]

Při řezání křemíkového ingotu na desky či wafery se vyprodukuje přibližně 20 kg CO₂/kWp u obou typů fotovoltaických (FV) panelů. Samotné zpracování článku pak zahrnuje produkci CO₂ ve výši 69 kg CO₂/kWp pro polykrystalický článek a monokrystalický článek. [50], [51]

Sestavování finálních panelů přispívá přibližně 135 kg CO₂/kWp bez ohledu na jejich konkrétní typ. Zapouzdření panelů do hliníkových rámu způsobuje uvolnění přibližně 111 kg CO₂/kWp, což platí pro oba typy FV panelů. [50], [51]

V neposlední řadě, výroba a montáž mechanických a elektrických nosných systémů, známých také jako Balance of system, přispívá přibližně 21 kg CO₂/kWp, a to jak pro polykrystalické, tak pro monokrystalické FV panely. [44]

Tab. 3: Množství vyprodukovaného CO₂ při výrobě polykrystalického a monokrystalického FV panelu. [44], [50], [51]

Proces	Polykrystalický panel (kg CO₂/kWp)	Monokrystalický panel (kg CO₂/kWp)
Výroba křemíku (MG-Si)	56	56
Čištění křemíku	224	224
Krystalizace a konturování	116	139
Řezání waferů	20	20
Zpracování článků	69	69
Hliníkový rám	111	111
Sestavování panelu	135	135
BOS	21	21
Celkem	731	754

Tab. 4: Množství vyprodukovaného CO₂ při výrobě CdTe a CIGS tenkovrstvého fotovoltaického panelu. [50]

Proces	CdTe ((kg CO ₂ /kWp)	CIGS ((kg CO ₂ /kWp)
Sestavení panelu	77,7	408,63
Hliníkový rám	111	111
Zapouzdření panelu	107	76
Konektory + kabely	4,3	4,37
BOS	21	21
Celkem	321	621

7.7 Výběr fotovoltaických panelů

Pro výpočet energetické návratnosti fotovoltaických panelů je nutné specifikovat požadovaný fotovoltaický systém. Z toho důvodu byl vybrán jeden zástupce fotovoltaických panelů z každé technologie (tzn. monokrystalický, polykrystalický, tenkovrstvý CdTe a CIGS fotovoltaický panel). V následujících tabulkách jsou zobrazeny klíčové parametry vybraných fotovoltaických panelů, které jsou nezbytné pro přesnou kalkulaci výše zmíněných ekologických ukazatelů.

Tab. 5: Klíčové parametry vybraného polykrystalického panelu

Typ článku	polykrystal 156x156 mm
Jmenovitý výkon	285 (Wp)
Výkon na m ²	175,44 (Wp)
Teplotní součinitel γ	-0,31 %/°C
Rozměry	1640x992x40 mm
Účinnost	17,52 % (při 25° a 1000 W/m ²)
Meziroční pokles účinnosti	0,80 %
Životnost	25 let

Tab. 6: Klíčové parametry vybraného monokrystalického panelu

Typ článku	monokrystal
Jmenovitý výkon	370 (Wp)
Výkon na m ²	218,46 (Wp)
Teplotní součinitel γ	-0,44 %/°C
Rozměry	1692x1028x30 mm
Účinnost	21,25 % (při 25° a 1000 W/m ²)
Mezoroční pokles účinnosti	0,40 %
Životnost	25 let

Tab. 7: Klíčové parametry vybraného tenkovrstvého CdTe panelu

Typ článku	CdTe
Jmenovitý výkon	82,5 (Wp)
výkon na m ²	114,58 (Wp)
Teplotní součinitel γ	-0,25 %/°C
Rozměry	1200x600x7,5 mm
Účinnost	11,5 % (při 25° a 1000 W/m ²)
Mezoroční pokles účinnosti	0,80 %
Životnost	15 let

Tab. 8: Klíčové parametry vybraného tenkovrstvého CIGS panelu

Typ článku	CIGS
Jmenovitý výkon	335 (Wp)
výkon na m ²	142,36 (Wp)
Teplotní součinitel γ	-0,25 %/°C
Rozměry	1901x1237x45 mm
Účinnost	14,2 % (při 25° a 1000 W/m ²)
Mezoroční pokles účinnosti	0,80 %
Životnost	15 let

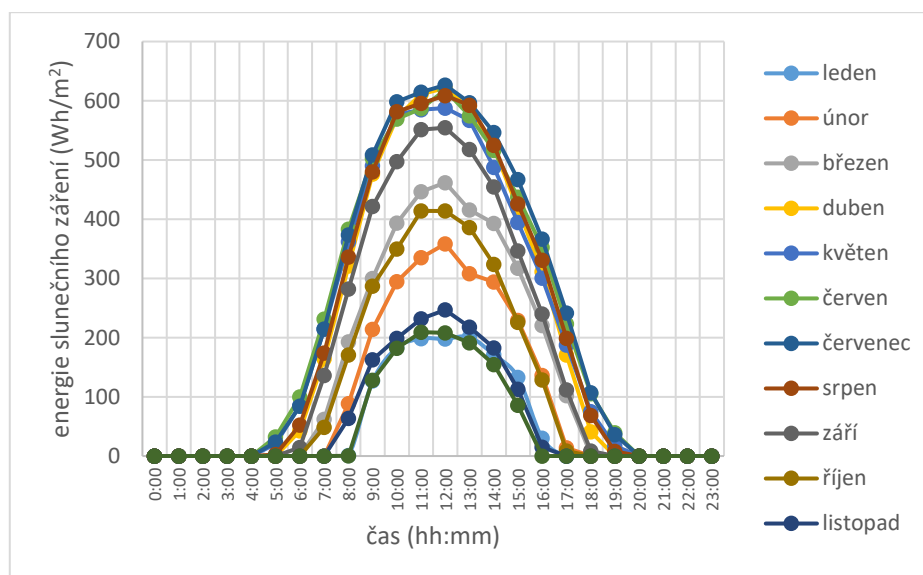
7.8 Množství energie slunečního záření dopadající na FV panely

Pro výpočet výše zmíněných ekologických ukazatelů pro technologii fotovoltaických panelů je naprosto klíčové znát množství energie dopadající na osluněnou plochu. Pro zjištění této důležité veličiny je možné využít softwaru PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM (PVGIS). Jedná se o model vytvořený výzkumným centrem

Evropské unie. Zaměřuje se přímo na využití pro fotovoltaické aplikace a umožňuje (mimo jiné) simulace denního, měsíčního a ročního profilu slunečního ozáření pro konkrétní lokalitu. Výpočetní model využívá údaje ze satelitních měření a také z pozemních meteostanic. [41]

Pro potřeby této práce byla zvolena simulace denního profilu slunečního ozáření v hodinových intervalech pro každý měsíc v roce. Tento denní průběh se uvažuje totožný pro každý den v konkrétním měsíci. Fotovoltaické panely jsou orientovány na jih a jejich azimut je tím pádem 0°, úhel sklonu je potom 35°. Panely se nachází na území České republiky v nadmořské výšce 377 metrů.

Následující graf zobrazuje průběh energie slunečního záření typického dne pro každý měsíc v roce.



Obr. 26: průběh slunečního záření typického dne pro každý měsíc v roce pro danou oblast, převzato [48]

7.9 Produkce elektrické energie fotovoltaickými panely

Dalším důležitým parametrem při kalkulaci výše zmíněných ukazatelů FV panelů (EROI, EPBT, CPBT, CF) je jejich produkce elektrické energie. Množství elektrické energie, kterou vyrobí fotovoltaické panely, se dá spočítat různými způsoby. Jedním z nich je například následující sada vzorců, která zohledňuje vlivy okolního prostředí, jako je například teplota okolního vzduchu. S rostoucí teplotou fotovoltaických panelů se totiž snižuje jejich schopnost transformovat sluneční záření na elektrinu. Pokles účinnosti v závislosti na teplotě lze popsat pomocí lineárního vztahu (6). [10], [54]

$$\eta_{FV} = \eta_{ref} \cdot \left(1 + \frac{\gamma}{100} \cdot (t_{FV} - t_{ref}) \right) \quad (6)$$

Kde η_{ref} je referenční účinnost (%) při normovaných zkušebních podmínkách. t_{FV} je teplota fotovoltaického panelu (°C). t_{ref} je referenční teplota panelu 25 °C, γ je teplotní součinitel výkonu (%/K), který se obvykle nachází v katalogovém listu konkrétního panelu.

Vzorec (7) slouží k výpočtu odhadu teploty samotného fotovoltaického článku na základě teploty okolního vzduchu. [10], [54]

$$t_{FV} = t_v + k \cdot Q_s \quad (7)$$

Kde t_v je teplota okolního vzduchu (°C), která byla získána za pomoci softwaru PVGIS. Teplotní koeficient k je hodnota, která vyjadřuje změnu teploty FV panelu v závislosti na jeho výkonu. Hodnota teplotního koeficientu se liší v závislosti na konkrétním typu FV panelu (materiál konstrukce, technologie výroby), na způsobu odvětrávání panelu a na rychlosti větru. Tento koeficient se obvykle pohybuje od 0,02 do 0,05 K·m²/W, pro potřeby této práce byl zvolen 0,03 K·m²/W. Q_s je skutečné množství energie dopadající na osluněnou plochu (kWh/m²). [10], [54]

Výsledná rovnice nutná pro výpočet výroby elektrické energie z fotovoltaických panelů (kWh) v průběhu hodin je definován pomocí vztahu (8). [54]

$$E_{FV} = 0,9 \cdot \frac{P_{pk}}{G_{ref}} \cdot Q_s \cdot \frac{\eta_{FV}}{\eta_{ref}} \quad (8)$$

Kde Q_s je množství energie dopadající na osluněnou plochu (kWh/m²), P_{pk} je špičkový výkon fotovoltaických panelů (kWp) η_{FV} je skutečná účinnost panelů (%), η_{ref} je referenční účinnost panelů (%) a G_{ref} je referenční sluneční ozáření (1kW/m²). [10], [54]

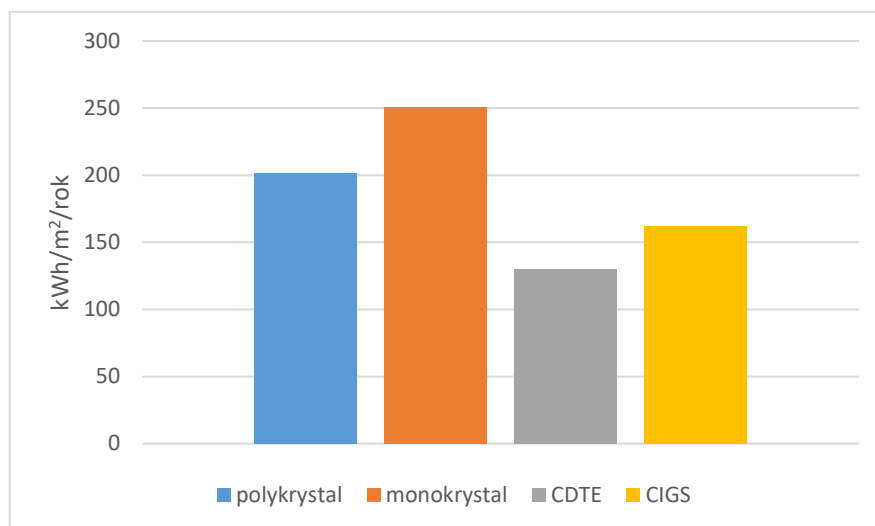
Je důležité si uvědomit, že špičkový výkon FV panelů se s postupem času snižuje. To znamená, že starší panely budou produkovat méně elektrické energie než panely nové. Při výpočtu produkce elektrické energie z FV panelů je proto nutné zohlednit tuto tzv. degradaci výkonu. Hodnota degradace se liší v závislosti na typu panelu, kvalitě výroby a provozních podmínkách. V kapitole 7.2 a 8.1 byla stanovena hodnota degradace pro daný typ panelů, která by se měla použít při výpočtu.

7.10 Chronologický postup výpočtu LCA

1. Identifikace průměrné energie potřebné pro výrobu a montáž fotovoltaických panelů vztažené na jednotkovou plochu 1 m^2 pomocí literární rešerše pro monokrystalický, polykrystalický a tenkovrstvý CdTe a CIGS FV panel (tyto hodnoty jsou zobrazeny v Tab. 1 s Tab. 2).
2. Identifikace produkce emisí CO_2 , které vznikají při výrobě a montáži fotovoltaických panelů vztažené na jednotkovou plochu 1 m^2 (viz Tab. 3 a Tab. 4)
3. Stanovení celkové energie solárního záření, které dopadá na plochu FV panelů na území České republiky v hodinových intervalech pro celý rok za pomocí programu PVGIS. Při odhadu byl brán zřetel na úhel sklonu panelů (35°), jejich orientaci přesně na jih a nadmořskou výšku, která činí 377 metrů. (Stanovená energie zůstává stejná po celých 15 nebo 25 let v závislosti na životnosti panelu)
4. Výpočet množství vyrobené elektrické energie pomocí fotovoltaických panelů (jejichž důležité parametry jsou zobrazeny v Tab. 5, Tab. 6, Tab. 7 a Tab. 8) v závislosti na množství solárního záření a proměnlivé účinnosti panelů v průběhu hodinových intervalů během celého roku podle sady vzorců uvedených v kapitole 7.9 s ohledem na meziroční klesající účinnost panelů a jejich životnost.
5. Výpočet doby energetické návratnosti (EPBT) dle vzorce (1) pro všechny zvolené typy FV panelů.
6. Výpočet návratnosti energetické investice (EROI) dle vzorce (3) pro všechny zvolené typy panelů.
7. Výpočet uhlíkové stopy (CF) dle vzorce (4) pro všechny zvolené typy panelů.
8. Výpočet doby uhlíkové návratnosti (CPBT) dle vzorce (5) pro všechny zvolené typy panelů.

7.11 Výsledky life cycle assesment

Na Obr. 27 je zobrazena roční produkce elektrické energie všech 4 vybraných typů fotovoltaických panelů při stanovených parametrech.



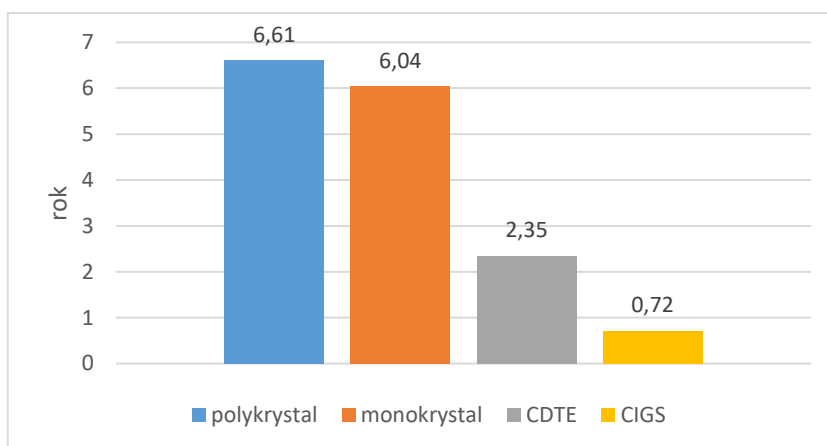
Obr. 27: graf roční produkce elektrické energie za jeden rok pro všechny 4 druhy FV panelů

Z Obr. 27 je patrné, že nejvyšší roční produkce elektrické energie dosahuje panel monokrystalický s 250,95 kWh/m² za rok. Polykrystalický panel potom produkuje o něco méně energie a to konkrétně 201,53 kWh/m² za rok. Následuje tenkovrstvý FV panel typu CIGS, který za rok vyprodukoval 161,86 kWh/m². Nejhůře je na tom CdTe panel, který dokázal vyprodukovat pouze 130,27 kWh/m² za rok.

Tab. 9: Výsledky EPBT, EROI, CPBT a CF pro zvolené typy fotovoltaických panelů.

	EPBT (rok)	EROI (-)	CPBT (rok)	CF (g CO ₂ /kWh)
polykrystal	6,61	3,33	1,54	28,93
monokrystal	6,04	3,64	1,59	29,84
CdTe	2,35	5,95	0,68	20,24
CIGS	0,72	19,47	1,32	39,15

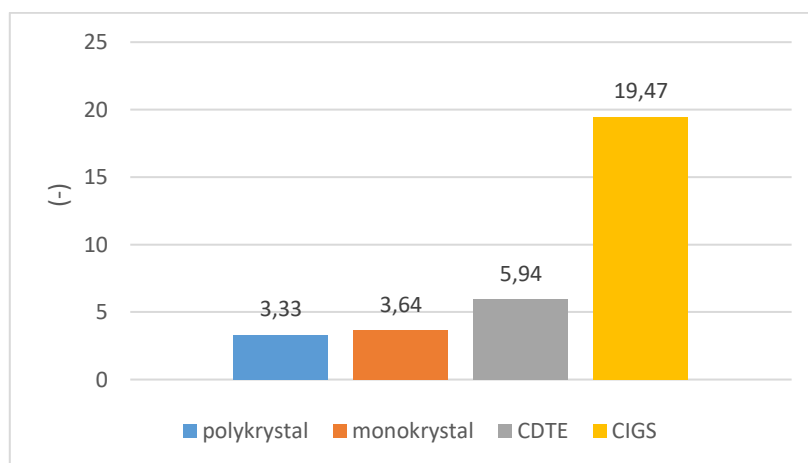
Na Obr. 28 je možné vidět dobu energetické návratnosti všech 4 vybraných typů fotovoltaických panelů při stanovených parametrech.



Obr. 28: Doba energetické návratnosti jednotlivých druhů FV panelů

Z obr. 28 je zřejmé, že nejdelší energetickou návratnost má panel polykrystalický. Hodnota EPBT pro tento typ panelu je rovna 6,61 rokům. Následuje panel monokrystalický, jehož energetická návratnost se zastavila na hodnotě 6,04 let. Pro CdTe fotovoltaický panel je hodnota energetické návratnosti rovna 2,35 rokům. Zdaleka nejlépe je na tom poté panel typu CIGS, jehož energetická návratnost je vyčíslena na 0,72 roku.

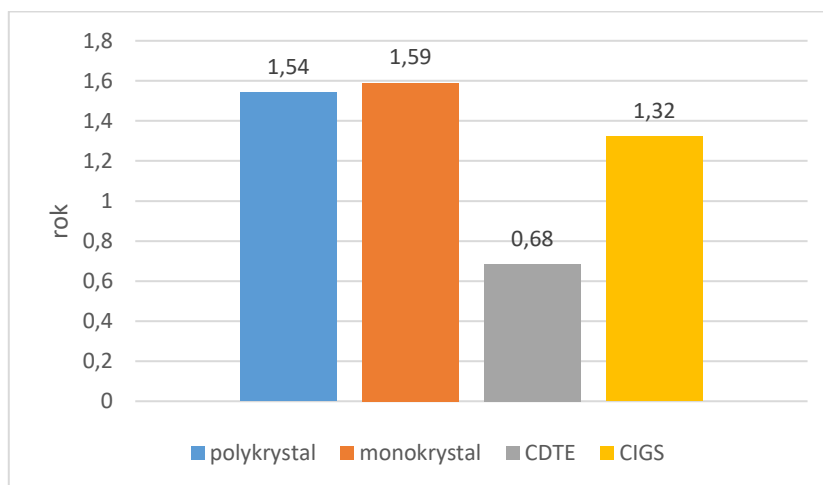
Na obr. 29 je možné vidět návratnost energetické investice všech 4 vybraných typů fotovoltaických panelů při stanovených parametrech.



Obr. 29: Návratnost energetické investice jednotlivých druhů FV panelů

Z Obr. 29 je možné vyčíst, že zdaleka nejvyšší návratnost energetické investice má panel typu CIGS. Jeho hodnota činí 19,47. O poznání hůře je na tom CdTe panel, jehož hodnota EROI vyšla na 5,94. Monokrystalický panel má návratnost energetické investice ve výši 3,64. Nejhůře potom dopadl panel polykrystalický s hodnotou EROI 3,33.

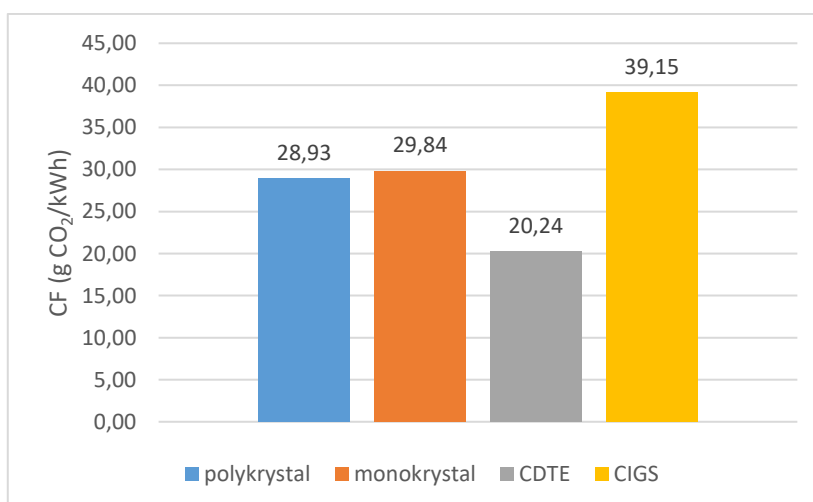
Na Obr. 30 je možné vidět dobu návratnosti uhlíkové investice všech 4 vybraných typů fotovoltaických panelů při stanovených parametrech.



Obr. 30: Doba uhlíkové návratnosti jednotlivých druhů FV panelů

Z vizuální analýzy Obr. 30 lze vyvodit, že nejvýznamnější uhlíkovou návratností disponuje monokrystalický panel. CPBT hodnota tohoto panelu činí 1,59 let. Následuje polykrytalický panel s hodnotou 1,54 let. CIGS fotovoltaický panel dosahuje uhlíkové návratnosti ve výši 1,32 let. Nejefektivnější je potom panel typu CdTe, u nějž je uhlíková návratnost stanovena na pouhých 0,68 roku.

Na Obr. 31 je možné vidět výslednou uhlíkovou stopu všech 4 vybraných typů fotovoltaických panelů při stanovených parametrech.



Obr. 31: Výsledná uhlíková stopa jednotlivých druhů FV panelů

Při pohledu na Obr. 31 je zřejmé, že nejvyšší uhlíkovou stopu vykazuje tenkovrstvý panel CIGS s hodnotou 39,15 g CO₂/kWh. Následuje panel monokrystalického typu s hodnotou

29,84 g CO₂/kWh. Těsně za ním je poté polykrystalický panel s uhlíkovou stopou 28,93 g CO₂/kWh. Nejlépe potom vychází CdTe panel, jehož uhlíková stopa činí pouze 20,24 g CO₂/kWh.

7.11.1 Citlivostní analýza life cycle assesment

Výše zmíněné výsledky jsou platné pouze v případě, že jsou panely orientovány přímo na jih (to znamená, že azimut panelů je 0°). Avšak ne vždy je možné tohoto úhlu dosáhnout, zejména potom v případě, že jsou fotovoltaické panely umístěné na střechách rodinných domů, u kterých je nutné panely nainstalovat tak jak je orientovaná samotná střecha. Z tohoto důvodu byla vypracována citlivostní analýza.

Citlivostní analýza je proces, který se zabývá změnou některých vstupních parametrů, které se potom projevují na výsledcích daného projektu. Cílem citlivostní analýzy je tak identifikace faktorů, jež mají výrazný, nebo méně výrazný vliv na konečný výsledek.

V tomto případě se tedy citlivostní analýza zabývá změnou výsledků (EROI, EPBT, CPBT a CF) v závislosti na změně azimutu panelů (změna tohoto úhlu byla od 15° do 90° s krokem 15°). Výsledné hodnoty jsou potom zobrazeny v Tab. 10 a Tab. 11.

Z těchto výsledků je zřejmé, že čím vyšší je úhel, tím vyšší je potom doba energetické návratnosti, a to až o zhruba 22 % pro všechny typy panelů. Co se týče návratnosti energetické investice, ta klesla až o cca 18 % pro všechny druhy FV panelů v případě azimutu 90°. Zvýšení doby uhlíkové návratnosti je potom shodné s dobou energetické návratnosti, tedy okolo 22 % pro 90° otočení od ideálního úhlu panelů. S uhlíkovou stopou potom nejlépe vychází polykrystalický panel, který se zhoršil o 22,3%. O zhruba 1% hůře potom vycházejí zbylé typy panelů, tedy 23%.

Tab. 10: výsledky citlivostní analýzy (1. část)

	EPBT (rok)	EROI (-)	CPBT (rok)	CF (gCO ₂ /kWh)	EPBT (rok)	EROI (-)	CPBT (rok)	CF (gCO ₂ /kWh)	EPBT (rok)	EROI (-)	CPBT (rok)	CF (gCO ₂ /kWh)
Azimut	15°				30°				45°			
Polykrystal	6,71	3,28	1,56	29,35	6,96	3,16	1,62	30,46	7,05	3,12	1,64	30,84
Monokrystal	6,09	3,64	1,60	29,85	6,32	3,48	1,66	31,20	6,40	3,44	1,68	31,59
CdTe	2,37	5,94	0,69	20,25	2,46	5,68	0,71	21,16	2,49	5,61	0,72	21,43
CIGS	0,72	19,46	1,33	39,17	0,75	18,62	1,38	40,94	0,76	18,39	1,40	41,45

Tab. 11: výsledky citlivostní analýzy (2. část)

	EPBT (rok)	EROI (-)	CPBT (rok)	CF (gCO ₂ /kWh)	EPBT (rok)	EROI (-)	CPBT (rok)	CF (gCO ₂ /kWh)	EPBT (rok)	EROI (-)	CPBT (rok)	CF (gCO ₂ /kWh)
Azimut	60°				75°				90°			
Polykrystal	7,46	2,95	1,74	32,66	7,73	2,85	1,80	33,82	8,20	2,68	1,91	35,91
Monokrystal	6,78	3,25	1,78	33,47	7,02	3,13	1,85	34,66	7,46	2,95	1,96	36,81
CdTe	2,63	5,30	0,77	22,69	2,73	5,12	0,79	23,49	2,89	4,82	0,84	24,93
CIGS	0,80	17,36	1,48	43,90	0,83	16,77	1,54	45,45	0,88	15,80	1,63	48,24

8 Ekonomické vyhodnocení

8.1 Případová studie

Pro stanovení cenové bilance byla zhotovena případová studie, která byla typizována na budovu společnosti CICM s.r.o (Company international cable manufacturer), která se nachází ve městě Chyšce v Karlovarském kraji. Souřadnice této oblasti jsou 50.10291, 13.24531. Nadmořská výška je potom 458 metrů nad mořem. Střecha budovy (hala č.5 viz Obr. 33), na které budou panely nainstalovány směřuje na jih. Úhel sklonu již zmíněné střechy je potom 20 °. Celková plocha jižní strany střechy potom dosahuje hodnoty 912.8 m². Spotřeba tohoto objektu je uvedena v kapitole 8.2. Celková cena FVE včetně panelů, střídačů, kabelů, nosné konstrukce, montáže a dopravy byla vyčíslena na hodnotu 4 950 000 Kč včetně DPH společností AC-heating s.r.o. Financování této elektrárny se uvažuje z vlastních zdrojů. Celková životnost tohoto projektu je stanovena na 25 let provozu.

Celkově bylo zvoleno 350 kusů monokrystalických panelů DHT-M72X10 od společnosti DAH Solar s výkonem 550 Wp. Celková velikost instalované fotovoltaické elektrárny je 192,500 kWp. Plocha, kterou tato elektrárna zabírá je rovna hodnotě 904,4 m².

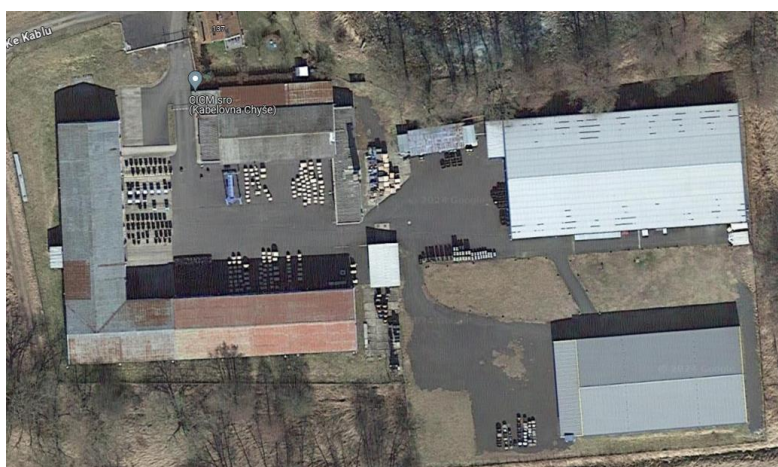
Tab. 12: Technické specifikace vybraných FV panelů

Jmenovitý výkon	550 (Wp)
Typ panelu	mono krystal
Teplotní součinitel γ	-0,35 %/°C
Rozměry panelu	2279x1134x35 mm
Účinnost	21,25 % (při 25° a 1000 W/m ²)
Meziroční pokles účinnosti	0,4 %
Životnost	25 let

Dále byly zvoleny celkem 2 kusy třífázového měniče SOLAREEDGE 100 kW SE100k-RW00iBNM4. Jak je možné vidět v Tab. 13, Záruka na funkčnost tohoto střídače je pouze 15 let. Bude tak nutné v 15 roku životnosti provést investici do nákupu nových střídačů.

Tab. 13: Technické specifikace vybraného třífázového měniče

Max. DC výkon	175 kW
Max. účinnost	98,30 %
Jmenovité DC napětí	620 V
Jmenovitá frekvence	50/60 Hz
jmenovitý AC výkon	100 kW
Evropská účinnost	98 %
Záruka na funkčnost	15 let



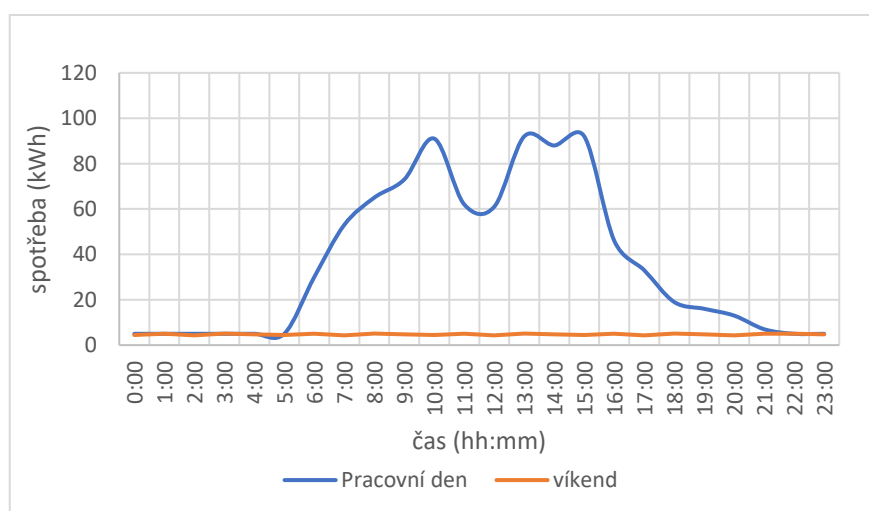
Obr. 32: letecký pohled na objekt společnosti CICM s.r.o



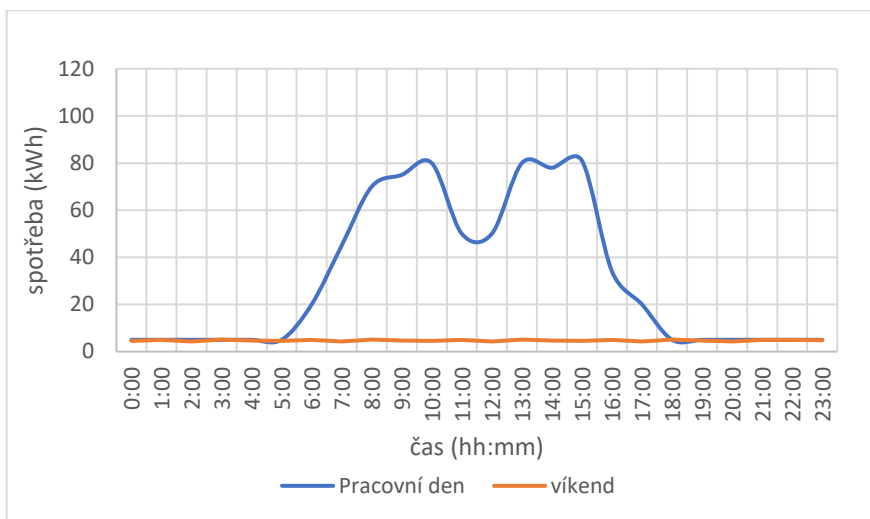
Obr. 33: Schématické zobrazení objektu společnosti CICM s.r.o

8.2 Spotřeba elektrické energie uvažovaného objektu

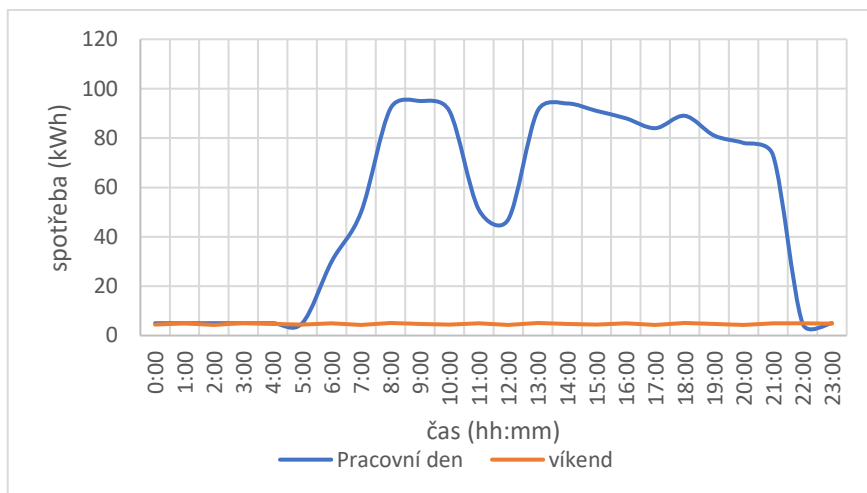
Spotřeba elektrické energie kolísá podle času v průběhu dne, sezóny a konkrétního dne v týdnu. Celková spotřeba elektrické energie byla určena na základě konzultace a poskytnutých záznamů o spotřebě se zástupcem společnosti CICM s.r.o. Pro účely této práce byla určena spotřeba v diskretizovaných hodinových intervalech (což znamená, že se spotřeba v dané hodině považuje za konstantní a mění se pouze skokově mezi hodinami) a rozdělena do kategorií podle ročního období (jaro, léto, podzim, zima), jakož i podle pracovních dnů a víkendů. Hodnoty spotřeby jsou znázorněny v následujících grafech. Při analýze grafů je patrných několik pozoruhodných jevů. Primárně je zřejmé výrazné snížení spotřeby elektřiny během víkendů. Tento jev lze přičítat tomu, že během sobot a nedělí společnost není v provozu s výjimkou osvětlení ve výrobních halách, které zůstává zapnuté z důvodů bezpečnosti. Dále je patrné, že během jarního a letního období dochází k významnému poklesu spotřeby elektřiny ve srovnání se zimními a podzimními měsíci. Tento jev je dán sníženým objemem zakázek společnosti v tomto období, což vede k přechodu z dvousměnného provozu na jednosměnný. Jednosměnný provoz je dále zapříčiněn (zejména v letních měsících) zvýšenou četností pracovních dovolených zaměstnanců firmy.



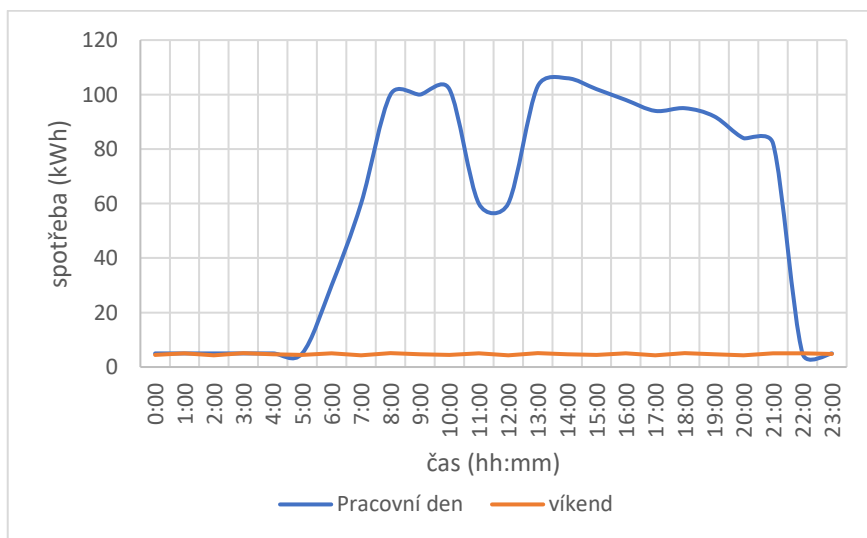
Obr. 34: Spotřeba uvažovaného objektu v jarních měsících



Obr. 35: Spotřeba uvažovaného objektu v letních měsících



Obr. 36: Spotřeba uvažovaného objektu v podzimních měsících



Obr. 37: Spotřeba uvažovaného objektu v zimních měsících

8.3 Cena elektrické energie

Cena elektřiny se skládá ze dvou hlavních složek – neregulované části (cena za silovou elektřinu) a regulované části, jejíž výši stanovuje Energetický regulační úřad. Tato regulovaná složka zahrnuje různé poplatky spojené s procesem výroby a distribuce elektřiny od elektrárny až po konečného spotřebitele. Regulovaná složka tvoří více než polovinu celkové ceny za MWh elektrické energie. [50]

Jednotlivé části regulované složky ceny elektřiny zahrnují:

Distribuční poplatky: Největší částí regulované složky jsou poplatky distribučním společnostem elektřiny. Tyto poplatky se mohou lišit v závislosti na regionu a distribuční společnosti, což přispívá k mírným odchylkám v ceně elektřiny mezi různými oblastmi. [50]

Poplatek za rezervovaný příkon: Tento poplatek se platí za rezervovanou kapacitu v elektrické síti, a to i v případě, že spotřeba energie není realizována. Jeho výše závisí na velikosti hlavního jističe. [50]

Příspěvek na výrobu z obnovitelných zdrojů energie: Tento příspěvek, který platí každý spotřebitel elektřiny, slouží k financování výkupní ceny energie z obnovitelných zdrojů. Jeho výše se nyní stanovuje podle kapacity hlavního jističe. [50]

Poplatek za systémové služby: Tyto poplatky pokrývají provoz České přenosové soustavy (ČEPS). [50]

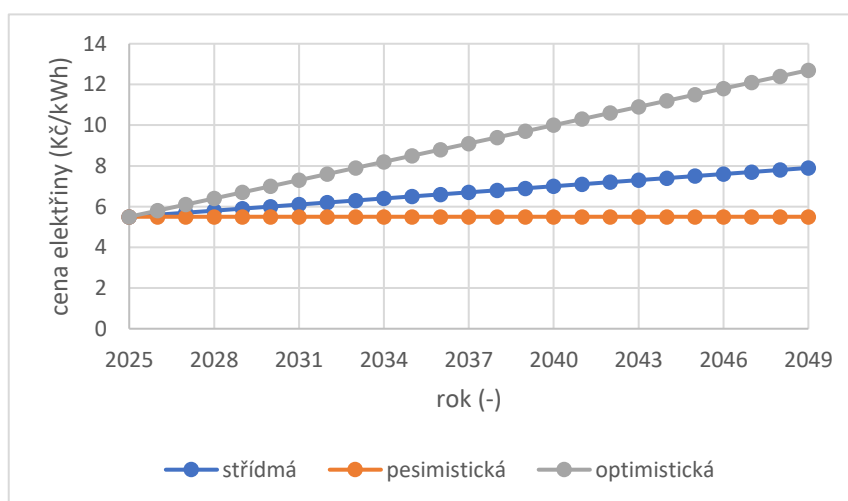
Poplatek operátorovi trhu: Malý poplatek určený společnosti Operátor trhu s elektřinou (OTE), která má na starosti administrativní úkony související s přechodem zákazníků k jiným dodavatelům. [50]

V následující tabulce je zobrazen přehled cen elektrické energie od roku 2021 do roku 2024 společnosti CICM s.r.o, která přehled pro potřeby této práce poskytla. V tabulce jsou rozepsány poplatky za jednotlivé položky, ze kterých se celková cena elektrické energie skládá.

Tab. 14: přehled cen elektrické energie společnosti CICM s.r.o v letech 2021 až 2024.

Rok		2021	2022	2023	2024
Služba	Mx	Cena (Kč/Mx)			
platba za dodávku el.	MWh	1663	2762	2767	3812
platba roční rez. kapacita	MW	176388	172735	172735	208881
platba za měsíční rez. kapacitu	MW	196119	198281	190839	228914
platba použití sítí	MWh	59,54	83,12	83,77	188,16
daň z elektřiny	MWh	28,30	28,3	28,30	28,3
platba za služby OTE za měsíc	/	3,91	4,2	3,43	4,3
platba za systémové služby	MWh	93,30	113,53	113,53	257,67
platba za dodávku jalové energie	Mvarh	440,00	440,00	440,00	440,00
platba za překročení měs. rez.kapacity	MW	294178,5	259102,5	297421,5	313321,5
platba za OZE- spotřeba silové energie v měsíci	MWh	495	495	495	495
platba za OZE- příkon- 290	MWh	51463,94	51463,94	51463,94	51463,94
Celková průměrná cena včetně DPH	kWh	4,5	5,44	5,11	7,59

Jak bylo již dříve zmíněno, cena elektrické energie je podmíněna mnoha proměnnými, jejichž předvídání na delší časové období, než několik let je velice obtížné. S ohledem na tuto skutečnost byly provedeny celkem tři predikce vývoje ceny elektrické energie pro společnost CICM s.r.o. na následujících 25 let: optimistická, pesimistická a střídá. Tyto predikce jsou vyobrazeny na Obr. 38.

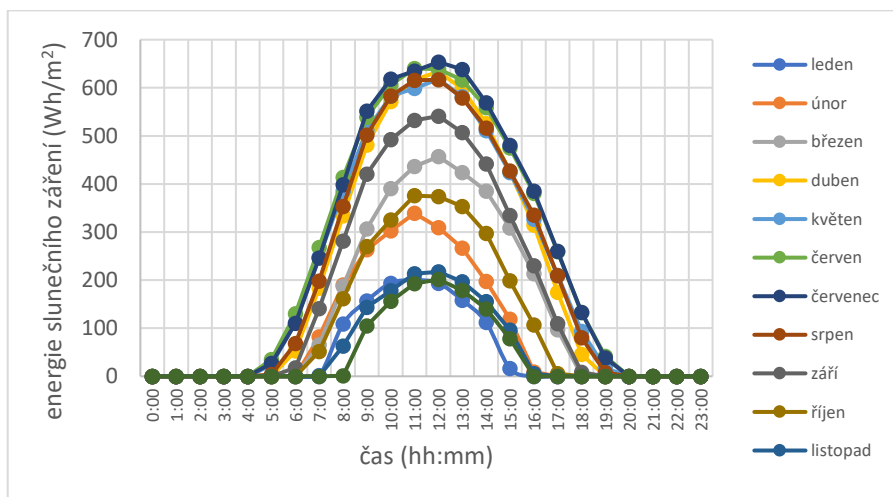


Obr. 38: průběh jednotlivých predikcí cen elektřiny pro rok 2025 až 2049

Významným aspektem provozu fotovoltaických elektráren je i cena, za kterou se prodává přebytečná elektřina do distribuční sítě v případech, kdy je produkce elektřiny vyšší než její spotřeba, která je nastavena na hodnotu 0,598 Kč/kWh. Tato cena je uvažována neměnná pro následujících 25 let. Takto nízká cena je nastavena distributorem vlivem zatěžování distribuční sítě při dodávání přebytečné elektřiny z FVE.

8.4 Množství vyprodukované elektrické energie

Podobně jako tomu bylo v kapitole 7.8 u ekologických ukazatelů, i zde je nutné znát množství slunečního ozáření, které v průběhu roku dopadá na plochu fotovoltaických panelů. Stejně jako tomu bylo výše, i zde byl použit software PVGIS.



Obr. 39: průběh slunečního záření typického dne pro každý měsíc v roce pro město Chyše, převzato [54]

Pro výsledný výpočet produkce elektrické energie z fotovoltaických panelů je použita sada vzorců z kapitoly 7.9.

8.5 Výpočet cenové bilance

$$CF_t = E_{S,t} \cdot C_{P,t} + E_{O,t} \cdot C_{S,t} - N_{P,t} \quad (9)$$

Kde $E_{S,t}$ je elektrická energie z FV panelů dodaná do sítě (kWh), $E_{O,t}$ je elektrická energie z FV panelů použitá pro napájení objektu, $C_{P,t}$ je cena elektřiny za výkup přetoků do distribuční sítě (Kč/kWh), $C_{S,t}$ je cena elektrické energie (Kč/kWh) a CF_t je peněžní tok v určitém roce životnosti investice (Kč) a $N_{P,t}$ jsou roční náklady (Kč).

8.6 Čistá současná hodnota

Čistá současná hodnota (ČSH), známá též jako NPV (Net Present Value), je hojně používaná a osvědčená metrika, která hodnotí ziskovost zamýšlené investice (v tomto případě fotovoltaická elektrárna). ČSH bere v potaz celou dobu životnosti projektu a časovou hodnotu peněz což znamená, že budoucí peněžní toky jsou diskontovány na jejich současnou hodnotu pomocí diskontní sazby. Výpočet ČSH závisí na předpokládaných peněžních tocích a alternativních nákladech. Podrobný popis výpočtu naleznete v rovnici (10). [10]

$$NPV = -IK + \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} \quad (10)$$

Kde NPV je čistá současná hodnota, IK je investiční kapitál, CF_t jsou peněžní toky v jednotlivých letech, n je doba životnosti projektu, r je diskontní úroková míra (pro potřeby této práce byla zvolena na hodnotu 5 %) a t je pořadí peněžních toků v daném roce.

Metoda ČSH umožňuje zahrnout do výpočtu veškeré peněžní toky projektu, jak příjmy, tak i výdaje. Výsledkem je absolutní hodnota přínosu investice v cenách přepočítaných k okamžiku uskutečnění investice. Kladná hodnota ČSH indikuje ziskový projekt, zatímco záporná hodnota značí projekt ztrátový. [10]

8.7 Chronologický postup ekonomické analýzy případové studie

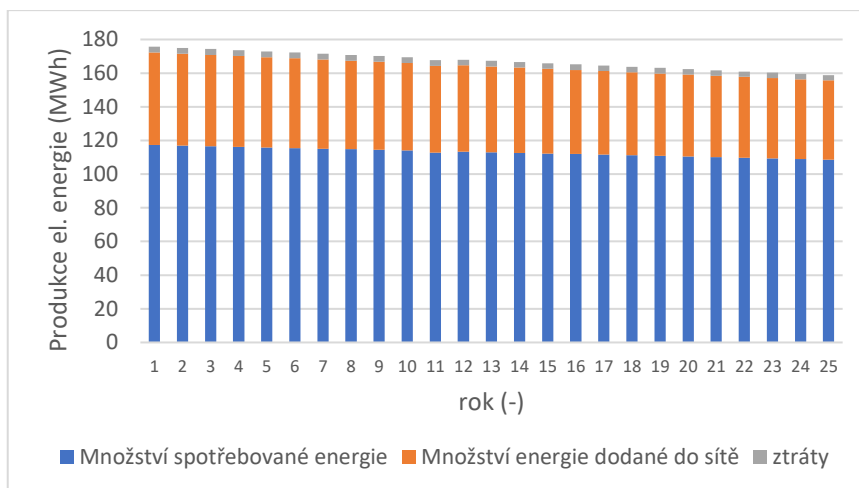
1. Stanovení celkové energie solárního záření, které dopadá na plochu FV panelů v hodinových intervalech pro celý rok za pomoci programu PVGIS. Při odhadu byl brán zřetel na úhel sklonu panelů (20°), jejich orientaci (přesně na jih) a nadmořskou výšku, která činí 458 metrů. (Stanovená energie zůstává stejná po celých 25 let)
2. Výpočet množství vyrobené elektrické energie pomocí fotovoltaických panelů (jejichž důležité parametry jsou zobrazeny v Tab.12) v závislosti na množství solárního záření a proměnlivé účinnosti panelů v průběhu hodinových intervalů během celého roku podle sady vzorců uvedených v kapitole 7.9 s ohledem na meziroční klesající účinnost panelů.
3. Stanovení spotřeby energie uvažovaného objektu, při respektování konkrétního dne v týdnu a ročního období (jaro, léto, podzim, zima) podle kapitoly 8.2 (spotřeba objektu zůstává stejná po celých 25 let).
4. Výpočet energetické bilance, při které se rozlišuje, jestli se elektrina využila pro napájení objektu nebo se dodala do distribuční sítě. Výpočet byl proveden v hodinových intervalech pro 1 rok (postup je zopakován pro následujících 25 let). Ve výpočtech jsou rovněž zahrnuty ztráty vlivem nedokonalé účinnosti použitých střídačů.
5. Predikce cen elektrické energie pro následujících 25 let až do roku 2049. (viz kapitola 8.3)
6. Výpočet cenové bilance podle vztahu (9).
7. Výpočet čisté současné hodnoty (ČSH) investice dle vztahu (10).

8.8 Výsledky ekonomického hodnocení

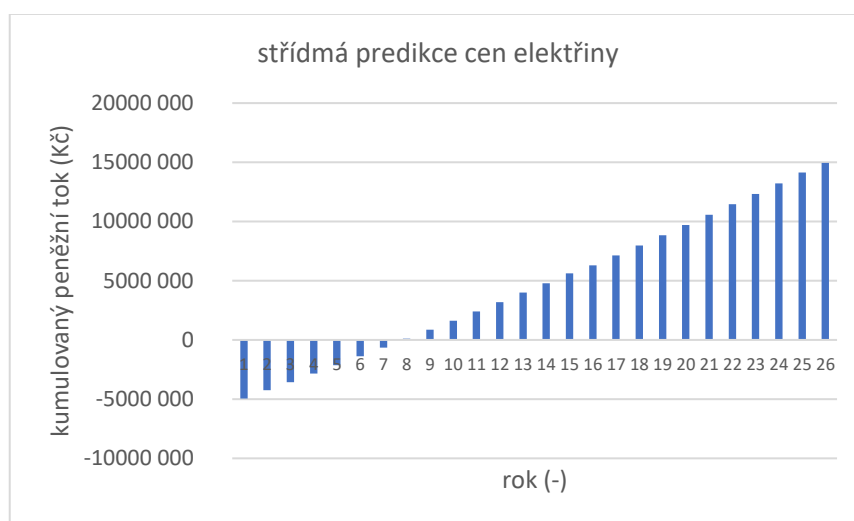
Tab. 15: Přehledová tabulka příjmů a výdajů FVE pro všechny 3 predikce cen elektřiny.

Rok (-)	náklady (Kč)	spotřebovaná elektřina (MWh)	elektřina dodaná do sítě (MWh)	střední predikce	pesimistická predikce	optimistická predikce
				Kumulovaný peněžní tok (Kč)	Kumulovaný peněžní tok (Kč)	Kumulovaný peněžní tok (Kč)
0	-4 950 000	0	0	-4 950 000	-4 950 000	-4 950 000
1	0	117,25	54,97	-4 257 786	-4 257 785	-4 257 785
2	0	116,90	54,64	-3 555 720	-3 567 760	-3 531 637
3	0	116,55	54,30	-2 843 876	-2 879 925	-2 771 777
4	0	116,20	53,97	-2 122 329	-2 194 280	-1 978 423
5	0	115,84	53,63	-1 391 150	-1 510 824	-1 151 798
6	0	115,49	53,29	-650 414	-829 559	-292 121
7	0	115,14	52,96	99 807	-150 483	600 388
8	0	114,78	52,63	859 414	526 382	1 525 479
9	0	114,42	52,29	1 628 333	1 201 036	2 482 929
10	0	114,07	51,96	2 406 519	1 873 479	3 472 513
11	0	112,72	51,63	3 193 839	2 543 710	4 494 010
12	0	113,35	51,30	3 990 247	3 211 730	5 547 196
13	0	113,00	50,97	4 795 671	3 877 538	6 631 849
14	0	112,64	50,64	5 610 034	4 541 135	7 747 746
15	-130 000	112,28	50,30	6 303 264	5 072 521	8 764 664
16	0	111,92	49,97	7 139 768	5 736 178	9 946 863
17	0	111,57	49,64	7 984 960	6 397 594	11 159 607
18	0	111,20	49,32	8 838 729	7 056 742	12 402 618
19	0	110,83	49,00	9 700 956	7 713 589	13 675 603
20	0	110,47	48,68	10 571 564	8 368 137	14 978 333
21	0	110,09	48,36	11 450 477	9 020 384	16 310 576
22	0	109,72	48,04	12 337 617	9 670 331	17 672 104
23	0	109,36	47,72	13 232 909	10 317 978	19 062 685
24	0	108,99	47,40	14 136 276	10 963 326	20 482 090
25	-750 000	108,61	47,08	14 297 640	10 856 373	21 180 089

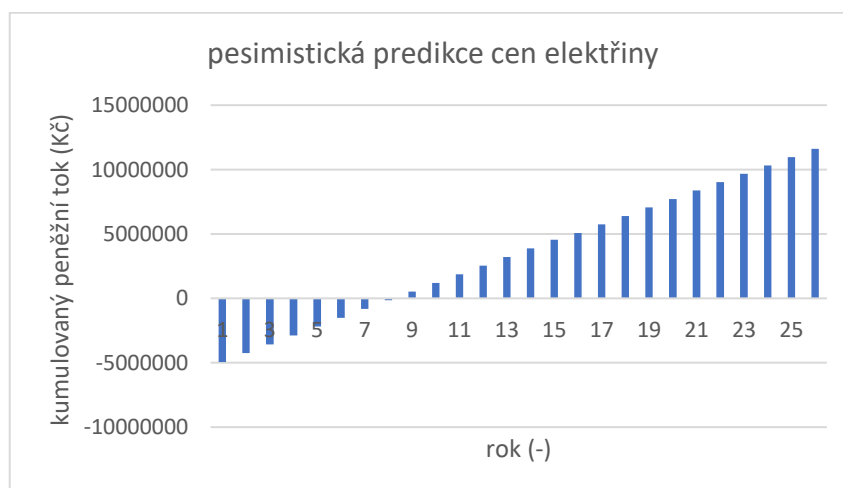
Z Tab. 15 je možné si všimnout dvou finančních nákladů (mimo počáteční investici v 0 roce). První byl proveden v 15 roce v celkové výši 130 000 Kč. Jedná se o investici do nových fotovoltaických střídačů, které mají záruku na funkčnost pouze 15 let. Ve 25 roce investice byla provedena demontáž a následná recyklace již dosloužených FV panelů. Částka na demontáž byla vyčíslena na 750 000 Kč (recyklační poplatek na panel je započítán v ceně panelů při jejich nákupu). Ve výpočtech je rovněž zahrnutá daň z příjmů, pokud zisk z prodeje přetoků elektrické energie přesáhne 30 000 Kč.



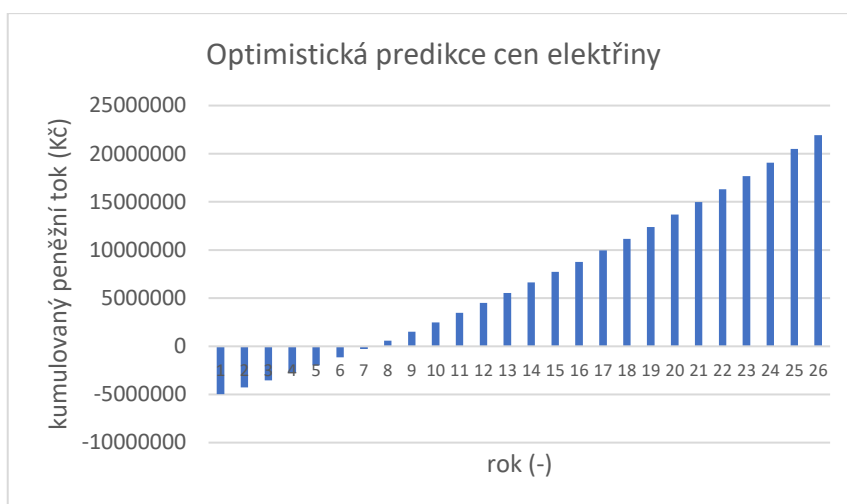
Obr. 40: Produkce el. energie FVE v jednotlivých letech celkové životnosti



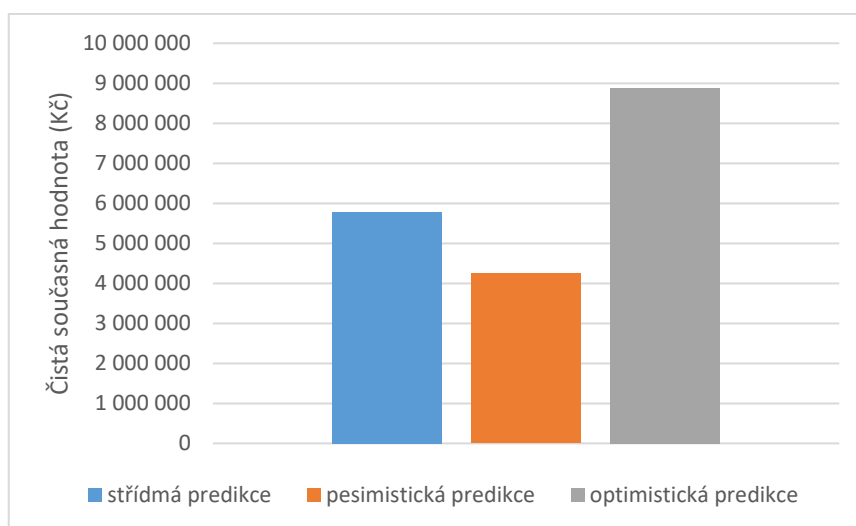
Obr. 41: Vývoj kumulovaného peněžního toku pro střídmapredikci cen elektřiny



Obr. 42: Vývoj kumulovaného peněžního toku pro pesimistickou predikci cen elektřiny

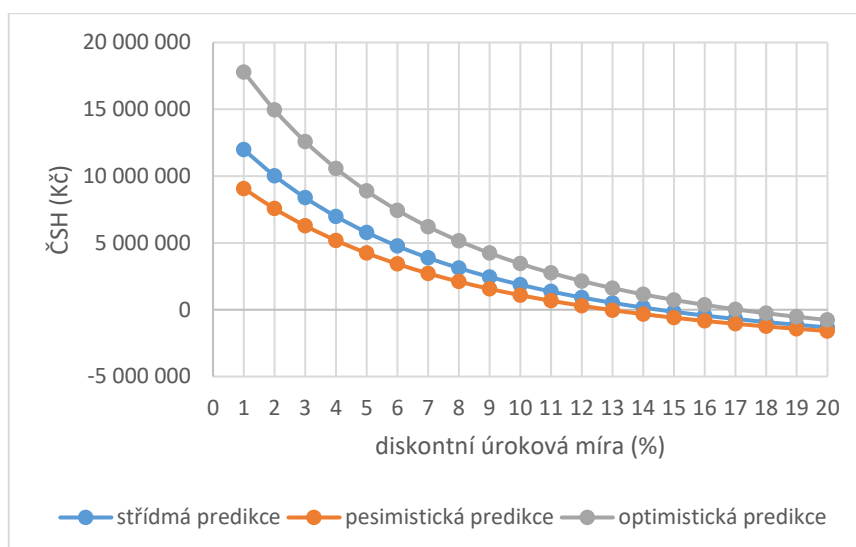


Obr. 43: Vývoj kumulovaného peněžního toku pro střídou predikci cen elektřiny



Obr. 44: Hodnoty čisté současné hodnoty pro všechny predikce cen elektřiny

Hodnota čisté současné hodnoty byla určena dle vztahu (10) a její výsledky je možné vidět na Obr. 44 pro všechny tři predikce cen elektrické energie v průběhu následujících 25 let. Hodnota ČSH tedy vyšla pro střídou predikci 5 790 663 Kč. Pro pesimistickou predikci vyšla 4 242 212 Kč a pro optimistickou predikci vývoje cen elektrické energie vyšla čistá současná hodnota celkově 8 887 512 Kč při uvažování 5 % diskontní úrokové míry. Investice do fotovoltaické elektrárny se při stanovených podmínkách zdá být rentabilní pro všechny 3 odhady cen elektrické energie. Tyto výsledky však platí pouze v případě konstantní hodnoty diskontní úrokové míry. Je však více než pravděpodobné, že se bude tato hodnota v průběhu let měnit. Z toho důvodu byla dále vypracovaná citlivostní analýza, která bude zkoumat změnu čisté současné hodnoty v závislosti na změně diskontní úrokové míry. Výsledky této analýzy jsou vidět na Obr. 45.



Obr. 45: závislost ČSH na diskontní úrokové míře

Z grafu je patrné, že s rostoucí diskontní úrokovou mírou se snižuje ČSH. Pro střední predikci cen elektřiny se investice stává nevýhodnou v případě, že diskontní úroková míra dosáhne hodnoty 15 %. Při pesimistickém odhadu cen elektřiny se investice stává nevýhodnou pro 13 % diskontní úrokovou mírou. Nejlépe pochopitelně vychází optimistická predikce cen elektřiny, při které se investice stává nerentabilní až při 18 % diskontu. Je potřeba zmínit, že diskontní úroková míra nikdy v historii České republiky nepřesáhla hodnotu 13 %. [59]. Investici do fotovoltaické elektrárny s výše zmíněnými, nadefinovanými parametry je v tomto konkrétním případě možné doporučit ke zrealizování, neboť jediná možnost, jak by se investice stala nerentabilní je v případě, že diskontní úroková míra dosáhne hranici 13 %, což se v historii ČR stalo pouze jednou (v roce 1997).

Závěr

Tato diplomová práce se zabývala ekologickou a ekonomickou analýzou technologie fotovoltaických panelů. Nejprve byl vysvětlen základní princip funkce jednotlivých částí fotovoltaické elektrárny. Jsou zde vysvětleny fyzikální principy nutné pro pochopení funkce fotovoltaických panelů. Dále je zde popsán základní princip funkce fotovoltaického střídače a jsou zde vypsány důležité parametry akumulátorů, které se ve spojení s fotovoltaickými panely často využívají. Následně byl popsán podrobný postup výroby solárních panelů monokrystalického a polykrystalického typu.

Další část této práce se zabývala ekologickou analýzou fotovoltaických panelů. K tomu byla využita metoda LCA (life cycle assessment), která je blíže popsána v kapitole 7. V rámci této analýzy byly představeny a vyhodnoceny metody jako je: doba energetické návratnosti panelů (EPBT), návratnost energetické investice (EROI), uhlíková stopa (CF) a doba uhlíkové návratnosti (CPBT). Pro zhodnocení LCA bylo nejprve nutné stanovit energetickou a uhlíkovou náročnost výroby vybraných typů fotovoltaických panelů (monokrystal, polykrystal, CdTe a CIGS). Dále se stanovila celková energie slunečního záření ve vybrané lokalitě o stanovených parametrech. Následně se vypočetla roční produkce elektrické energie jednotlivých typů FV panelů. Výsledky všech čtyř použitých metod jsou vypsány v kapitole 7.11.

V případě vyhodnocení EPBT vyšel nejlépe CIGS panel, jehož doba energetické návratnosti byla stanovena na hodnotu 0,72 roku. O něco hůře skončil CdTe panel, který má dobu energetické návratnosti 2,35 let. Monokrystalický panel se potom zastavil na hodnotě 6,04 let. Nejhůře v této metodě dopadl polykrystalický panel s celkovou dobou energetické návratnosti 6,61 let.

V případě vyhodnocení EROI dopadl nejlépe CIGS panel, který má zdaleka nejvyšší návratnost energetické investice s hodnotou 19,47. O poznání hůře dopadl CdTe panel s hodnotou 5,94. Monokrystalický panel má návratnost energetické investice ve výši 3,64. Nejhůře potom dopadl panel polykrystalický s hodnotou EROI 3,33.

Při vyhodnocení CPBT se zjistilo, že nejvýznamnější dobou uhlíkové návratnosti disponuje monokrystalický panel. CPBT hodnota tohoto typu panelu vyšla na 1,59 let. Těsně za ním skončil polykrystalický panel s hodnotou uhlíkové návratnosti 1,54 let. CIGS panel potom dle provedených výpočtů dosahuje 1,32 roku. Nejhůře skončil panel CdTe s hodnotou CPBT 0,68 let.

Nejnižší uhlíkovou stopou potom disponuje panel CdTe panel s hodnotou 20,24 g CO₂/kWh. Následuje panel polykrystalického typu s hodnotou 28,93 g CO₂/kWh. Těsně za ním skončil monokrystalický panel s uhlíkovou stopou 29,84 g CO₂/kWh. Nejhůře v tomto vyhodnocení dopadl CIGS panel s hodnotou uhlíkové stopy 39,15 g CO₂/kWh.

Tyto výše zmíněné hodnoty však platí pouze pro úhel sklonu 35 ° jednotlivých panelů. Z toho důvodu byla zpracována citlivostní analýza, která se zabývala změnami výsledků výše zmíněných ekologických ukazatelů v závislosti na změně úhlu sklonu panelů. Výsledky této citlivostní analýzy je možné vidět v Tab. 10 a Tab. 11.

Poslední část této práce se zabývala ekonomickou analýzou instalace fotovoltaické elektrárny o velikosti 192,5 kWp na budovu společnosti CICM s.r.o. Pro správné zhodnocení této elektrárny byla nejprve zvolena metoda ekonomické analýzy, která nese název čistá současná hodnota (ČSH). Dále bylo potřeba stanovit jednotlivé proměnné, které ovlivňují výši peněžních toků. Výše peněžních toků je silně ovlivněna energetickou bilancí uvažovaného objektu. Pro správné stanovení peněžních toků bylo nutné provést výpočet produkce elektřiny z uvažované fotovoltaické elektrárny se zřetelem na stanovené parametry. Dalším klíčovým parametrem bylo určení spotřeby elektřiny objektu, která byla rozdělena s ohledem na roční období a konkrétní den v týdnu. Aby bylo možné provést výpočet produkce elektrické energie bylo zapotřebí stanovit množství solárního ozáření v lokalitě, ve které se objekt skutečně nachází. Následně byly provedeny celkově 3 predikce cen elektrické energie na 25 let dopředu (střední, optimistická a pesimistická).

Výsledky ČSH je možné vidět v kapitole 8.8. Hodnota ČSH pro střední predikci vyšla 5 790 663 Kč. Pro pesimistickou predikci vyšla 4 242 212 Kč a pro optimistickou predikci vývoje cen elektrické energie vyšla čistá současná hodnota celkově 8 887 512 Kč při uvažování 5 % diskontní úrokové míry. Existuje však určitá pravděpodobnost, že diskontní úroková míra nezůstane po následujících 25 let konstantní. Z toho důvodu tak byla vypracována citlivostní analýza, která se zabývala změnou čisté současné hodnoty v závislosti na změně diskontní úrokové míry. Z výsledků je patrné, že diskontní úroková míra by musela vzrůst alespoň na 13, 15 nebo 18 % v závislosti na druhu predikce cen elektřiny, a to se v historii ČR stalo pouze jednou (13 % v roce 1997). Investice do FVE se tak může doporučit a označit za rentabilní.

Seznam obrázků

Obr. 1: PN přechod, převzato z [10].....	8
Obr. 2: Princip fotoelektrického jevu [11].....	9
Obr. 3: Fotovoltaický článek [12].....	10
Obr. 4: Monokrystal s hlavou, tělem a špicí vyroben Czchoralskiho metodou, převzato z [15]	12
Obr. 5: princip Czchoralskiho metody [17].....	13
Obr. 6: Princip broušení hrany křemíkové desky, převzato z [19].....	14
Obr. 7: Schematické znázornění účinnosti zachycení záření u rovného povrchu (a) a u povrchu s texturou (b) [18].....	14
Obr. 8: Křemíková pec pro difúzi [16]	15
Obr. 9: struktura fotovoltaického článku [18]	16
Obr. 10: Monokrystalický článek [23]	17
Obr. 11: Polykrystalický článek [24].....	18
Obr. 12: Tenkovrstvý článek [25].....	19
Obr. 13: schéma krystalové struktury perovskitu [26]	20
Obr. 14: Průřez perovskitového článku [26]	20
Obr. 15: složení solárního panelu [10]	21
Obr. 16: azimut a zenit FV panelu [10]	22
Obr. 17: princip střídače [27]	23
Obr. 18: princip PWM [28]	23
Obr. 19: princip zapojení FV střídačů [31].....	24
Obr. 20: Závislost ztráty kapacity na počtu cyklů pro 11 baterií typu Li-Pol, převzato [51]	26
Obr. 21: Závislost ztráty kapacity na počtu cyklů při různých hloubkách vybití pro NMC, převzato [52].....	26

Obr. 22: Závislost ztráty kapacity na počtu cyklů při různých hloubkách vybití pro LiFePO ₄ , převzato [52].....	27
Obr. 23: Zapojení off-grid systému [35]	28
Obr. 24: zapojení on-grid systému [35].....	29
Obr. 25: zapojení hybridního systému [35]	29
Obr. 26: průběh slunečního záření typického dne pro každý měsíc v roce pro danou oblast [41]	37
Obr. 27: graf roční produkce elektrické energie za jeden rok pro všechny 4 druhy FV panelů	40
Obr. 28: Doba energetické návratnosti jednotlivých druhů FV panelů.....	41
Obr. 29: Návratnost energetické investice jednotlivých druhů FV panelů.....	41
Obr. 30: Doba uhlíkové návratnosti jednotlivých druhů FV panelů	42
Obr. 31: Výsledná uhlíková stopa jednotlivých druhů FV panelů	42
Obr. 32: letecký pohled na objekt společnosti CICM s.r.o.....	46
Obr. 33: Schématické zobrazení objektu společnosti CICM s.r.o.....	46
Obr. 34: Spotřeba uvažovaného objektu v jarních měsících	47
Obr. 35: Spotřeba uvažovaného objektu v letních měsících	48
Obr. 36: Spotřeba uvažovaného objektu v podzimních měsících	48
Obr. 37: Spotřeba uvažovaného objektu v zimních měsících	48
Obr. 38: průběh jednotlivých predikcí cen elektřiny pro rok 2025 až 2049.....	50
Obr. 39: průběh slunečního záření typického dne pro každý měsíc v roce pro město Chyšce	51
Obr. 40: Produkce el. energie FVE v jednotlivých letech celkové životnosti.....	55
Obr. 41: Vývoj kumulovaného peněžního toku pro střídou predikci cen elektřiny	55
Obr. 42: Vývoj kumulovaného peněžního toku pro střídou predikci cen elektřiny	55
Obr. 43: Vývoj kumulovaného peněžního toku pro střídou predikci cen elektřiny	56
Obr. 44: Hodnoty čisté současné hodnoty pro všechny predikce cen elektřiny	56

Obr. 45: závislost ČSH na diskontní úrokové míře 57

Seznam tabulek

Tab. 1: Energetická náročnost při výrobě polykrystalického a monokrystalického FV panelu. [38], [39], [40], [36].....	32
Tab. 2: energetická náročnost při výrobě tenkovrstvého FV panelu. [48]	32
Tab. 3: Množství vyprodukovaného CO ₂ při výrobě polykrystalického a monokrystalického FV panelu. [37], [43], [44].....	34
Tab. 4: Množství vyprodukovaného CO ₂ při výrobě CdTe a CIGS tenkovrstvého fotovoltaického panelu. [45].....	35
Tab. 5: Klíčové parametry vybraného polykrystalického panelu.....	35
Tab. 6: Klíčové parametry vybraného monokrystalického panelu.....	36
Tab. 7: Klíčové parametry vybraného tenkovrstvého CdTe panelu.....	36
Tab. 8: Klíčové parametry vybraného tenkovrstvého CIGS panelu.....	36
Tab. 9: Výsledky EPBT, EROI, CPBT a CF pro zvolené typy fotovoltaických panelů.	40
Tab. 10: výsledky citlivostní analýzy (1. část)	44
Tab. 11: výsledky citlivostní analýzy (2. část)	44
Tab. 12: Technické specifikace vybraných FV panelů.....	45
Tab. 13: Technické specifikace vybraného třífázového měniče.....	46
Tab. 14: přehled cen elektrické energie společnosti CICM s.r.o v letech 2021 až 2024. ...	50
Tab. 15: Přehledová tabulka příjmů a výdajů FVE pro všechny 3 predikce cen elektřiny.	54

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Zilvar, M. J. (2020, June 17). *Klimatické změny a globální oteplování*. TZB-info. [online]. 2023 [03.05.2023] Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/klimaticke-zmeny/20816-klimaticke-zmeny-a-globalni-oteplovani>
- [2] CIUCCI, Mateo a EVROPSKÝ PARLAMENT. Obnovitelná energie. Průmyslová politika a politika výzkumu [online]. 2023 [03.05.2023]. Dostupné z: <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/cs/sheet/70/renewable-energy>
- [3] Ali, M. H. (2017). *Wind Energy Systems: Solutions for Power Quality and Stabilization*. Taylor & Francis Group.
- [4] Rediske, G., Burin, H. P., Rigo, P. D., Rosa, C. B., Michels, L., & Siluk, J. C. M. (2021). Wind power plant site selection: A systematic review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 148, 111293. [online]. 2023 [03.05.2023]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111293>
- [5] Kougiyas, I., Aggidis, G., Avellan, F., Deniz, S., Lundin, U., Moro, A., Muntean, S., Novara, D., Pérez-Díaz, J. I., Quaranta, E., Schild, P., & Theodossiou, N. (2019). Analysis of emerging technologies in the hydropower sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113, 109257. [online]. 2023 [03.05.2023]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109257>
- [6] Costea, G., Pusch, M. T., Bănăduc, D., Cosmoiu, D., & Curtean-Bănăduc, A. (2021). A review of hydropower plants in Romania: Distribution, current knowledge, and their effects on fish in headwater streams. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145, 111003. [online]. 2023 [03.05.2023]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111003>
- [7] Dickson, M. H., & Fanelli, M. (2013). *Geothermal Energy: Utilization and Technology*. Taylor & Francis Group.
- [8] Lund, J. W., & Toth, A. N. (2021). Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review. *Geothermics*, 90, 101915. [online]. 2023 [03.05.2023]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101915>
- [9] Fyzikální principy - Energetika zblízka - Svět energie.cz. *Svět Energie - Svět energie.cz* [online]. Copyright © luchschenF [cit. 03.05.2023]. Dostupné

- z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/obnovitelne-zdroje-energie/slunecni-elektrarny-podrobne/fotovoltaicke-clanky-a-panely/fyzikalni-principy>
- [10] Bc. Vojtěch Mészáros. *Ekonomické zhodnocení integrace bateriového úložiště u domácích fotovoltaických instalací* [online]. Copyright © [cit.03.05.2023]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/48936/1/Bakalarska%20prace%20Vojtech%20Meszaros.pdf>
- [11] Fotoelektrický jev (článek) | Khan Academy. *Khan Academy | Bezplatné online kurzy, lekce a cvičení* [online]. Copyright © 2023 Khan Academy [cit.03.05.2023]. Dostupné z: <https://cs.khanacademy.org/science/obecna-chemie/xfed2aace53b0e2de:atomy-a-jejich-vlastnosti/xfed2aace53b0e2de:fotoelektronova-spektroskopie/a/photoelectric-effect>
- [12] Fotovoltaický článek. ČEZ [online]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k32.htm>
- [13] Příspěvatelé projektů Wikimedia. (2008, May 18). Czochralského metoda – Wikipedie. Wikipedie, otevřená encyklopedie. https://cs.wikipedia.org/wiki/Czochralského_metoda
- [14] *Czochralski Process*. (2022, November 24). Encyclopedia MDPI | Scholarly Community. <https://encyclopedia.pub/entry/36346>
- [15] *Czochralski method - Solid State Chemistry @Aalto - Aalto University Wiki*. (n.d.). Dashboard - Aalto University Wiki. <https://wiki.aalto.fi/display/SSC/Czochralski+method>
- [16] Contributors to Wikimedia projects. (2003, January 27). *Czochralski method - Wikipedia*. Wikipedia, the free encyclopedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Czochralski_method
- [17] *Crystal growing* | Crytur.cz [Image]. (n.d.). Integrated crystal based solutions | Crytur.cz. <https://www.crytur.com/technologies/crystal-growing/>
- [18] Bc. Barbora Mojerová. *VYUŽITÍ MĚŘICÍ METODY SPM V TECHNOLOGII VÝROBY KRYSTALICKÝCH SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ*. Vysoké učení technické v Brně 2013 [online] Copyright © [cit.17.11.2023]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=68441

- [19] VPS, s.r.o. *Od křemene ke křemikové desce: Výroba monokrystalů a křemikových desek. Piešťany, březen 2002.* Interní firemní materiál zpřístupněný firmou ON Semiconductor
- [20] *SOLÁRNÍ ENERGIE.* (n.d.). Skupina ČEZ. <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k41.htm>
- [21] Moravec, J. (2017, March 8). *Polovodiče: Fotovoltaické články z krystalického křemíku a tenkovrstvé články.* oEnergetice.cz. <https://oenergetice.cz/elektrina/polovodice-fotovoltaicke-clanky-krystalickeho-kremiku-tenkovrstve-clanky>
- [22] Photovoltaic Types of PV Cells that Make Solar Panels. *Alternative Energy Tutorials is Clean and Green Energy* [online]. Dostupné z: <https://www.alternative-energy-tutorials.com/photovoltaics/photovoltaic-types.html>
- [23] Bailey, E. (2023, September 3). *Efficiency Of Monocrystalline Solar Panels: A Comprehensive Guide To Maximizing Solar Power.* [online] [cit. 10.03.2024]. Dostupné z: <https://solvoltaics.com/efficiency-of-monocrystalline-solar-panels/>
- [24] Mono Solar Cells for PV Manufacturers | Targray. *Sustainable Commodities and Supply Chain Solutions / Targray* [online]. Dostupné z: <https://www.targray.com/solar/solar-silicon/solar-cells/monocrystalline>
- [25] Free download | Monocrystalline silicon Solar cell Solar Panels Polycrystalline silicon voltaics, purple, solar Cell png | PNGEgg. *PNGEgg - Exclusive sticker png images* [online]. Dostupné z: <https://www.pngegg.com/en/png-eysxk/download>
- [26] [online]. Dostupné z: <https://www.amazon.com/Flexible-Solar-Battery-Charger-Translucent/dp/B07D6ZSGX8>
- [27] Perovskite Solar Cell - Clean Energy Institute. *Clean Energy Institute* [online]. Copyright © 2020 [cit. 03.05.2023]. Dostupné z: <https://www.cei.washington.edu/education/science-of-solar/perovskite-solar-cell/>
- [28] Samantaray, N., Parida, B., Soga, T., Sharma, A., Kapoor, A., Najar, A., & Singh, A. (2022). *Recent Development and Directions in Printed Perovskite Solar Cells. physica status solidi (a)*, 219(6), 2100629. [online]. [cit. 12.05.2024]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/pssa.202100629>

- [29] Lekesi, L. P., Koao, L. F., Motloung, S. V., Motaung, T. E., & Malevu, T. (2022). *Developments on Perovskite Solar Cells (PSCs): A Critical Review*. *Applied Sciences*, 12(2), 672. [online]. [cit. 12.05.2024]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app12020672>
- [30] Shaikh, J. S., Shaikh, N. S., Sheikh, A. D., Mali, S. S., Kale, A. J., Kanjanaboos, P., Hong, C. K., Kim, J. H., & Patil, P. S. (2017). *Perovskite solar cells: In pursuit of efficiency and stability*. *Materials & Design*, 136, 54–80. [online]. [cit. 12.05.2024]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.09.037>
- [31] Li, X., Ibrahim Dar, M., Yi, C., Luo, J., Tschumi, M., Zakeeruddin, S. M., Nazeeruddin, M. K., Han, H., & Grätzel, M. (2015). *Improved performance and stability of perovskite solar cells by crystal crosslinking with alkylphosphonic acid ω -ammonium chlorides*. *Nature Chemistry*, 7(9), 703–711. [online]. [cit. 12.05.2024]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/nchem.2324>
- [32] Chen, Y., Zhang, L., Zhang, Y., Gao, H., & Yan, H. (2018). *Large-area perovskite solar cells – a review of recent progress and issues*. *RSC Advances*, 8(19), 10489–10508. [online]. [cit. 12.05.2024]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1039/c8ra00384j>
- [33] Noel, N. K., Stranks, S. D., Abate, A., Wehrenfennig, C., Guarnera, S., Haghighirad, A.-A., Sadhanala, A., Eperon, G. E., Pathak, S. K., Johnston, M. B., Petrozza, A., Herz, L. M., & Snaith, H. J. (2014). *Lead-free organic–inorganic tin halide perovskites for photovoltaic applications*. *Energy Environ. Sci.*, 7(9), 3061–3068. [online]. [cit. 12.05.2024]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1039/c4ee01076k>
- [34] Solar inverters explained | Roofit.Solar. *Integrated Solar Roof | Nordic Design | Roofit.solar* [online]. Dostupné z: <https://roofit.solar/solar-inverters-explained/>
- [35] Simulate pulse width modulation (PWM) output from hardware - Simulink. *MathWorks - Makers of MATLAB and Simulink - MATLAB & Simulink* [online]. Copyright © 1994 [cit. 03.05.2023]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/soc/ref/pwminterface.html>

- [36] Solar inverters explained | Roofit.Solar. *Integrated Solar Roof | Nordic Design / Roofit.solar* [online]. [cit. 03.05.2023]. Dostupné z: <https://roofit.solar/solar-inverters-explained/>
- [37] What Are The Different Types of Solar Inverters? - Explained. *Oregon's Best Local Solar Company - Green Ridge Solar* [online]. Copyright © 2022 [cit. 03.05.2023]. Dostupné z: <https://greenridgesolar.com/types-of-solar-inverters/>
- [38] Micro-Inverters vs. String Inverters - What's the Difference?. *New Mexico Solar Panel Company | Positive Energy Solar* [online]. Copyright © All Rights Reserved. [online]. [cit. 03.05.2023]. Dostupné z: <https://www.positiveenergysolar.com/blog/2021/march/micro-inverters-vs-string-inverters-whats-the-di/>
- [39] Lithium polymerová baterie *Wikipedia.org* [online]. 2024 [cit. 29.04.2024]. Dostupné z: [Lithium-polymerová baterie – Wikipedie \(wikipedia.org\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Lithium-polymerov%C3%A1_baterie)
- [40] Lithium iron phosphate battery. *Wikipedia.org* [online] [cit.18.04. 2024]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium_iron_phosphate_battery
- [41] BU-205: Types of Lithium-ion. *Batteryuniversity.cz* [online]. 2024 [cit. 12.05.2024]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>
- [42] FOTOVOLTAIKA - Tzb-energ. *Tzb-energ* [online]. [cit. 12.05.2024]. Dostupné z: <https://www.tzb-energ.cz/fotovoltaika.html>
- [43] Seyed Mohammad Emami Razavi, Mohammad Hossein Jahangir*, Soroush Mousav. *A Review Study About Photovoltaic Systems and the Energy Payback Time Calculation for Selected Modules. Journal of Renewable Energy and Environment.* [online]. [cit. 12.05.2024]. Dostupné z: <https://doi.org/10.30501/jree.2019.100263>
- [44] Müller, A., Friedrich, L., Reichel, C., Herceg, S., Mittag, M., & Neuhaus, D. H. (2021). *A comparative life cycle assessment of silicon PV modules: Impact of module design, manufacturing location and inventory. Solar Energy Materials and Solar Cells, 230, 111277.* [online]. [cit. 12.05.2024]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111277>
- [45] Wong, J. H., Royapoor, M., & Chan, C. W. (2016). *Review of life cycle analyses and embodied energy requirements of single-crystalline and multi-crystalline silicon photovoltaic systems. Renewable and Sustainable Energy*

- Reviews*, 58, 608–618. [online]. [cit. 12.05.2024]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.241>
- [46] Tripathy, M., Joshi, H., & Panda, S. K. (2017). *Energy payback time and life-cycle cost analysis of building integrated photovoltaic thermal system influenced by adverse effect of shadow*. *Applied Energy*, 208, 376–389. [online]. [cit. 12.05.2024]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.025>
- [47] Wu, P., Ma, X., Ji, J., & Ma, Y. (2017). *Review on Life Cycle Assessment of Energy Payback of Solar Photovoltaic Systems and a Case Study*. *Energy Procedia*, 105, 68–74. [online]. [cit. 12.05.2024]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.281>
- [48] Prabhu, V. S., Shrivastava, S., & Mukhopadhyay, K. (2021). *Life Cycle Assessment of Solar Photovoltaic in India: A Circular Economy Approach*. *Circular Economy and Sustainability*. [online]. [cit. 12.05.2024]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s43615-021-00101-5>
- [49] *Emisní faktor CO₂ z výroby elektřiny za léta 2010–2022 | MPO. (n.d.). Ministerstvo průmyslu a obchodu*. [online]. [cit. 10.03.2024]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/energetika/statistika/elektrina-a-teplo/emisni-faktor-co2-z-vyroby-elektřiny-za-leta-2010-2022--273197>
- [50] Yuan, L., Nain, P., Kothari, M., & Anctil, A. (2024). *Material intensity and carbon footprint of crystalline silicon module assembly over time*. *Solar Energy*, 269, 112336. [online]. [cit. 12.05.2024]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112336>
- [51] Tsuchiya, Y., Swai, T. A., & Goto, F. (2020). *Energy payback time analysis and return on investment of off-grid photovoltaic systems in rural areas of Tanzania*. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 42, 100887. [online]. [cit. 12.05.2024]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100887>
- [52] Leccisi, E., Rauegi, M., & Fthenakis, V. (2016). *The Energy and Environmental Performance of Ground-Mounted Photovoltaic Systems—A Timely Update*. *Energies*, 9(8), 622. [online]. [cit. 12.05.2024]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/en9080622>
- [53] *JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission. (n.d.). JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) -*

- European Commission. [online]. [cit. 12.05.2024]. Dostupné z: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#MR
- [54] Výpočet produkce energie pomocí fotovoltaických panelů. TZB-info.cz [online]. [cit. 10.03.2024]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/13878-zjednodusen-y-bilancni-vypocet-rocnich-prinosu-fotovoltaickych-instalaci>
- [55] (MARISKA) DE WILD-SCHOLTEN, M.J. Energy payback time and carbon footprint of commercial photovoltaic systems. Online. Solar Energy Materials and Solar Cells. 2013, roč. 119, s. 296-305. ISSN 09270248. [online] [cit. 2024-03-12]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.08.037>.
- [56] *Z čeho se skládá cena elektřiny | Elektřina | EON.* [online] [cit. 10.03.2024]. Dostupné z: <https://www.eon.cz/radce/uspورا-energie/uspory-elektřiny-a-plynu/z-čeho-se-sklada-cena-elektřiny>
- [57] Battery University. (n.d.). BU-808: How to Prolong Lithium-based Batteries. Retrieved [cit. 10.03.2024]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-808-how-to-prolong-lithium-based-batteries>
- [58] Preger, Y., Barkholtz, H. M., Fresquez, A., Campbell, D. L., Juba, B. W., Román-Kustas, J., Ferreira, S. R., & Chalamala, B. (2020). Degradation of Commercial Lithium-Ion Cells as a Function of Chemistry and Cycling Conditions. *Journal of The Electrochemical Society*, 167(12), 120532. [online]. [cit. 12.05.2024]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1149/1945-7111/abae37>
- [59] *Jak se vyvíjela diskontní sazba ČNB? - Česká národní banka.* (n.d.). Česká národní banka. [online] [cit. 10.03.2024]. Dostupné z: <https://www.cnb.cz/cs/casto-kladene-dotazy/Jak-se-vyvijela-diskontni-sazba-CNB/>
- [60] Lavagna, L., Meligrana, G., Gerbaldi, C., Tagliaferro, A., & Bartoli, M. (2020). Graphene and Lithium-Based Battery Electrodes: A Review of Recent Literature. *Energies*, 13(18), 4867. [online] [cit. 10.03.2024]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/en13184867>
- [61] Liang, Y., Zhao, C., Yuan, H., Chen, Y., Zhang, W., Huang, J., Yu, D., Liu, Y., Titirici, M., Chueh, Y., Yu, H., & Zhang, Q. (2019). A review of rechargeable batteries for portable electronic devices. *InfoMat*, 1(1), 6–32. [online] [cit. 10.03.2024]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/inf2.12000>

Přílohy

Příloha 1: Tabulka průměrné teploty okolního vzduchu v hodinových intervalech pro typický den v měsíci. Důležité pro výpočet vztahu (7) v kapitole 7.9.	II
Příloha 2: Tabulka průměrné teploty okolního vzduchu v hodinových intervalech pro typický den v měsíci. Důležité pro výpočet vztahu (7), na který se odkazuje kapitola 8.4.	III
Příloha 3: Tabulka energie slunečního záření, která byla určena v kapitole 7.8.	IV
Příloha 4: Tabulka energie slunečního záření, která byla určena v kapitole 8.4.	V
Příloha 5: Technické parametry CdTe panelu použité pro výpočet ekologických ukazatelů v kapitole 7.	VI
Příloha 6: Technické parametry CIGS panelu použité pro výpočet ekologických ukazatelů v kapitole 7.	VII
Příloha 7: Technické parametry monokrystalického panelu použité pro výpočet ekologických ukazatelů v kapitole 7.	VIII
Příloha 8: Technické parametry polykrystalického panelu použité pro výpočet ekologických ukazatelů v kapitole 7.	IX
Příloha 9: Technické parametry fotovoltaického střídače použité pro výpočet ekonomického hodnocení v kapitole 8.	X
Příloha 10: Technické parametry monokrystalického panelu použité pro výpočet ekonomického vyhodnocení v kapitole 8.	XI

Příloha 1: Tabulka průměrné teploty okolního vzduchu v hodinových intervalech pro typický den v měsíci. Důležité pro výpočet vztahu (7) v kapitole 7.9.

Teplota okolního vzduchu (°C)												
Čas/měsíc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5	/	/	/	/	7,35	11,4	13,53	12,98	9,71	/	/	/
6	/	/	/	3,45	9,25	13,27	15,37	14,03	10,15	/	/	/
7	/	-2,15	0,03	4,62	11,16	15,02	17,30	15,62	10,84	6,08	/	/
8	-2,04	-2,38	1,35	8,50	12,56	16,16	18,56	17,27	12,54	6,98	2,59	-0,44
9	-1,56	-1,55	2,95	9,76	13,76	17,28	19,88	18,51	14,18	8,01	3,03	-0,15
10	-0,14	-0,48	4,19	10,93	14,78	18,20	20,83	19,61	15,37	9,09	3,85	0,46
11	0,19	0,77	5,20	11,91	15,60	18,94	21,61	20,52	16,37	10,08	4,66	1,15
12	0,66	1,35	5,65	12,42	15,52	19,19	21,73	21,04	16,69	10,37	4,77	1,58
13	0,85	1,67	6,27	12,95	15,96	19,58	22,15	21,48	17,19	10,93	5,22	1,94
14	0,69	2,09	6,58	13,24	16,17	19,82	22,40	21,74	17,44	11,19	5,40	2,04
15	0,24	1,74	6,75	13,98	16,32	19,74	22,18	21,57	17,32	11,50	5,74	1,76
16	-0,39	0,98	6,45	13,13	16,12	19,62	22,05	21,32	17,04	11,05	5,15	1,19
17	/	0,01	5,83	12,93	15,67	19,23	21,65	20,89	16,46	10,17	/	/
18	/	/	4,33	12,39	14,83	18,57	21,10	19,88	15,04	/	/	/
19	/	/	/	10,84	13,85	17,73	20,18	18,8	13,91	/	/	/

Příloha 2: Tabulka průměrné teploty okolního vzduchu v hodinových intervalech pro typický den v měsíci. Důležité pro výpočet vztahu (7), na který se odkazuje kapitola 8.4.

Teplota okolního vzduchu (°C)												
Čas/měsíc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5	/	/	/	/	12,98	16,51	13,47	13,05	9,69	/	/	/
6	/	/	/	3,37	14,72	17,8	14,32	13,32	9,5	/	/	/
7	/	-2,79	-0,48	4,86	15,87	18,9	16,07	14,76	10,07	5,83	/	/
8	-2,32	-2,85	0,77	6,95	16,94	19,86	17,39	16,21	11,63	6,67	2,06	-0,59
9	-2,05	-2,57	2,22	8,51	17,85	20,64	18,6	17,58	13,1	7,8	2,29	-0,37
10	-1,38	-1,76	3,53	9,76	19,6	21,24	19,63	18,81	14,38	8,9	2,9	0,23
11	-0,6	-0,68	4,58	10,8	19,18	21,67	20,49	19,8	15,45	9,94	3,71	0,92
12	0,09	0,37	5,44	11,6	19,58	21,94	21,16	20,51	16,26	10,81	0,452	1,53
13	0,59	1,25	6,08	13,17	19,83	22,04	21,61	20,99	16,8	11,42	5,23	1,91
14	0,75	1,85	6,43	12,49	19,9	21,9	21,87	21,8	17,1	11,73	5,95	2,04
15	0,64	2,19	6,52	12,57	19,77	21,54	21,98	21,34	17,14	11,72	5,81	1,8
16	0,17	2,23	6,25	12,41	19,38	21,51	21,86	21,12	16,9	11,3	5,26	1,22
17	/	1,89	5,63	11,89	18,82	20,91	21,48	20,68	16,32	10,43	/	/
18	/	/	4,51	10,96	17,98	19,99	20,89	19,98	15,33	/	/	/
19	/	/	/	9,63	16,77	18,77	19,97	18,89	14,23	/	/	/

Příloha 3: Tabulka energie slunečního záření, která byla určena v kapitole 7.8.

Energie slunečního záření (W/m ²)												
Čas/měsíc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	20	32	24	3	0	0	0	0
6	0	0	0	42	85	100	84	52	14	0	0	0
7	0	0	62	164	214	231	215	174	136	49	0	0
8	1	89	193	321	362	383	374	336	282	171	64	0
9	127	214	300	476	490	503	509	480	422	287	163	128
10	183	295	393	572	577	569	598	582	497	350	199	182
11	198	335	447	611	585	587	614	596	551	414	232	209
12	198	358	462	621	588	618	627	609	554	414	247	208
13	201	308	416	591	567	575	597	592	518	386	218	191
14	171	294	393	520	488	516	546	525	455	324	183	155
15	133	229	317	418	395	437	467	426	346	226	113	86
16	30	136	220	311	300	352	366	331	240	128	15	0
17	0	14	102	171	188	223	241	199	112	9	0	0
18	0	0	2	41	75	105	107	69	8	0	0	0
19	0	0	0	0	17	39	36	8	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

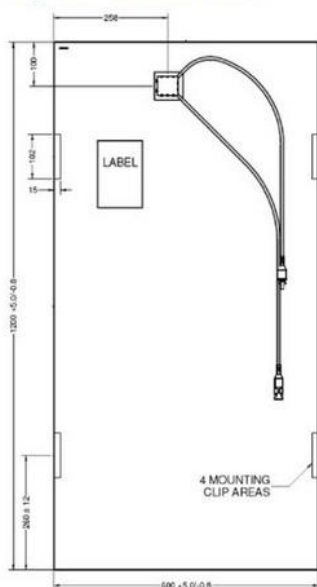
Příloha 4: Tabulka energie slunečního záření, která byla určena v kapitole 8.4.

Energie slunečního záření (W/m ²)												
Čas/měsíc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	24	35	27	4	0	0	0	0
6	0	0	0	53	111	130	110	68	18	0	0	0
7	2	82	65	184	248	268	246	198	141	52	0	0
8	109	190	187	334	385	414	399	353	281	161	63	1
9	157	263	307	481	511	539	552	502	420	270	143	105
10	194	302	391	572	583	606	618	583	492	325	178	156
11	200	339	436	617	599	640	635	615	532	376	214	193
12	194	309	457	633	618	639	654	617	541	374	217	201
13	158	267	424	598	581	616	638	579	507	353	197	179
14	112	197	385	526	511	559	569	516	442	297	155	140
15	16	119	309	425	424	475	480	427	335	199	96	78
16	0	9	213	315	327	380	385	335	230	107	6	0
17	0	0	97	175	210	259	260	210	110	6	0	0
18	0	0	2	46	94	133	133	81	9	0	0	0
19	0	0	0	0	17	42	38	8	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Příloha 5: Technické parametry CdTe panelu použité pro výpočet ekologických ukazatelů v kapitole 7.

fact sheet

Physical Characteristics



Electrical Specifications†

Typical Performance at STC (1000 W/m² AM 1.5, 25°C)

Model Numbers		GE-CdTe78	GE-CdTe80	GE-CdTe83
Nominal Efficiency	(%)	10.8	11.1	11.5
Nominal Power (+/- 5%)	P _{mpp} (W)	77.5	80.0	82.5
Voltage at P _{max}	V _{mpp} (V)	72.4	73.5	75.0
Current at P _{max}	I _{mpp} (A)	1.07	1.09	1.10
Open Circuit Voltage	V _{oc} (V)	94.0	95.0	95.0
Short Circuit Current	I _{sc} (A)	1.23	1.24	1.25
Maximum System Voltage	V _{sys} (V)	600 (UL) / 1000 (IEC)		
Temp. Coefficient of P _{mpp}	T _k (P _{mpp})	-0.25%/°C		
Temp. Coefficient of V _{oc}	T _k (V _{oc})	-0.29%/°C		
Temp. Coefficient of I _{sc}	T _k (I _{sc})	+0.04%/°C		
Limiting Reverse Current	I _R (A)	2 A		
Maximum Source Circuit Fuse	I _{cr} (A)	2 A		

Typical Performance at NOCT (800 W/m² AM 1.5, 45°C)

Model Numbers		GE-CdTe78	GE-CdTe80	GE-CdTe83
Nominal Power (+/- 5%)	P _{mpp} (W)	58.1	60.0	61.9
Voltage at P _{max}	V _{mpp} (V)	67.9	68.9	70.3
Current at P _{max}	I _{mpp} (A)	0.86	0.88	0.90
Open Circuit Voltage	V _{oc} (V)	87.4	88.3	88.3
Short Circuit Current	I _{sc} (A)	1.01	1.02	1.03

Mechanical Specifications†

Length	1200 mm (47.2 in)
Width	600 mm (23.6 in)
Thickness	7.5 mm (0.30 in)
Weight	13 kg (28.7 lb)
Front Glass	3.2 mm (0.13 in) Heat Strengthened Glass
Back Glass	4.0 mm (0.16 in) Tempered Glass
Frame	None
Cell Type	CdS/CdTe, 116 Active Cells
Cell Orientation	Parallel to the 600 mm Dimension
Bypass Diode	None
Cable Length	610 mm (24 in)
Connectors	MC4 Compatible
Encapsulation	EVA with Edge Seal

† Unless otherwise specified, all ratings +/-10%.
Specifications are preliminary and subject to change.



Contact your local GE Representative for assistance
or for additional information

Copyright © 2010 General Electric Company. All rights reserved.
GEA18381 (10/2010)

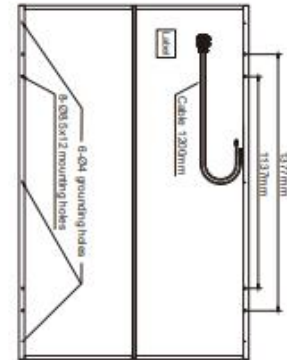
Příloha 6: Technické parametry CIGS panelu použité pro výpočet ekologických ukazatelů v kapitole 7.



Mechanical Specification

Dimensions	1901mm x 1237mm x 45mm (74.8 inches x 48.7 inches x 1.77 inches)
Weight	33.3 kg (73.41lbs)
Cell type	CIGS thin film
Front cover	2.5mm tempered glass with ARC
Cell substrates	1.8mm ultra-thin soda lime glass x 3
Back cover	Al back sheet
Encapsulant	EVA
Frame	Anodized Al frame (black) with screw mounting
Junction Box	IP67 rated with bypass diode
Connectors	MC4 compatible
Cable length	1200mm (47.2 inches)

Module Drawing



Electrical Specification

Power performance at STC (STC: 1000W/m², 25°C/77°F, AM 1.5)*

Module Models	CIGS- 3350A1	3400A1	3450A1	3500A1	3550A1	3600A1	3650A1
Nominal power	P _{MPP} [W]	335	340	345	350	355	360
Open circuit voltage	V _{OC} [V]	73.5	73.6	73.8	73.9	74.0	74.1
Short circuit current	I _{SC} [A]	6.71	6.73	6.75	6.95	6.96	6.96
Voltage at P _{max}	V _{MPP} [V]	56.5	56.9	57.1	55.6	56.3	57.0
Current at P _{max}	I _{MPP} [A]	5.93	5.98	6.04	6.30	6.31	6.32
Module efficiency	[%]	≈ 14.2	≈ 14.5	≈ 14.7	≈ 14.9	≈ 15.1	≈ 15.5

Power performance at NMOT (NMOT: 800W/m², 20°C/68°F, AM1.5)*

Module Models	CIGS- 3350A1	3400A1	3450A1	3500A1	3550A1	3600A1	3650A1
Nominal power	P _{MPP} [W]	247.3	251.2	254.9	258.0	262.0	269.9
Open circuit voltage	V _{OC} [V]	69.1	69.2	69.4	69.5	69.6	69.9
Short circuit current	I _{SC} [A]	5.37	5.38	5.40	5.56	5.57	5.57
Voltage at P _{max}	V _{MPP} [V]	52.1	52.5	52.8	51.2	51.9	53.1
Current at P _{max}	I _{MPP} [A]	4.74	4.78	4.83	5.04	5.05	5.08



*All STC characteristics are measured after pre-treatment of 43kWh/m² light soaking. The nominal power is based on the measurement value of stabilized product. The value applies to measurement uncertainty: Pmax : +5%/-3% ; I_{sc}, V_{oc}, I_{max}, V_{max} : ±10%.

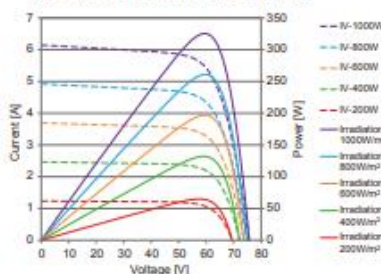
Temperature coefficients

NMOT	TC I _{SC} (α)	TC V _{OC} (β)	TC P _{MPP} (δ)
46°C	+0.01%/°C	-0.27%/°C	-0.28%/°C

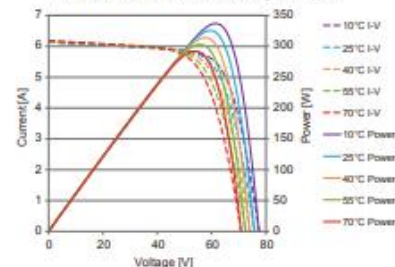
Properties for solar system construction design

Max. system voltage (V _{MV})	Max. series overcurrent protective devices	Mechanical load	Safety class	Fire rating	Operating temperature
1000V	8A	2400Pa	II	Class C(IEC) Type 1(UL)	-40 ~ 85°C

I-V curves at various irradiation



I-V curves at various temperature



*This datasheet is for informational purposes only. No rights can be derived from the information contained herein.
*The color of each individual product might be slightly different but does not affect the output power performance.

上銀光電股份有限公司
eterbright solar corp.

351 苗栗縣頭份市中華路442-1號
No. 442-1, Zhonghua Rd., Toufen City, Miaoli County 351, Taiwan
Tel : +886-37-627668 Fax : +886-37-627778
www.eterbright.tw info@eterbright.tw

©2019 FORM PD03E01-1902
(PRINTED IN TAIWAN)

Příloha 7: Technické parametry monokrystalického panelu použité pro výpočet ekologických ukazatelů v kapitole 7.

	Mechanical Characteristics																
Packaging Configuration	<table border="1"> <tbody> <tr> <td>Cell Type</td> <td>N type Mono-crystalline</td> </tr> <tr> <td>No. of cells</td> <td>120 (6×20)</td> </tr> <tr> <td>Dimensions</td> <td>1692×1029×30mm (66.61×40.51×1.18 inch)</td> </tr> <tr> <td>Weight</td> <td>19.0kg (41.89 lbs)</td> </tr> <tr> <td>Front Glass</td> <td>3.2mm, Anti-Reflection Coating, High Transmission, Low Iron, Tempered Glass</td> </tr> <tr> <td>Frame</td> <td>Anodized Aluminium Alloy</td> </tr> <tr> <td>Junction Box</td> <td>IP68 Rated</td> </tr> <tr> <td>Output Cables</td> <td>TUV 1×4.0mm² (+): 290mm, (-): 145mm or Customized Length</td> </tr> </tbody> </table>	Cell Type	N type Mono-crystalline	No. of cells	120 (6×20)	Dimensions	1692×1029×30mm (66.61×40.51×1.18 inch)	Weight	19.0kg (41.89 lbs)	Front Glass	3.2mm, Anti-Reflection Coating, High Transmission, Low Iron, Tempered Glass	Frame	Anodized Aluminium Alloy	Junction Box	IP68 Rated	Output Cables	TUV 1×4.0mm ² (+): 290mm, (-): 145mm or Customized Length
Cell Type	N type Mono-crystalline																
No. of cells	120 (6×20)																
Dimensions	1692×1029×30mm (66.61×40.51×1.18 inch)																
Weight	19.0kg (41.89 lbs)																
Front Glass	3.2mm, Anti-Reflection Coating, High Transmission, Low Iron, Tempered Glass																
Frame	Anodized Aluminium Alloy																
Junction Box	IP68 Rated																
Output Cables	TUV 1×4.0mm ² (+): 290mm, (-): 145mm or Customized Length																
<p>[Two pallets = One stack] 35pcs/pallets, 70pcs/stack, 910pcs/ 40HQ Container</p>																	
SPECIFICATIONS																	
Module Type	JKM355N-6TL3 JKM355N-6TL3-V	JKM360N-6TL3 JKM360N-6TL3-V	JKM365N-6TL3 JKM365N-6TL3-V	JKM370N-6TL3 JKM370N-6TL3-V	JKM375N-6TL3 JKM375N-6TL3-V												
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT							
Maximum Power (P _{max})	355Wp	265Wp	360Wp	268Wp	365Wp	272Wp	370Wp	276Wp	375Wp	280Wp							
Maximum Power Voltage (V _{mp})	34.04V	31.40V	34.19V	31.58V	34.34V	31.72V	34.49V	31.89V	34.63V	32.03V							
Maximum Power Current (I _{mp})	10.43A	8.43A	10.53A	8.50A	10.63A	8.58A	10.73A	8.65A	10.83A	8.73A							
Open-circuit Voltage (V _{oc})	41.01V	38.71V	41.16V	38.85V	41.31V	38.99V	41.46V	39.13V	41.60V	39.26V							
Short-circuit Current (I _{sc})	11.13A	8.99A	11.23A	9.07A	11.33A	9.15A	11.43A	9.23A	11.53A	9.31A							
Module Efficiency STC (%)	20.39%		20.68%		20.96%		21.25%		21.54%								
Operating Temperature(°C)	-40°C→+85°C																
Maximum System Voltage	1000/1500VDC (IEC)																
Maximum Series Fuse Rating	20A																
Power Tolerance	0→+3%																
Temperature Coefficients of P _{max}	-0.34%/°C																
Temperature Coefficients of V _{oc}	-0.28%/°C																
Temperature Coefficients of I _{sc}	0.048%/°C																
Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)	45±2°C																

Příloha 8: Technické parametry polykrystalického panelu použité pro výpočet ekologických ukazatelů v kapitole 7.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS AT STC								
Nominal Power (P_{max})	250W	255W	260W	265W	270W	275W	280W	285W
Open Circuit Voltage (V_{oc})	38.0V	38.1V	38.2V	38.3V	38.4V	38.5V	38.6V	38.7V
Short Circuit Current (I_{sc})	8.75A	8.83A	8.90A	8.98A	9.09A	9.20A	9.31A	9.42A
Voltage at Nominal Power (V_{mp})	30.3V	30.5V	30.7V	30.9V	31.1V	31.3V	31.5V	31.7V
Current at Nominal Power (I_{mp})	8.26A	8.37A	8.47A	8.58A	8.69A	8.79A	8.89A	9.00A
Module Efficiency (%)	15.37	15.67	15.98	16.29	16.60	16.90	17.21	17.52
Operating Temperature	-40°C to +85°C							
Maximum System Voltage	1000V DC							
Fire Resistance Rating	Type 1 (in accordance with UL 1703/Class C)(IEC61730)							
Maximum Series Fuse Rating	15A							

STC: Irradiance 1000W/m², Cell temperature 25°C, AM1.5

ELECTRICAL CHARACTERISTICS AT NOCT								
Nominal Power (P_{max})	184W	188W	191W	195W	199W	202W	206W	210W
Open Circuit Voltage (V_{oc})	35.0V	35.1V	35.2V	35.3V	35.4V	35.5V	35.6V	35.7V
Short Circuit Current (I_{sc})	7.09A	7.15A	7.21A	7.27A	7.36A	7.45A	7.54A	7.63A
Voltage at Nominal Power (V_{mp})	27.6V	27.8V	27.9V	28.1V	28.3V	28.5V	28.7V	28.9V
Current at Nominal Power (I_{mp})	6.67A	6.77A	6.85A	6.94A	7.04A	7.09A	7.18A	7.27A

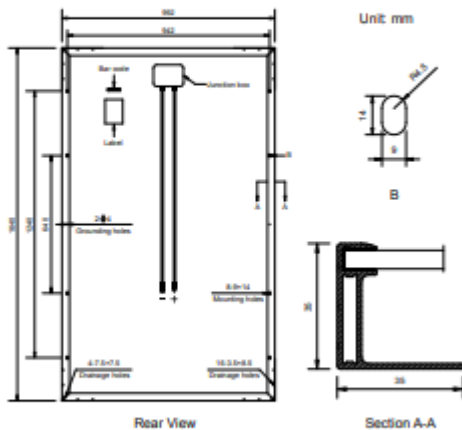
NOCT: Irradiance 800W/m², Ambient temperature 20°C, Wind Speed 1 m/s

MECHANICAL CHARACTERISTICS	
Cell type	Polycrystalline 5BB 156.75x156.75mm (6x6inches)
Number of cells	60 (6x10)
Module dimensions	1640x992x35mm (64.57x39.06x1.38inches)
Weight	18kg (39.7lbs)
Front cover	3.2mm (0.13inches) tempered glass with AR coating
Frame	Anodized aluminum alloy
Junction box	IP67, 3 diodes
Cable	4mm ² (0.006inches ²), 900mm (35.43inches)
Connector	MC4 or MC4 compatible

TEMPERATURE CHARACTERISTICS	
Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)	45°C±2°C
Temperature Coefficients of P_{max}	-0.41%/°C
Temperature Coefficients of V_{oc}	-0.31%/°C
Temperature Coefficients of I_{sc}	0.05%/°C

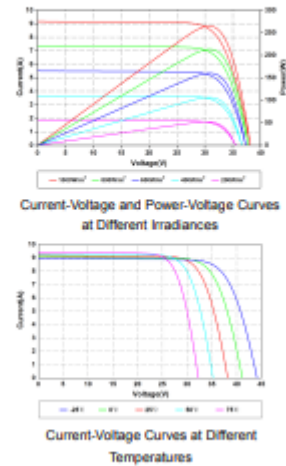
PACKAGING	
Standard packaging	30pcs/pallet
Module quantity per 20' container	360pcs
Module quantity per 40' container	840pcs(GP)/924pcs(HQ)

ENGINEERING DRAWINGS



Specifications in this datasheet are subject to change without prior notice.

IV CURVES



Amerisolar and Amerisolar logo denoted with ® are registered trademarks of Worldwide Energy and Manufacturing USA Co., Ltd.

Příloha 9: Technické parametry fotovoltaického střídače použité pro výpočet ekonomického hodnocení v kapitole 8.

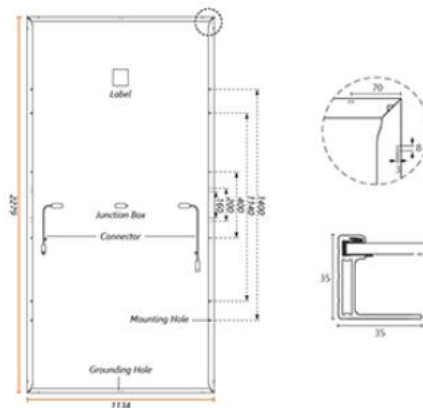
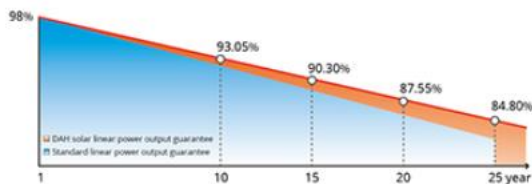
Platné pro měnič s produktovým číslem	SExxK-xxx01xxxx			SExxK- xxx81xxxx		JEDNOTKY
	SE50K ⁽¹⁾ Pro síť 400V	SE66.6K Pro síť 400V	SE90K Pro síť 400V	SE100K Pro síť 400V	SE120K Pro síť 480V	
VÝSTUP						
Jmenovitý AC aktivní výstupní výkon	50 000 ⁽²⁾	66 600	90 000	100 000	120000	W
Maximální AC zdánlivý výstupní výkon	50 000 ⁽²⁾	66 600	90 000	100 000	120000	VA
AC výstupní napětí – sdružené / fázové (nominální)	380/220; 400/230				480 / 277	Vac
AC výstupní napětí – rozsah sdružené / rozsah fázové	304–437/176–253; 320–460/184–264,5				432–529 / 249–305	Vac
AC frekvence				50/60 ± 5 %		Hz
Maximální trvalý proud na výstupu (na fázi)	72,5	96,5	130,5	145		Aac
Připojení AC na výstupu	3W + PE, 4W + PE					
Podporované sítě	WYE: TN-C, TN-S, TN-C-S, TT, IT; Delta: IT					
Maximální reziduální proud ⁽³⁾	200		300			mA
Monitoring sítě, ochrana před ostrovním provozem, konfigurovatelný účinník, konfigurovatelné prahové hodnoty země	Ano					
Celkové harmonické zkreslení				≤ 3		%
Rozsah účinníku	± 0,2 až 1					
VSTUP						
Maximální DC výkon (panel za STC) Měnič / synergická jednotka	87 500 / 43 750	116 550 / 58 275	157 500 / 52 500	175 000 / 58 300	210 000 / 70 000	W
Beztransformátorový, neuzemněný	Ano					
Maximální vstupní napětí DC+ k DC-	1000					
Rozsah provozního napětí	680–1000					
Maximální vstupní proud	(2) × (36,25)	(2) × (48,25)	(3) × (43,5)	(3) × (48,25)	(3) × (48,25)	A _{dc}
Ochrana proti obrácení polarity	Ano					
Detekce zemního spojení (izolační odpor)	167kΩ citlivost na synergickou jednotku ⁽⁴⁾					
Maximální účinnost měniče	98,3				98,1	%
Evropská vážená účinnost				98		%
Noční spotřeba energie	< 8		< 12			W
DALŠÍ VLASTNOSTI						
Podporovaná komunikační rozhraní ⁽⁵⁾	2 × RS485, Ethernet, Wi-Fi (volitelné), mobilní síť (volitelné)					
Chytré řízení energie	Limit pro export					
Spuštění měniče	Pomocí mobilní aplikace SetApp s využitím vestavěného Wi-Fi přístupového bodu pro lokální připojení					
Ochrana proti elektrickým obloukům	Integrovaná, konfigurovatelná uživatelem (v souladu s UL1699B)					
Rapid shutdown (RSD, "rychlá vypnutí")	Volitelné (automaticky po odpojení AC sítě)					
Regulátor PID	Noční, zabudovaný					
Přepětová ochrana RS485 (porty 1 + 2)	Typ II, vyměnitelná na místě, integrovaná					
DC přepětová ochrana	Typ II, vyměnitelná na místě, integrovaná					
AC přepětová ochrana	Typ II, vyměnitelná na místě, volitelná					
DC pojistky (jednopolové)	Volitelné, 25A / 30A					
DC odpojovač	Volitelné					
Předběžné uvedení do provozu	Zabudované ⁽⁶⁾					
SHODA S NORMAMI						
Bezpečnost	IEC-62109-1, IEC-62109-2, AS3100					
Normy připojení k síti ⁽⁷⁾	ENS0549-1, ENS0549-2, VDE-AR-N 4105, VDE-AR-N 4110, VDE V 0126-1-1, CEI 0-21, CEI 0-16, TOR Erzeuger Typ A+B, G99 Type A+B, G99 (NI) Type A+B, VFR 2019					
Emise	IEC61000-6-2, IEC61000-6-3 Class A, IEC61000-3-11, IEC61000-3-12					
RoHS	Ano					

Příloha 10: Technické parametry monokrystalického panelu použité pro výpočet ekonomického vyhodnocení v kapitole 8.

DHT-M72X10 520~560W

1/3 cut Low current High Efficiency PV Module

Cells Type: Mono 182×60.7mm
 Weight: 29kg
 Dimension (L×W×T): 2279×1134×35mm
 Packing: 31pcs/pallet, 620pcs/40HQ



Mechanical Specification

Output Cable (including connector): 4.0mm², 300/400mm in length, length can be customized
 No. of Cells: 216 (6×36)
 Glass: 3.2mm High Transmission, Antireflection Coating
 Junction box: IP68, 3 Bypass Diodes
 Connector: MC4 Compatible

Operating Parameters

Maximum system voltage: 1500V DC
 Operating Temperature: -40 ~ +85°C
 Maximum series fuse rating: 20A
 Snow load, frontside: 5400Pa
 Wind load, backside: 2400Pa
 Nominal operating cell temperature: 43°C±2°C
 Application level: Class A

STC-Electrical Characteristics

Module Type	DHT-M72X10									
Maximum Power (Pmax)	520W	525W	530W	535W	540W	545W	550W	555W	560W	
Open-circuit Voltage (Voc)	73.5V	73.7V	73.9V	74.1V	74.3V	74.5V	74.7V	74.9V	75.1V	
Maximum Power Voltage (Vmp)	61.8V	62.0V	62.2V	62.4V	62.6V	62.8V	63.0V	63.2V	63.4V	
Short-circuit Current (Isc)	8.95A	9.01A	9.07A	9.13A	9.19A	9.25A	9.31A	9.37A	9.43A	
Maximum Power Current (Imp)	8.41A	8.47A	8.52A	8.57A	8.63A	8.68A	8.73A	8.78A	8.83A	
Module Efficiency (%)	20.12%	20.31%	20.51%	20.70%	20.89%	21.09%	21.28%	21.48%	21.67%	

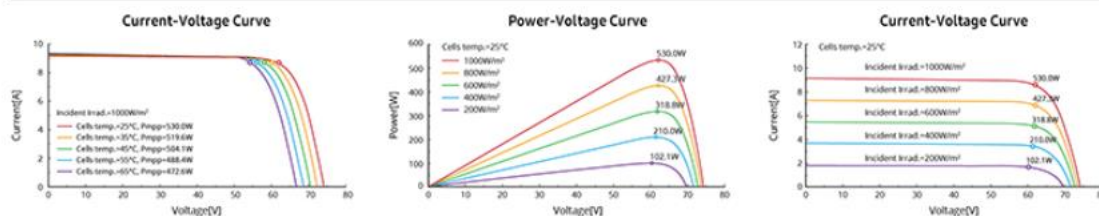
Temperature Coefficient of Isc: 0.05%/°C / Temperature Coefficient of Voc: -0.31%/°C / Temperature Coefficient of Pmax: -0.35%/°C
 Standard Test Environment: Irradiance 1000W/m², Cell temperature 25°C, Spectrum AM1.5

NOCT-Electrical Characteristics

Maximum Power (Pmax)	390W	394W	397W	401W	405W	409W	412W	416W	420W	
Open-circuit Voltage (Voc)	69.4V	69.6V	69.8V	70.0V	70.2V	70.3V	70.5V	70.7V	70.9V	
Maximum Power Voltage (Vmp)	58.4V	58.5V	58.7V	58.9V	59.1V	59.3V	59.5V	59.7V	59.9V	
Short-circuit Current (Isc)	7.22A	7.27A	7.32A	7.37A	7.42A	7.46A	7.51A	7.56A	7.61A	
Maximum Power Current (Imp)	6.68A	6.72A	6.76A	6.81A	6.85A	6.89A	6.93A	6.97A	7.01A	

Standard Test Environment: Irradiance 800W/m², Ambient temperature 20°C, Spectrum AM1.5, Wind speed 1m/s

I-V Curve (DHT-M72X10-530W)



Add: No.1 Yaoyuan Road, Luyang District, Hefei City, Anhui, China
 E-mail: sales@dh-solar.cn Facebook: www.facebook.com/DAHsolar

www.dahsolarpv.com