



Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektroenergetiky

# DIPLOMOVÁ PRÁCE

OPTIMALIZACE NÁVRHU FV SYSTÉMU PRO TÁBORSKO

Autor práce: Bc. Adam Dolejší  
Vedoucí práce: Ing. Milan Bělík, Ph.D.

Plzeň 2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Adam DOLEJŠÍ**  
Osobní číslo: **E21N0006P**  
Studijní program: **N0713A060013 Výkonové systémy a elektroenergetika**  
Specializace: **Elektroenergetika**  
Téma práce: **Optimalizace návrhu FV systému pro Tábořsko**  
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky**

## Zásady pro vypracování

1. Analyzujte jednotlivé komerčně dostupné typy FV modulů a jejich vlastnosti.
2. Navrhněte a realizujte modelovou instalaci v zadané lokalitě s použitím různých typů FV modulů.
3. Proveďte dlouhodobé měření navrženého modelového systému.
4. Vyhodnoťte výsledky provedených měření a sumarizujte konstrukční a technická doporučení pro zadanou lokalitu. Ve výsledcích zohledněte i aktuální meteorologickou situaci.



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

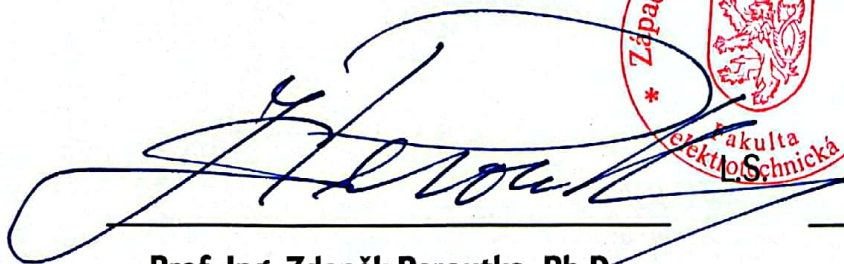
Seznam doporučené literatury:

1. Poulek M., Libra V.: Solární energie

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Milan Bělík, Ph.D.**  
Katedra elektroenergetiky

Datum zadání diplomové práce: **7. října 2022**  
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2023**





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



**Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 7. října 2022

# Abstrakt

Diplomová práce se zabývá návrhem optimálního fotovoltaického systému pro konkrétní lokalitu na Tábořsku. Ve vybrané lokalitě byly instalovány čtyři komerčně dostupné FV panely různého typu a následně byla sbírána data z jejich provozu. Pro sbírání dat byl navržen a vytvořen měřicí systém na platformě Arduino. Na základě těchto dlouhodobě naměřených dat byla stanovena konstrukční a technická doporučení pro danou lokalitu s ohledem na důležité faktory pro provoz a ekonomiku. Těmito faktory jsou například množství dodávaného výkonu, rozdíly ve výrobě v jednotlivých ročních obdobích a stálost dodávaného výkonu. V práci se podařilo potvrdit některé charakteristické vlastnosti daných typů panelů dle teoretických předpokladů. V některých případech se ale projevil vliv technického provedení měření a chování panelů bylo mírně odlišné.

## Klíčová slova

obnovitelné zdroje, fotovoltaické panely, technologie fotovoltaických článků, optimalizace systému, elektroenergetika

# Abstract

This diploma thesis deals with the optimal design of the photovoltaic system in a specific location. In this location, four different types of commercially available panels were installed and long-time data about the operation of panels were collected. The measurement system on the Arduino platform was designed for data collection. Based on these long-term measured data, design and technical recommendations were established for the given location, taking into account important operational and economic factors. These factors include, for example, the quantity of supplied power, differences in production in individual seasons and the stability of supplied power. In the thesis, it was possible to confirm some of the characteristics of the panel types according to theoretical assumptions. However, in some cases, the technical design of the measurement influenced the behaviour of the panels.

## Keywords

renewable resources, photovoltaic panels, technology of photovoltaic cell, optimization of system, power engineering

## Prohlášení

Prohlašuji, že tuto diplomovou práci, předloženou zde k posouzení a obhajobě, jsem vypracoval samostatně pod vedením mého vedoucího diplomové práce. Odborná literatura použitá při tvorbě této práce, je, stejně jako další užití informační prameny, v práci řádně citovány a uvedeny v seznamu, který je nedílnou součástí této práce. Také prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil žádná autorská práva třetích osob.

Dále prohlašuji, že veškerý software, který byl použit při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 26. května 2023

.....  
Bc. Adam Dolejší

## Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. Milanu Bělíkovi, Ph.D. za cenné profesní rady, připomínky a odborné vedení po celou dobu tvorby práce i realizace měření. Také bych jemu a Katedře elektroenergetiky FEL ZČU rád poděkoval za zapůjčení fotovoltaických panelů pro účely této práce. V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině, která mě po celou dobu podporovala a poskytla mi prostor pro realizaci měření. Zvláště bych chtěl poděkovat svému otci, který v případě nutnosti a mé nepřítomnosti pořizoval fotografickou dokumentaci zastínění. Poděkovat bych chtěl i své přítelkyni, která mě po celou dobu práce podporovala.

# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>10</b>
<b>1 Základní pojmy</b>	<b>12</b>
1.1 Princip FV článků . . . . .	12
1.1.1 Fotoelektrický jev . . . . .	12
1.1.2 Shockley-Queisserův limit . . . . .	14
1.1.3 Konstrukce FV článku . . . . .	14
1.2 Druhy záření . . . . .	16
1.3 Výpočet dostupné energie . . . . .	17
1.4 Parametry FV článku . . . . .	21
<b>2 Fotovoltaické panely</b>	<b>23</b>
2.1 Základní dělení . . . . .	23
2.1.1 Křemík a ostatní materiály . . . . .	23
2.1.2 Krystalické a amorfní technologie . . . . .	25
2.1.3 Multivrstvé technologie . . . . .	27
2.1.4 Pevné ukotvení a trackery . . . . .	27
<b>3 Modelová instalace</b>	<b>29</b>
3.1 Vybrané typy panelů . . . . .	30
3.2 Zapojení systému . . . . .	32
3.3 Měřicí systém na platformě Arduino . . . . .	32
3.3.1 Hlavní měřicí systém . . . . .	33
3.3.2 Pomocný měřicí systém . . . . .	34
3.4 Instalace systému . . . . .	38
<b>4 Měření</b>	<b>43</b>
4.1 Měřené parametry . . . . .	43
4.1.1 V-A charakteristika panelů . . . . .	44
4.2 Metodika vyhodnocení dlouhodobého měření . . . . .	51
4.3 Vybrané charakteristické průběhy . . . . .	52
4.4 Celkové naměřené hodnoty . . . . .	58
<b>5 Navrhovaná optimalizační řešení</b>	<b>61</b>
<b>6 Závěr</b>	<b>65</b>
<b>Seznam použité literatury</b>	<b>67</b>
<b>Seznam obrázků</b>	<b>71</b>



## Seznam použitých symbolů a zkratk

### Použité zkratky

FV článek	-	fotovoltaický článek
FV panel	-	fotovoltaický panel
FVE	-	fotovoltaická elektrárna
MPP	-	bod maximálního výkonu (Maximum Power Point)
V-A	-	Volt-Ampérová

### Použité veličiny

$E$	(lx)	intenzita osvětlení
$h$	(-)	Planckova konstanta
$I_D$	(A)	proud tekoucí při difuzním záření
$I_{MPP}$	(A)	proud tekoucí při jmenovitém výkonu
$I_P$	(A)	proud tekoucí při přímém záření
$I_{SC}$	(A)	proud panelu nakrátko
$J$	(W/m <sup>2</sup> )	intenzita dopadajícího záření $m_e$
(kg)		hmotnost elektronu
$P$	(W)	výkon (obecně)
$P_{MPP}$	(Wp)	jmenovitý výkon panelu
$R$	(Ω)	elektrický odpor
$TCR$	(ppm / °C)	teplotní koeficient odporu
$U_D$	(V)	napětí při difuzním záření
$U_{MPP}$	(V)	napětí při udávaném jmenovitém výkonu
$U_P$	(V)	napětí při přímém záření
$U_{0C}$	(V)	napětí panelu naprázdno
$v$	(m · s <sup>-1</sup> )	rychlost
$W$	(J)	práce (v této práci používaná jednotka watt-hodina (Wh), 1 Wh = 3600 J)
$W_v$	(J)	výstupní energie
$\Phi$	(°)	zeměpisná šířka
$\lambda$	(m)	vlnová délka
$\gamma$	(°)	orientace plochy
$\gamma_s$	(°)	sluneční azimut
$\theta$	(°)	úhel dopadu

# Úvod

Pro solární energii je specifické, že se její dostupnost a využitelnost může velmi lišit v závislosti na lokalitě. Proto stejný univerzální systém nemusí být použitelný pro všechny případy. Klíčem k co nejvyšší možné efektivitě je jeho optimalizace pro předem stanovenou lokalitu a požadavky na systém. Pro známé lokální podmínky lze celý fotovoltaický (FV) systém přizpůsobit konstrukčně, například zvolit sklon panelů vůči horizontu pro optimální výrobu v požadovaném období, či například zlepšit proudění vzduchu kolem zadní strany panelů, aby nedocházelo k jejich přehřívání. Přizpůsobit dané lokalitě lze panely i využitím různých dostupných technologií - ať už tzv. chytré trackery, nebo samotným typem použitých panelů.

Cílem této práce je na základě dlouhodobého měření provozních parametrů (napětí panelu, intenzita svitu a teplota u panelů) napříč všemi ročními obdobími získat přehled o vlastnostech čtyř použitých typech panelů. Především velikost a stabilitu jimi dodávaného výkonu v závislosti na intenzitě osvětlení. Na základě těchto zjištěných vlastností a požadavcích na dodávaný výkon poté navrhnout optimální FV systém, který by splnil co nejlépe požadavky jeho provozovatele. Práce je proto rozdělena do čtyř hlavních celků.

Úkolem první části práce je vysvětlit základní fyzikální princip fungování FV článku a vytvořit stručný přehled obecných parametrů a vlastností těchto článků. Též uvést dělení FV panelů dle různých hledisek - struktury, materiálu a způsobu ukotvení. Dalším úkolem této části je seznámit čtenáře s tím, jaké typy panelů jsou v současné době komerčně dostupné. Tyto typy poté přiblížit a popsat jejich hlavní vlastnosti, případně uvést výhody a nevýhody oproti dalším dostupným typům.

Druhá část práce se již zaměřuje na konkrétní návrh modelové instalace. Prvním krokem návrhu je definice místa této instalace. V práci jsou uvedeny dostupné průměrné meteorologické údaje jako teplota či množství srážek v roce pro zvolenou lokalitu. Následuje volba čtyř různých typů FV panelů z komerčně dostupnou technologií a popis instalace (sklon, místo...).

Jako poslední je představen použitý měřicí systém, který byl sestaven za účelem této práce. Měřicí systém je složen ze dvou nezávislých částí. První je měření samotných panelů, konkrétně napětí na zátěži, a druhou část tvoří systém měřicí meteorologická data - teplotu a intenzitu svitu. Z důvodu velkého množství dostupných variant a typů senzorů, open-source prostředí a přizpůsobitelnosti byla pro obě části měřicího systému zvolena platforma Arduino. Ta je představena v závěru druhé části.

Ve třetí části práce jsou diskutovány naměřené hodnoty. Je zde kladen důraz především na jejich zhodnocení v rámci celkového dodávaného výkonu a jeho velikosti napříč různými ročními

obdobími. Diskutována je zde ale i jeho stabilita a jsou zde uvedeny příklady z vybraných měřených dnů, kde lze nejlépe pozorovat rozdíly mezi jednotlivými typy panelů. Též jsou nastíněny důvody, proč se některé panely mohli odchýlit od jejich štítkových hodnot.

V poslední, čtvrté části jsou data z předchozí části uvedena v souvislosti s možnými požadavky provozovatele fotovoltaického systému. Jako například preferované roční období pro nejvyšší výrobu, preferované náklady na vybudování takového systému či stabilitu dodávaného výkonu v průběhu dne. Jsou též uvedeny možnosti konstrukčního uzpůsobení systému na základě výše uvedených požadavků. Na základě konfrontace s různými požadavky jsou v závěru této části uvedena možná doporučení pro co nejoptimálnější splnění očekávání konkrétního provozovatele ve zvolené lokalitě.

Problematika optimalizace fotovoltaických systémů je silně ovlivněna faktory, které jsou ve velké míře lokálního charakteru. Především z tohoto důvodu si proto tato práce neklade za cíl vytvořit komplexní návod, jak vytvořit optimální systém v jakékoliv lokalitě. Tato práce má za cíl ukázat jednu z cest, jak v dané lokalitě přizpůsobit systém na základě určitých požadavků. Pokud by se změnilo místo instalace a požadavky provozovatele, bylo by nutné k optimalizaci přistupovat z jiného pohledu a doporučené závěry by se pravděpodobně lišily. Mou osobní motivací pro zabývání se tímto tématem je záměr vybudovat střešní FVE v místě bydliště. Řešení této problematiky mi proto poskytne lepší přehled o chování jednotlivých typů panelů a také o světelných a meteorologických podmínkách v místě možné instalace. V neposlední řadě obor FV systémů v současné době roste a o tuto technologii mám osobní zájem - jak o nové technologie v této oblasti, tak o trendy z oblasti budování a provozování fotovoltaických systémů.

# 1 Základní pojmy

## 1.1 Princip FV článků

Pojem *fotovoltaika* je složen ze dvou slov, a to z řeckého *phós*, tedy světlo, a z příjmení významného italského fyzika na poli elektřiny, Alessandra Volta.

Fotovoltaické (FV) panely jsou pak zařízení skládající se z jednotlivých polovodičových fotovoltaických článků a slouží pro přeměnu světelného záření na elektrickou energii. Toho je docíleno s využitím fotoelektrického jevu.

### 1.1.1 Fotoelektrický jev

Při interakci  $\gamma$  záření s elektrony v obalu atomu mohou nastat tři různé interakce. Jednou z nich je právě fotoelektrický jev. Jedná se o proces, během kterého je látkou pohlceno elektromagnetické záření světla, v důsledku čehož jsou z elektronového obalu atomu absorpční látky emitovány elektrony do prostoru mimo krystalickou mřížku. Tím vznikne tzv. fotoelektron. Fotoelektrický jev dále rozlišujeme na vnitřní a vnější. Při vnější fotoelektrickém jevu dochází k uvolnění elektronů do prostoru mimo látku, a při vnitřním zůstávají uvolněné elektrony v ozařované látce jako tzv. vodivostní elektrony. V případě FV článků hovoříme o vnitřním fotoelektrickém jevu, neboť tyto články jsou vyrobené z polovodičových materiálů a dochází zde k uvolňování elektronů zejména na PN přechodu.

Vysvětlení tohoto jevu s pomocí klasické fyziky nebylo příliš úspěšné. Podle té by totiž součet energie vyzařovaného fotonu a energie potřebné na uvolnění fotonu měl být roven energii dopadajícího záření a závislý pouze na intenzitě dopadajícího záření. To se však experimenty nepotvrdilo, ale byla zjištěna závislost na frekvenci dopadajícího světla. Tu definoval v roce 1900 Max Planck, který definoval tzv. kvantovou hypotézu. Ta říká, že elektromagnetické záření není vyzařováno ani pohlcováno spojitě, ale po určitých "kvantech" energie. Velikost energie tohoto kvanta záleží na frekvenci tohoto záření a lze ji zapsat jako

$$E = hf, \tag{1.1}$$

kde  $h$  je Planckova konstanta ( $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ) a  $f$  je frekvence dopadajícího záření.

Tuto závislost se podařilo zcela objasnit až v roce 1905 Albertu Einsteinovi v jeho článku *O heuristickém hledisku dotýkajícím se vznikem a přeměnou světla* s použitím jeho kvantové teorie. V té totiž říká, že záření při dopadu na povrch ozařovaného materiálu svou energii předá povrchovým elektronům této látky. K tomu, aby došlo k uvolnění elektronu obalu atomu je zapotřebí tzv. ionizační energie. A tato energie může vzniknout pouze v případě, pokud je vlnová délka záření dostatečně malá. Dodáním ionizační energie pak elektron při svém vyzařování

vykoná tzv. výstupní práci. Pokud je energie dopadajícího záření větší než ionizační energie, převezme emitovaný elektron zbytek energie záření jako svou kinetickou energii. To zjednodušeně popisuje rovnice

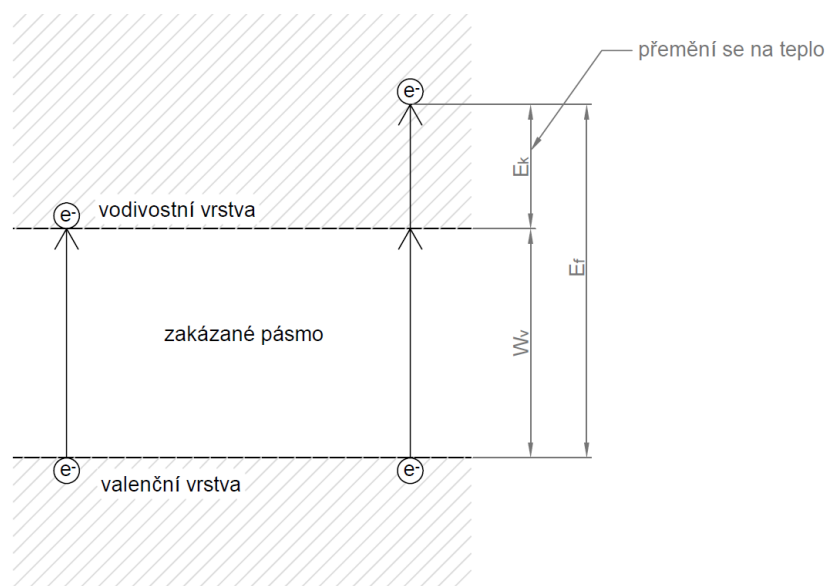
$$E_f = W_v + E_k, \quad (1.2)$$

kteřou lze vysvětlit následujícím způsobem. Foton, dopadající na povrch ozařovaného materiálu předá svou energii  $E_f$  tomuto materiálu. Část této energie je pak spotřebována na uvolnění elektronu, který tím vykoná tzv. výstupní práci  $W_v$ . Ta je vždy definována v závislosti na ozařovaném materiálu, přesněji na šířce zakázaného pásma u tohoto materiálu. Zbylá energie se pak přemění na kinetickou energii uvolněného elektronu  $E_k$ . Po dalším rozepsání lze rovnici zapsat v plném tvaru, a to [1]

$$\frac{hc}{\lambda} = W_v + \frac{1}{2}m_e v^2 \quad (1.3)$$

kde  $h$  je Planckova konstanta,  $c$  rychlost světla a  $\lambda$  jeho vlnová délka. Hmotnost elektronu představuje  $m_e$  a  $v$  jeho rychlost po uvolnění.

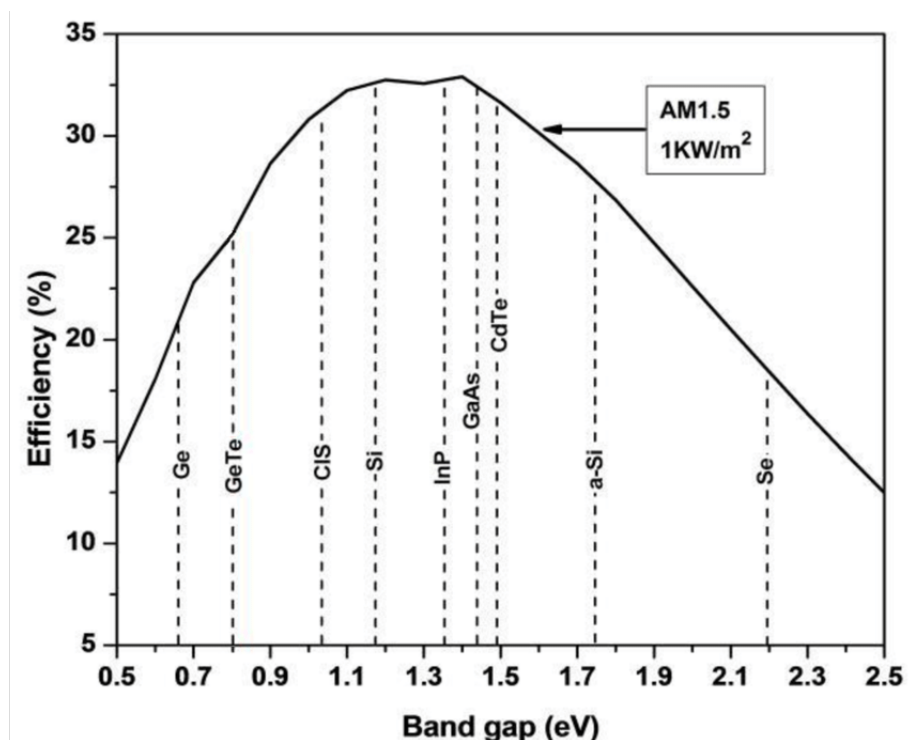
Z této rovnice vyplývá Einsteinem zjištěná závislost na frekvenci záření, v přeneseném významu tedy na jeho vlnové délce, a tedy spektru tohoto záření. Pokud je frekvence příliš nízká, a tedy velká vlnová délka (spektrum světla směrem k infračervené), je energie dopadajícího záření příliš malá na to, aby vůbec došlo k vykonání výstupní práce  $W_v$  a uvolnění elektronu. K fotoelektrickému jevu tedy vůbec nedojde. Pokud je energie dopadajícího záření rovna potřebné výstupní práci dostatečná, dojde k uvolnění elektronu z kovu. V případě, že je energie záření vyšší, než  $W_v$ , elektron získá i kinetickou energii v podobě jeho urychlení na rychlost  $v$ . Tato získaná kinetická energie se díky interakci s krystalovou mřížkou přemění na teplo, jak je znázorněno níže na Obrázku 1.1. Tento proces se nazývá termalizace.



Obrázek 1.1: Energie při uvolnění elektronu, upraveno z [6]

## 1.1.2 Shockley-Queisserův limit

S šířkou zakázaného pásma úzce souvisí tzv. Shockley-Queisserův limit. Ten představuje teoretickou maximální možnou účinnost přeměny dopadajícího záření na elektrickou energii. Závisí na šířce zakázaného pásma daného materiálu a dopadajícího spektru dopadajícího záření. Jak již bylo zmíněno výše, na elektřinu je přeměněno tolik energie, která odpovídá energii potřebné pro překonání zakázaného pásma elektronem a zbytek je přeměněn na teplo. Maximální teoretická účinnost tedy přibližně odpovídá šířce tohoto zakázaného pásma. Závislost maximální možné účinnosti (pro běžné spektrum a intenzitu záření) v závislosti na materiálu (šířce zakázaného pásma) je uvedena na Obr. 1.2.

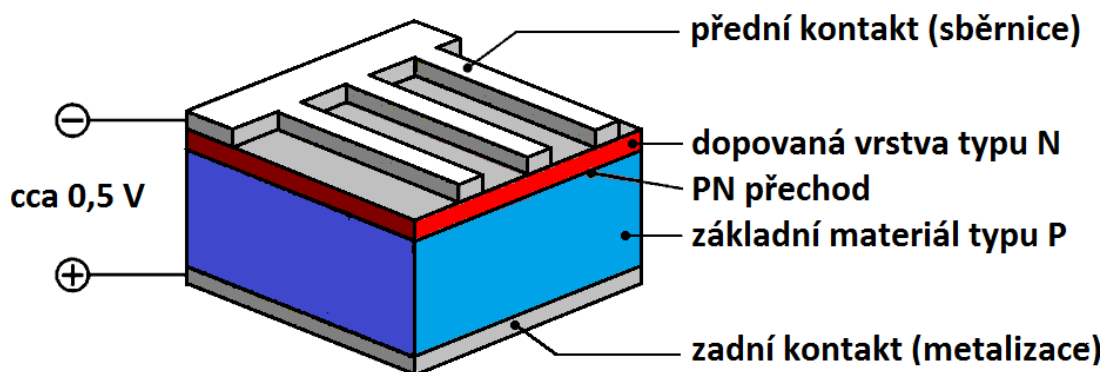


Obrázek 1.2: Maximální účinnost pro běžné spektrum, převzato a upraveno z [19]

Z průběhu je patrné, že například pro nejpoužívanější křemíkové články se maximální teoretická účinnost pohybuje kolem 32-33 %. V současné době je snaha tuto maximální možnou hranici překonat různými metodami, jako například vrstvením článků z různých materiálů, které jsou citlivé na záření různých vlnových délek.

## 1.1.3 Konstrukce FV článku

Fotovoltaický článek funguje na základě využití vnitřního fotovoltaického jevu. Ten byl blíže popsán v části 1.1.1. Materiál využívaný pro výrobu FV článků by měl mít největší citlivost pro vlnové délky denního světla, a proto je, jak bylo zmíněno v předchozí části, využíván k výrobě FV článků především křemík či případně další polovodičové prvky. Konstruktivní uspořádání článku je naznačeno níže na Obrázku 1.3



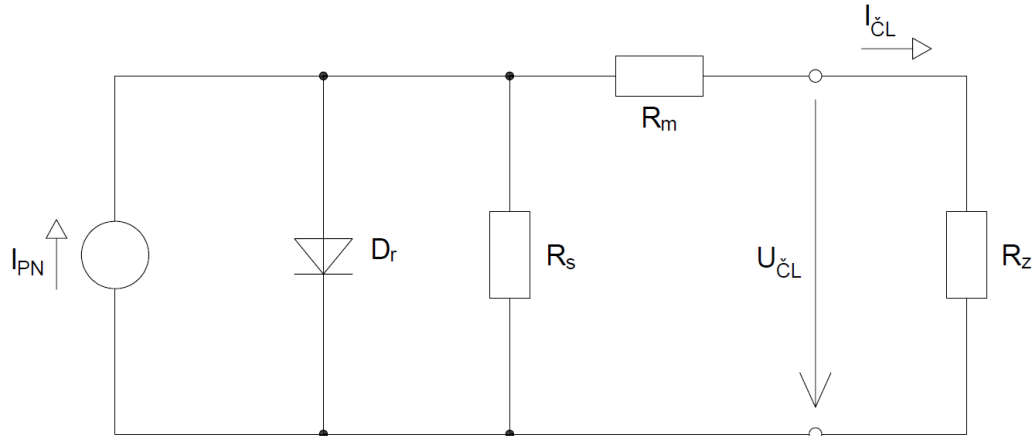
Obrázek 1.3: Konstrukce FV článku [2]

Spodní stěnu tvoří vodivý kontakt, na kterém je nanese vrstva polovodiče typu P. Ten lze získat dopováním křemíku trojmocným prvkem, např. hliníkem, galiem, či indiem. Na tuto vrstvu je nanesen polovodič s vodivostí typu N, čímž dojde ke vzniku PN přechodu. Vodivost typu N je vytvářena dopováním křemíku pětímocným prvkem, například arsenem, který tím do polovodiče poskytne volné elektrony. Kombinací těchto dvou vrstev s odlišnou vodivostí vznikne vestavěné elektrické pole.

Při ozáření vrchní vrstvy s vodivostí typu N zářením o vhodné vlnové délce dojde excitaci elektronu. Volný elektron je díky vestavěnému elektrickému poli PN přechodu separován a urychlován z N vrstvy do P vrstvy. Touto separací dojde ke vzniku fotoelektrického napětí mezi jednotlivými vrstvami, které je u křemíkových článků standardně 0,5 V. FV panely jsou tvořeny sériově-paralelní kombinací článků, kdy výstupní napětí panelu je pak zvětšováno pomocí sériové kombinace jednotlivých článků a proud je zvyšován jejich paralelní kombinací.

## Náhradní schéma

Celý FV článek lze samozřejmě modelovat pomocí náhradního schématu [6]. To je uvedeno níže, na Obrázku 1.4.



Obrázek 1.4: Náhradní schéma FV článku

Proud  $I_{PN}$  představuje proud zdroje, vzniklého ozařováním vrchní vrstvy polovodiče a uvolněním elektronu z obalu atomu. Vzhledem ke vzniku příslušného fotoelektrického napětí na PN přechodu (viz. 1.1.2) je tento přechod propustně polarizován. Proud diodou  $D_r$  pak představuje rekombinaci, která u části elektronů nastane po jejich uvolnění. Odpor  $R_s$  reprezentuje svodový odpor mikrosvodů, tedy technologických nedokonalostí spojení na PN přechodu.  $R_m$  je odpor materiálu (jak polovodičů, tak sběrnic). Výsledné napětí  $U_L$  na výstupu FV článku pak po zatížení tohoto článku odporem  $R_z$  způsobí proud  $I_L$  tekoucí z článku do zátěže.

## 1.2 Druhy záření

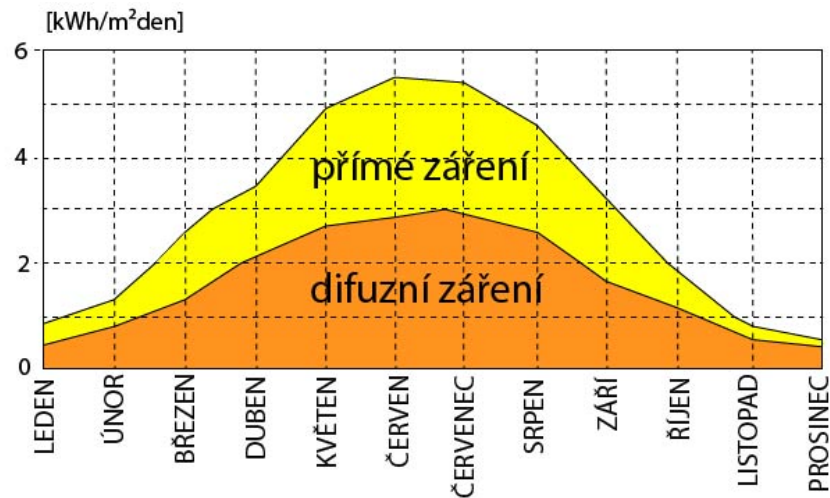
Nejefektivnější záření, dopadající na osvětlovaný materiál, je přímé záření. Pokud budeme hovořit o slunečním záření, pak je přímé záření takové záření, které prošlo atmosférou přímo bez toho, aniž by bylo odraženo, či pohlceno a znovu vyzářeno. Dopadá tedy přímo ze zdroje na osvětlovaný materiál.

Oproti tomu difuzní záření je takové záření, u kterého při průchodu atmosférou došlo k odrazu. Tento odraz může nastat například o prachové částičky v atmosféře nebo o kapky vody. Takové záření sice změnilo směr, ale jeho vlnová délka zůstává stejná jako před odrazem. Difuzní záření vzniká například průchodem slunečního svitu skrz oblačnost a obecně platí, že intenzita difuzního záření roste s rostoucím znečištěním atmosféry.

Součtem těchto dvou složek, tedy difuzní a přímé, získáváme úhrnné, globální záření. V létě, kdy je intenzita globálního záření nejvyšší, tvoří difuzní složka záření přibližně polovinu dopa-



dajícího svitu. V zimních měsících (z celoročního hlediska) pak tento podíl rapidně vzrůstá a difuzní záření je zdrojem hlavní části dopadající energie. To popisuje Obr 1.5.

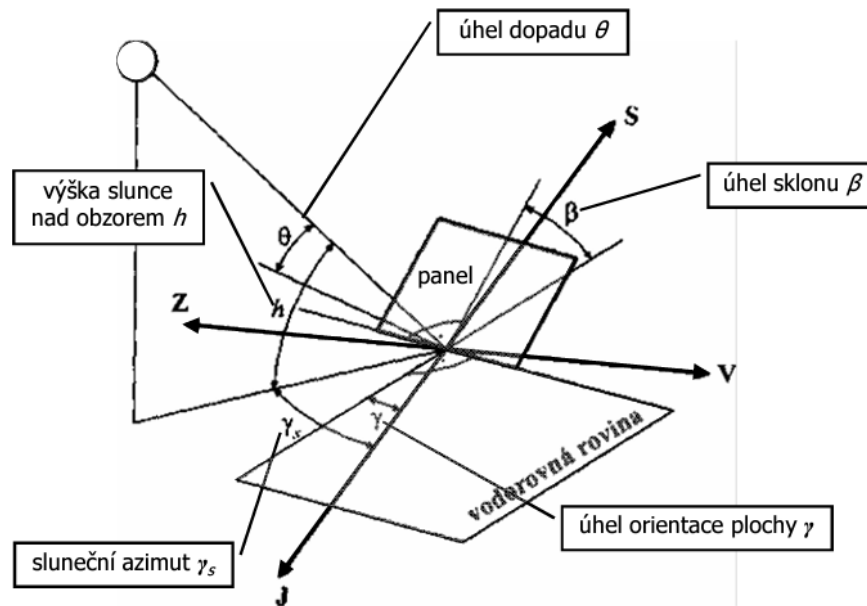


Obrázek 1.5: Podíl přímého a difuzního záření v průběhu roku [7]

### 1.3 Výpočet dostupné energie

Ze záření, které dopadá na Zemi, jen část dopadne na její povrch. Zbytek záření, dopadajícího na planetu Zemi je buďto pohlceno atmosférou, nebo se od mraků a nečistot v atmosféře odrazí zpět do kosmu. V souvislosti s dopadajícím zářením je definována tzv. solární konstanta  $I_0$ , která vyjadřuje dopadající energii za jednotku času na jednotku plochy kolmou na směr paprsků. Tato konstanta je vzhledem k excentrické dráze Země a kolísavému výkonu Slunce ve skutečnosti v průběhu roku proměnná [10]. Na základě dohody byla stanovena nominální hodnota solární konstanty mimo zemskou atmosféru, a to  $J_0 = 1367 \text{ W/m}^2$ . Pro zemský povrch je maximální dopadající energie díky výše uvedeným vlivům  $J_{max} = 1100 \text{ W/m}^2$  [12].

Tato maximální hodnota je ale uvedena na pro záření dopadající kolmo na povrch země. Energie dopadající na zkoumanou plochu pod jiným úhlem než  $90^\circ$  (ať už kvůli rozdílné výšce slunce nad horizontem či kvůli naklopení plochy) je rozdílná. Základní uvažované parametry jsou uvedeny na Obrázku 1.6.



Obrázek 1.6: Orientace osvětované plochy (panelu) vůči slunečnímu záření [12]

Poloha Slunce, jakožto zdroje paprsků, je vzhledem k libovolnému místu na Zemi vypočítatelná. Jak je z Obrázku 1.6 patrné, jeho poloha je definována jeho azimutem  $\gamma_s$  a jeho výškou nad horizontem. K výpočtu musíme znát zeměpisnou šířku  $\Phi$  ( $^\circ$ ) zvoleného místa (0 až  $+90^\circ$  pro severní šířku a 0 až  $-90^\circ$  pro jižní šířku), sluneční úhel  $\gamma_s$  ( $^\circ$ ) a deklinaci  $\delta$  ( $^\circ$ ), neboli úhel spojnice středu Země a Slunce vůči rovině zemskému rovníku (lze též popsat jako úhel svíraný slunečními paprsky a rovinou zemského rovníku).

Sluneční úhel je definován v rozsahu 0 až  $360^\circ$  během 24 hodin - mění se tedy přibližně o  $15^\circ$  za hodinu a lze ho tedy zjednodušeně určit ze vztahu [12]

$$\gamma_s = 15 \cdot (H_r - 12) \quad (1.4)$$

kde  $H_r$  je sluneční čas v hodinách a  $\omega$  nabývá dopoledne záporných hodnot a odpoledne kladných hodnot.

Deklinaci Slunce  $\delta$  lze pro kterýkoliv den určit dle vztahu

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \sin(0,98 \cdot D + 29,7 \cdot M - 109) \quad (1.5)$$

kde  $D$  je pořadí dne v měsíci a  $M$  pořadí měsíce v roce.

Směr dopadu slunečních paprsků definovaný parametry  $h$  a  $\gamma_s$  pak lze určit ze vztahů

$$\sin h = \sin \delta \cdot \sin \Phi + \cos \delta \cdot \cos \Phi \cdot \cos \gamma_s \quad (1.6)$$

a

$$\sin \gamma_s = \frac{\cos \delta}{\cos h} \cdot \sin \gamma_s \quad (1.7)$$

Dále je na Obrázku 1.6 definován úhel dopadu paprsků na plochu  $\theta(^{\circ})$ , který představuje úhel mezi dopadajícími paprsky a normálou ozařované plochy. Závislý je tedy na parametrech výšky Slunce  $h$ , azimutem slunce  $\gamma_s$ , úhlem sklonu panelu  $\beta$  a úhlem orientace plochy  $\gamma$ . Úhel orientace plochy představuje úhel mezi zeměpisným jihem a osou panelu, přičemž pro přesnou orientaci na jih je úhel  $\gamma$  roven  $0^{\circ}$ , pro západní směr nabývá hodnot od 0 do  $+180^{\circ}$ , pro východní pak od 0 do  $-180^{\circ}$ . Samotný úhel dopadu paprsků  $\theta$  vypočítáme jako

$$\cos \theta = \sin h \cdot \cos \beta + \cos h \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma_s - \gamma. \quad (1.8)$$

Intenzitu přímých slunečních paprsků na kolmou plochu  $J_{p0}$  vypočítáme jako

$$J_{p0} = I_0 \cdot \exp -\frac{Z}{\epsilon} \quad (W/m^2) \quad (1.9)$$

kde  $J_0$  je solární konstanta mimo zemskou atmosféru,  $Z$  součinitel znečištění atmosféry a  $\epsilon$  součinitel závislosti výšky slunce nad obzorem na nadmořské výšce. Koeficient znečištění atmosféry  $Z$  je udáván jako násobek čisté atmosféry a je definován pro různá roční období (zohlednění oblačnosti) a různé oblasti (města, venkov, horské oblasti, atd. - zohlednění znečištění lidskou činností). Intenzitu přímého slunečního záření pro obecně nakloněnou plochu  $J_{pT}$  vypočteme jako

$$J_{pT} = J_{p0} \cdot \cos \theta \quad (W/m^2). \quad (1.10)$$

Při výpočtu difuzního záření je nutné zahrnout jeho dvě hlavní složky. První tvoří světlo rozptýlené už v atmosféře, například o částičky vody či prachu. Druhá složka obsahuje přímé záření, které se po dopadu odrazilo o zemský povrch (či jinou překážku). Pro výpočet je nutné znát hodnotu  $I_p$ , což je intenzita přímého záření na vodorovnou plochu a vypočteme ji jako

$$J_p = J_{p0} \cdot \sin h \quad (W/m^2) \quad (1.11)$$

a také musíme znát hodnotu intenzity difuzního záření na vodorovnou plochu  $I_d$ , kterou vypočítáme dle vztahu

$$J_d = 0,33 \cdot (J_0 - J_{p0}) \cdot \sin h \quad (W/m^2) \quad (1.12)$$

Zjednodušeně se pak intenzita difuzního záření na obecně orientovanou plochu  $I_{dT}$  vypočítá jako

$$J_{dT} = 0,5 \cdot (1 + \cos \beta) \cdot I_d + 0,5 \cdot r \cdot (1 - \cos \beta) \cdot (J_b + J_d) \quad (W/m^2) \quad (1.13)$$

kde  $r$  (–) značí reflexivitu okolních ploch a v praxi se nejčastěji udává  $r = 0,20$ .

Celková intenzita slunečního záření, které dopadá na obecně nakloněnou rovinu tedy odpovídá součtu dopadajícího přímého a difuzního záření

$$J_T = J_{pT} + J_{dT} \quad (W/m^2) \quad (1.14)$$

Teoretické maximální množství energie, které lze získat za den, odpovídá integrálu intenzity slunečního záření od doby východu slunce po západ slunce

$$H_{T,den,teor} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} I_T d\tau \quad \left( \frac{kWh/m^2}{den} \right). \quad (1.15)$$

Vzhledem k tomu, že intenzita osvětlení nemá v průběhu dne ideální průběh a mění se, určují se další dva parametry. Tzv. střední intenzita  $H_{T,st}$ , definovaná

$$H_{T,st} = \frac{H_{T,den,teor}}{\tau_{teor}} \quad \left( \frac{kWh/m^2}{den} \right), \quad (1.16)$$

přičemž  $\tau_{teor}$  je dána časem východu Slunce  $\tau_1$  a jeho západem  $\tau_2$  za horizont v daném místě. Druhým parametrem je poměrná doba slunečního svitu  $\tau_r$

$$\tau_r = \frac{\tau_{skut}}{\tau_{teor}}. \quad (1.17)$$

Skutečnou energii slunečního svitu, která dopadla na jednotku plochy za den určíme podle vztahu

$$H_{den} = \tau_r \cdot H_{T,st} \quad \left( \frac{kWh/m^2}{den} \right). \quad (1.18)$$

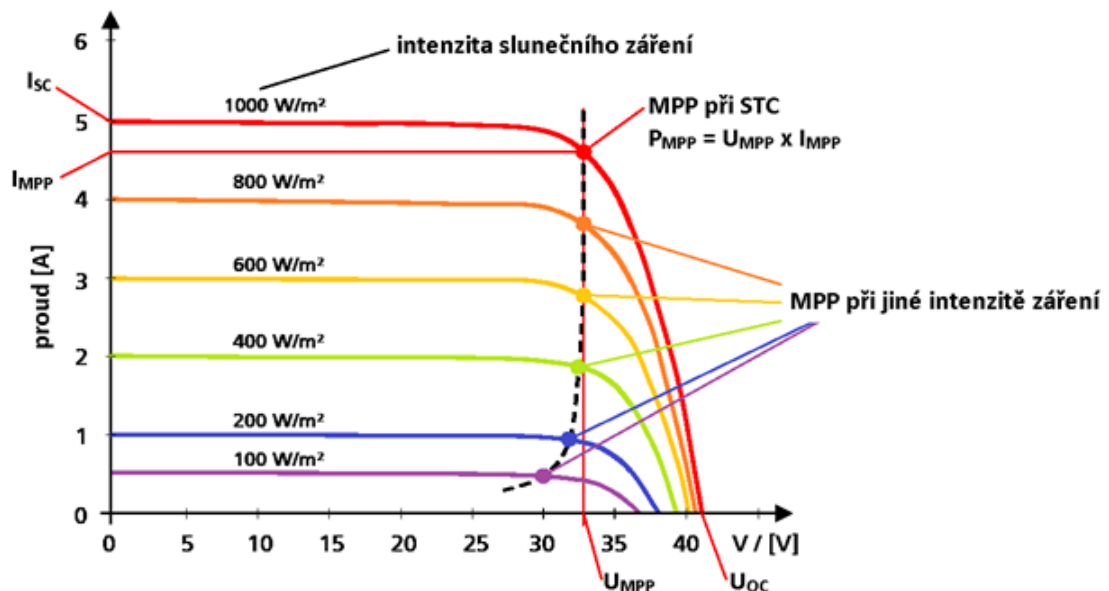
## 1.4 Parametry FV článku

Fotovoltaické panely jsou, stejně jako jiná elektrická zařízení, definována určitými štitkovými parametry. Těmi jsou především:

- $P_{MPP}$  (Wp) - jmenovitý výkon panelu udávaný v jednotkách Watt peak
- $U_{MPP}$  (V) - napětí při udávaném jmenovitém výkonu
- $U_{OC}$  (V) - napětí panelu naprázdno
- $I_{MPP}$  (A) - proud tekoucí při jmenovitém výkonu
- $I_{SC}$  (A) - proud nakrátko - maximálním možným proud, který je panel schopný dodat

Doplňujícím parametrem, který může na štítku být je  $I_{REVERSE}$  (A) - maximální možný závěrný proud (v závislosti na použitých diodách, viz dále).

Vzhledem k závislosti FV článku na vnějších podmínkách, jsou tyto uváděné parametry platné pro tzv. standardní testovací podmínky (STC - Standard Test Conditions). Při testování v těchto podmínkách je stanovena teplota okolí 25 °C, spektrum dopadajícího záření AM = 1,5 (záření, které na zemský povrch dopadá pod úhlem 45°) a intenzita záření 1000 W/m<sup>2</sup>. Pro tyto podmínky platí základní V-A charakteristika.



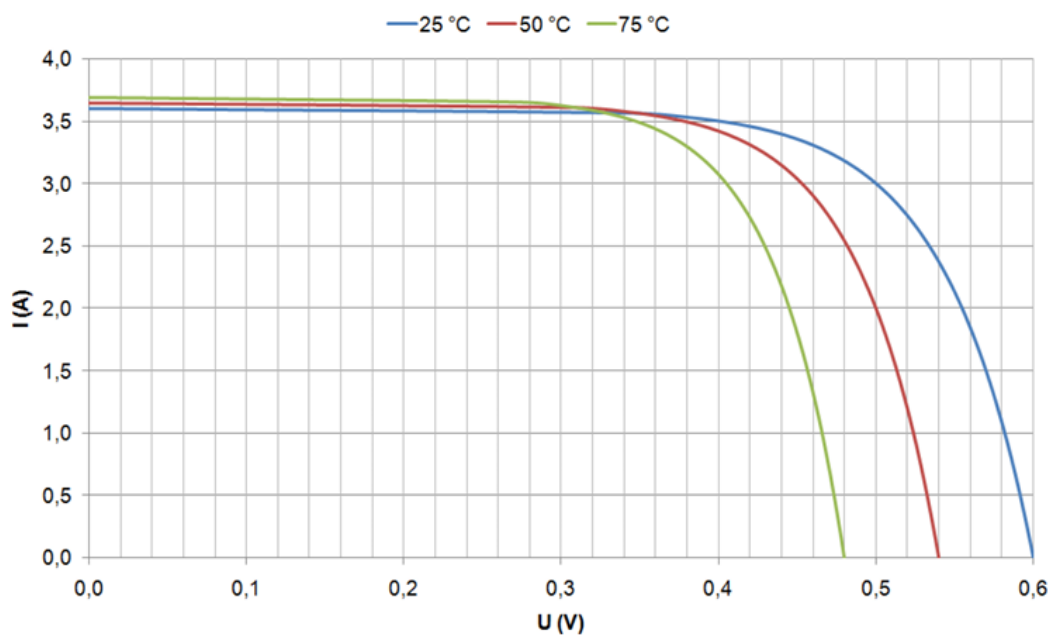
Obrázek 1.7: Změna V-A charakteristiky panelu v závislosti na intenzitě záření [2]

Jak je na charakteristice na Obrázku 1.7 naznačeno, jeden z faktorů ovlivňujících výkon panelu je intenzita dopadajícího záření ve W/m<sup>2</sup>. Se snižující se intenzitou osvětlení, tedy i měnícím se spektrem tohoto záření, se snižuje výkon dodávaný panelem.

Bod *MPP* je pak pracovní bod, ve kterém fotovoltaický panel poskytuje maximální možný výkon. Tento bod se, jak je z V-A charakteristiky patrné, mění s intenzitou záření. V běžné FVE je

nejčastěji tento bod sledován střídačem, aby docházelo k co největšímu možnému zisku energie z FVE. Napětí  $U_{OC}$  je napětí naprázdno a představuje maximální možné napětí, kterého lze na panelu dosáhnout. Pokud je panel zatížen a začne protékat do zátěže proud, napětí vždy poklesne.

Dalším důležitým parametrem, který ovlivňuje celkový dodávaný výkon, je teplota článku. Změna V-A charakteristiky v závislosti na teplotě je uvedena na Obrázku 1.8. Obecně lze říci, že s rostoucí teplotou článku maximální možný výkon klesá. Tento pokles charakterizuje tzv. teplotní koeficient. Ten udává, o kolik procent poklesne výkon, pokud se teplota článku zvýší o  $1^{\circ}\text{C}$ . Standardně se u křemíkových článků pohybuje v desetínách procenta. Jak účinnost, tak teplotní koeficient však záleží na typu panelu.



Obrázek 1.8: Změna V-A charakteristiky panelu v závislosti na jeho teplotě [3]

[1] [2] [3] [6] [7] [8] [9] [10] [11] [20]

## 2 Fotovoltaické panely

Přesto, že fyzikální princip FV článků zůstává stále stejný, existuje mnoho druhů fotovoltaických panelů. Každá z technologií s sebou přináší určité výhody, které jsou ale vykoupené určitými nevýhodami.

Teoretická maximální účinnost

### 2.1 Základní dělení

FV panely lze dělit dle úhlu pohledu do několika různých skupin. Jedním z kritérií může být například materiál použitý na výrobu FV článků daného panelu, či to může být technologie zpracování tohoto materiálu. Dále také může být dělení panelů hodnoceno z hlediska jejich konstrukčního uspořádání panelu.

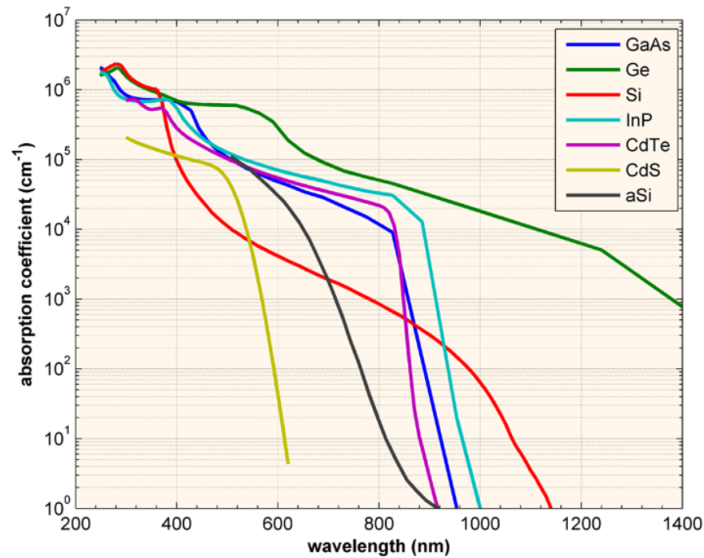
#### 2.1.1 Křemík a ostatní materiály

Ne každý materiál lze použít pro výrobu FV článků. Je zde totiž důležitý faktor, a to schopnost efektivní absorpce světla daným materiálem (schopnost uvolňovat elektrony) a také na šířce zakázaného pásma.

Schopnost světla pronikat do materiálu vyjadřuje tzv. absorpční koeficient  $\alpha$ . Ten definuje, jak hluboko do materiálu je schopno proniknout světlo o určité vlnové délce. Pokud je tento koeficient malý, je absorpce světla malá. Platí tedy, že čím vyšší absorpční koeficient, tím lepší absorpce světla. Také pokud je materiál příliš tenký, může záření o určité vlnové délce procházet skrze něj bez jeho pohlcení. Naopak příliš tlustá vrstva materiálu vede k pohlcení energie a její přeměně na teplo. Závislost absorpčního koeficientu na vlnové délce záření je pro vybrané materiály uvedena níže na Obrázku 2.1.

Křivka absorpčního koeficientu u polovodičových materiálů nezačíná v nule. Začíná na hodnotě takové vlnové délky, kdy je záření o této vlnové délce schopno dodat atomu materiálu minimální nutnou energii pro to, aby elektron překonal zakázaný pás. Proto má FV článek z určitého materiálu i určité využitelné pásmo světelného spektra.

Dnes nejpoužívanější komerční FV panely jsou založené na bázi křemíku. Ten je využíván hned z několika důvodů. Zaprvé je to druhý nejrozšířenější prvek v zemské kůře. Je tedy relativně levný a snadno dostupný. Druhým důvodem, proč je v současné době nejpoužívanější, je jeho využitelné spektrum světla, které nejlépe odpovídá spektru viditelného denního světla. To lze vidět i na Obrázku 1.2 na straně 15, v části 1.1.2. Z něj je též patrné, že pro parametry na denním světle a jeho dostupnost je v současné době nejvyužívanější.



Obrázek 2.1: Závislost absorpčního koeficientu na vlnové délce pro vybrané materiály [13]

Další využívané polovodičové prvky jsou například kadmium, arzén, telur, galium, selen či indium. Nejznámější z těchto nekřemíkových technologií jsou tzv. CIS (měď - indium - diselenid) panely, případně CIGS (měď - indium - galium - diselenid) a GaAs (arsenid galia). Hlavními důvody pro používání těchto prvků jsou ideální šířka zakázaného pásma pro využívání světla ve viditelném spektru a nízká teplotní závislost (nízký teplotní koeficient, viz 1.1.3). Nevýhodou ovšem je toxicita části z nich, jejich vzácnost a tedy i nižší dostupnost a vyšší cena. V neposlední řadě také horší vlastnosti části z nich pro přímé sluneční záření. Tato nižší účinnost ovšem neplatí konkrétně pro GaAs články, které naopak vynikají svou velmi vysokou činností (přes 30 % [17]). Používají se proto především v kosmických aplikacích, kde cena či toxicita při výrobě nejsou rozhodujícím faktorem.

Poslední významnější alternativu, která však v posledních letech zažívá růst, představují organické FV články. Ty využívají polovodičové materiály organického původu na bázi uhlíku, tedy podobné plastům. Z toho plynou i jejich základní vlastnosti. Mezi jejich největší výhody patří jejich ohebnost, extrémně nízká cena (možnost tisku i na 3D tiskárně) a velmi malá hmotnost. Mohou být též průsvitné, či dokonce průhledné. Jsou tu ale zásadní nevýhody, bránící jejich výraznému rozšíření. Těmi jsou velmi nízká účinnost (jednotky procent) a malá životnost (malá odolnost vůči vnějším vlivům). Nízká účinnost organických panelů je dána fyzikálně jejich pružnou atomovou vazbou a tudíž zhoršenou schopností vést elektrony. Jak již bylo zmíněno, v posledních letech je však ve vývoji organických článků dosahováno významných pokroků. Nejnovější organické panely, vyvinuté týmem z University of Michigan slibují výrazné zvýšení účinnosti a životnosti. Zvýšení životnosti bylo dosaženo nanášením tenké vrstvy oxidu zinku na přední stranu panelu. Ta má za úkol bránit průchodu UV záření, které má podstatný vliv na degradaci, do vrstvy organického materiálu. Usnadňuje též vedení elektronů emitovaných slunečním zářením k elektrodě na zadní straně. Ve výsledku tak tým dosáhl účinnosti článku



8,1 % (resp. 10,8 % při použití stříbrných anod) a životnosti 30 let, přičemž panely propustí 43 %, resp. 45 % světla. [14] Díky tomuto významnému posunu se tak otevírá možnost umístit'ovat transparentní panely například na okna. U výškových budov pak skleněné plochy v mnoha případech představují velmi podstatnou část budovy. Další možností zvýšení životnosti těchto panelů pak představuje jejich umístění mezi skla dvojitých oken, kde budou dodatečně chráněny proti nepříznivým vlivům venkovního prostředí.

### 2.1.2 Krystalické a amorfní technologie

Používané materiály lze technologicky zpracovat různým způsobem. Proto i panely ze stejného materiálu, například křemíku, budou mít rozdílné vlastnosti, pokud bude křemík zpracován různými technologickými postupy a bude mít tedy jinou strukturu. Obecně lze dle struktury dělit panely na krystalické a amorfní, někdy nazývané tenkovrstvé. V případě krystalických panelů ještě hovoříme o dělení na monokrystalické a polykrystalické panely.

#### Monokrystalické články

Monokrystalické články jsou technologicky nejstarší. Jejich výroba probíhá z monokrystalu křemíku (případně jiných prvků nebo jejich sloučenin), který je vyráběn Czochralského metodou. Při té je za vysoké teploty (1400 - 1500°C pro křemík) vytvořena tavenina vysoce čistého materiálu, která je následně legováním přidán dopant v závislosti na tom, zda je požadován polovodič typu N nebo typu P. Do této taveniny je ponořen tzv. zárodečný krystal, který se tím částečně nataví a za otáčení je postupně z taveniny vytahován. Tím vznikne tažený ingot z jediného krystalu, který je následně nařezán na tenké destičky. Tato výroba je energeticky i technologicky náročnější, a tyto články jsou tudíž o něco málo dražší na výrobu.

Jejich výhodou je ale především jejich stálost a pomalá degradace, tedy i delší životnost. Mají též ze všech článků nejlepší výnos energie ze stejné plochy při dostatečném osvětlení a ideálních podmínkách (účinnost přibližně 15-21 %). Jejich homogenní struktura jim též uděluje lepší vzhled, což bývá při komerčním využití občas důležitý faktor.

#### Polykrystalické články

Při výrobě polykrystalických článků je jako základ použita též tavenina křemíku (nebo jiných prvků či sloučenin), který může být případně dopovaná. Tato tavenina je poté nalita do forem dlouhých ingotů, kde postupně chladně a samovolně krystalizuje. Tím vzniknou typické "mapy" v této struktuře. Ty představují potenciální problém, protože při nedokonalém technologickém zpracování může na hranicích těchto krystalů vzniknout pro elektrony potenciálová bariéra. Při příliš rychlém chladnutí může také docházet k poruchám ve struktuře a dislokacím v krystalové mřížce, což je pro výrobu FV článku velmi nežádoucí. Následně ji ingot nařezán na tenké destičky.

Polykrystalický článek má v absolutním měřítku nižší účinnost než monokrystalický článek,

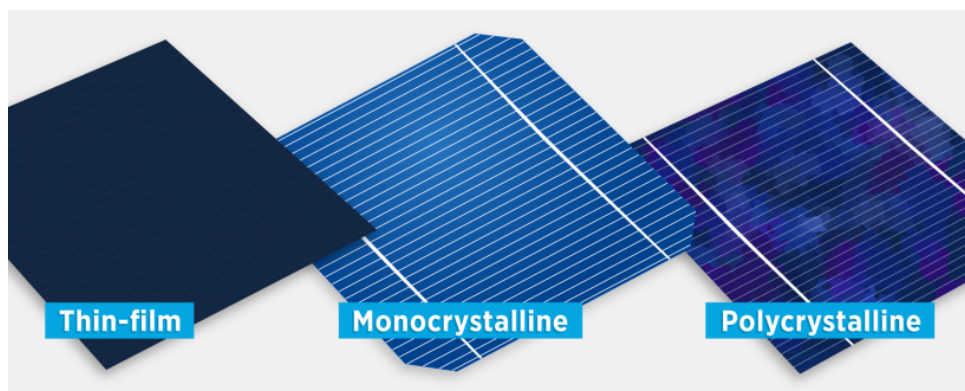
cca 12-18 %. Má však lepší účinnost při nepřímém záření a horších optických podmínkách a jeho výroba je méně nákladná. Tlouška vrstvy materiálu u polykrystalického i monokrystalického článku se pohybuje kolem 0,3 mm.

### **Amorfní (tenkovrstvé) články**

Oproti tomu amorfní články představují jiný typ struktury s úplně rozdílným způsobem výroby. Do této kategorie spadají především nekřemíkové technologie - panely CIS, CIGS, GaAs a panely z organických materiálů. Při tomto způsobu výroby článků nejsou taženy ani odlévány žádné ingoty, které jsou následně řezány. Materiál je nejprve rozložen ve vodíkové atmosféře. Poté je ve vakuové komoře při teplotě přibližně 200°C nanášena na podklad, například sklo, plast, či kov. Tímto postupem se dá dosáhnout velmi tenké vrstvy polovodičového materiálu o tloušťce řádově jednotek  $\mu\text{m}$ . Proto jsou tyto články také nazývány jako tenkovrstvé. Takto tenká vrstva polovodiče může být flexibilní, takže tato technologie může posloužit k výrobě ohebných článků a "fotovoltaických fólií".

Amorfní struktura je nepravidelná, bez pevné krystalové mřížky. To přináší větší absorpci slunečního záření. Ale právě nepravidelná struktura způsobuje větší počet poruch tuto výhodu vyšší absorpce do jisté míry eliminuje. Atomy totiž nemusí být dostatečně blízko u sebe a nedojde tak ke vzniku vazby. Tato absence vazeb způsobuje vznik nenasycených oblastí a energetických hladin, na kterých dochází k rekombinaci uvolněných elektronů. Tento jev snižuje celkovou účinnost tenkovrstvých panelů. Lze ho částečně eliminovat pasivací těchto vazeb, např. vodíkem [7].

Jednou z dalších výhod, plynoucí z tenké vrstvy a nepravidelné struktury je menší teplotní závislost. Amorfní panely jsou tak méně citlivé na přehřívání a účinnost s rostoucí teplotou klesá pomaleji, než u krystalických článků. Celková účinnost těchto panelů se pohybuje mezi 5 až 10 % a pro stejný výkon proto vyžaduje přibližně dvojnásobnou plochu než křemíkové technologie. Účinnost je sice celkově o výrazně menší než u např. monokrystalických článků, ale tenkovrstvé články jsou zdaleka nejcitlivější na difuzní záření a jejich účinnost tak neklesá tak výrazně se zhoršujícími se osvitovými podmínkami. Tato technologie nanášení polovodičů vyžaduje také zdaleka nejmenší množství polovodičového materiálu. Tyto články jsou tak při velkosériové výrobě výrazně levnější.



Obrázek 2.2: Struktury (zleva) tenkovrstvého, monokrystalického a polykrystalického článku, převzato z [21]

### 2.1.3 Multivrstvé technologie

Jak je popsáno na začátku podkapitoly 2.1.1, každý materiál má jiný absorpční koeficient pro záření o dané vlnové délce. Z této skutečnosti vychází základní myšlenka multivrstevných fotovoltaických článků. Pro zvýšení účinnosti článků je zda snaha využít širší spektrum záření. Tento typ panelu se skládá z několika vrstev různých materiálů, kdy každá z nich je navržena tak, aby zachytila záření o dané vlnové délce a přeměnila ho na elektrickou energii. Tyto vrstvy jsou obvykle vyrobeny z různých polovodičových materiálů, jako je křemík, germanium, indium-galium-fosfid (InGaP) a další. Nanášení různých vrstev však nemusí sloužit pouze ke zvýšení účinnosti, ale také odolnosti a životnosti. Na povrch FV článku může být aplikován například grafen, který zvýší odolnost proti různým druhům poškození. [22] Ať už vůči nechanickému poškození např. kroupami či mechanickému poškození v důsledku působení vysokých teplot (dilatace materiálů). Též může zvýšit odolnost např. v korozivním prostředí. To znamená, že tyto panely mohou být použity v různých prostředích a aplikacích.

### 2.1.4 Pevné ukotvení a trackery

Za účelem zvýšení výnosu z FVE se kromě klasických pevných konstrukcí s fixně daným azimutem i sklonem používají i systémy vybavené sledovačem slunečního záření, tzv. trackery. Tyto systémy mají za úkol naklápět FV panely tak, aby na ně pokud možno sluneční záření dopadalo co nejvíce kolmo. Toto naklápění může být v jedné, nebo ve dvou osách. V jedné, vodorovné ose, může být upravován sklon panelů, ve vertikální pak azimut. Případně je možné zkombinovat úpravu sklonu a azimutu. V tom případě pak hovoříme o sledování ve dvou osách.

Řízení servomotorů pro naklápění může být řízeno pevně daným programem, na bázi polohy slunce a ročního období. Další možností je řízení pomocí snímačů intenzity osvětlení umístěných k panelu/na panel. Systém se pak naklápí do směru, ze kterého je zaznamenána největší intenzita. Tento způsob řízení trackeru umožňuje využívat nejlepšího osvětlení například při částečné oblačnosti.

Pohyblivé konstrukce představují zajímavou možnost, jak lze zvýšit výnosnost FVE. Je však nutné brát v potaz i fakt, že servo motory sledovačů spotřebovávají sami elektřinu a tím je výhoda zvýšení výnosu částečně eliminována. Další otázkou je spolehlivost, cena a životnost pohonného systému, který je vystaven povětrnostním vlivům. V případě trackerů na bázi snímačů intenzity osvětlení je pak riziko znečištění těchto snímačů vedoucí k jejich nesprávnému fungování či nesprávnému vyhodnocování falešných odrazů například od plechových střech skleněných ploch apod.

I přes nespornou výhodu zvýšení výnosů jsou negativa taková, že je v současné době rozšířenější řešení s pevnými konstrukcemi.

[4] [6] [13] [7] [9] [14] [15] [16] [17] [18] [21] [22] [23]

### 3 Modelová instalace

Pro porovnání byla z panelů vytvořena modelová instalace, čítající celkem čtyři panely využívající odlišné technologie. Na základě konzultace s vedoucím práce byly tyto panely zapojeny a navrhl jsem, realizoval a naprogramoval měřicí systém postavený na platformě Arduino, který v určených intervalech sledoval vybrané provozní parametry. Tato modelová instalace se nachází v malé obci Malšice na Tábořsku ( $49^{\circ}21'54''\text{N}$  a  $14^{\circ}34'19.2''\text{E}$ ) a je umístěna na střeše garážového stání, které má střechu z pálených tašek se sklonem  $38^{\circ}$  a orientací na jihovýchod ( $145^{\circ}$ ). V rámci měření jsou též sledovány povětrnostní parametry, a to intenzita svitu a teplota vzduchu u panelů.



Obrázek 3.1: Pohled na modelovou instalaci



Obrázek 3.2: Detail modelové instalace

### 3.1 Vybrané typy panelů

K měření byly vybrány panely malého výkonu, které bylo možné si zapůjčit v rámci Katedry elektroenergetiky FEL ZČU. Konkrétně se jedná o polykrystalický křemíkový panel (na Obrázku 3.2 vlevo nahoře), monokrystalický křemíkový panel (vpravo nahoře), CIS panel (měď-indium-diselenid, vpravo dole) a organický panel (vlevo dole). Na rámečku CIS panelu je též patrné umístění senzoru intenzity osvětlení (viz kapitola 3.4).

#### Polykrystalický křemíkový panel

Jako zástupce polykrystalických článků byl vybrán článek zasazený do plastové střešní tašky. Bohužel, panel je opatřen pouze názvem výrobce PHOTOWATT bez označení typu, a jsou na něm uvedeny pouze štítkové parametry, zapsané v tabulce 3.1.

Tabulka 3.1: Uvedené štítkové parametry polykrystalického panelu

$U_{nom,max}$	300 VDC
$I_{sc}$	2,9 A
$U_{ocv}$	4,8 V

Vzhledem k absenci hodnot napětí a proudu pro bod maximálního výkonu, nelze z uvedených parametrů stanovit jmenovitý výkon článku. Ani pokus o dohledání parametrů článku podle kódových označení na panelu nebyl úspěšný. Pouze při proměření V-A charakteristiky (viz. kapitola 4.1.1) bylo možné získat hrubý přehled o výkonových možnostech panelu. U polykrystalického panelu jsou očekávány lepší vlastnosti při horších osvitových podmínkách a rychlejší začátek výroby ráno, a déle trvající výroba večer oproti monokrystalickému.

#### Monokrystalický křemíkový panel

V modelové instalaci byl použit i monokrystalický křemíkový panel zasazený v hliníkovém rámu. Křemíková technologie byla sice již zastoupena polykrystalickým panelem, ale mým cílem bylo prozkoumat i rozdíly mezi křemíkovými panely zpracovanými pomocí jiné technologie. Jedná se zde o panel od firmy SOLARTEC, model STR 36-13, jehož parametry jsou uvedeny níže v tabulce 3.2.

Tabulka 3.2: Uvedené štítkové parametry monokrystalického panelu

$P_{max}$	13 Wp
$U_{nom}$	12 V
$U_{MPP}$	17,4 V
$I_{MPP}$	0,75 A
$U_{oc}$	21,5 V
$I_{sc}$	0,82 A
$U_{sys.max.}$	750 V

Monokrystalická technologie by dle předpokladů měla mít nejvyšší účinnost, a tedy i nejvíce dodávaného výkonu na jednotku plochy.

### CIS panel

Dalším použitým panelem v mé instalaci je panel založený na CIS technologii. Oproti předchozím křemíkovým panelům představuje tento panel zástupce tenkovrstvé (amorfní) technologie. Použitý panel je od výrobce Ascent SOLAR, konkrétně model WSME-0045-024-DB-03. Jeho parametry jsou uvedené v tabulce 3.3.

Tabulka 3.3: Uvedené štítkové parametry CIS panelu

$P_{max}$	4,5 Wp
$U_{MPP}$	18,2 V
$I_{MPP}$	0,25 A
$U_{oc}$	24,5 V
$I_{sc}$	0,31 A

Na základě obecných vlastností byly u panelu očekávány především lepší vlastnosti v závislosti na teplotě u panelů, tedy menší pokles výkonu v důsledku vysokých teplot, což se i potvrdilo.

### Organický panel

Posledním zástupcem v modelové instalaci byl panel na organické bázi, též spadající do kategorie tenkovrstvých panelů. Je od výrobce KONARKA, a jedná se o produktovou sérii Power Plastic Series 20. Tento panel je nejmenší z celé série produktů, model 120. Jeho hlavní parametry, udávané výrobcem na jeho webových stránkách [24], jsou uvedené v tabulce 3.4. Celý produktový list je přiložen k práci jako Příloha I - Produktový list organického panelu. Parametry uváděné v tabulce 3.4 jsou výrobcem vztažené na jednotku 1 slunce (americký výrobce). Tato jednotka představuje hodnotu osvětlení  $100 \text{ mW/cm}^2$  [25], tedy v přepočteno  $1000 \text{ W/m}^2$  a odpovídá tedy standardním testovacím podmínkám (STC).

Tabulka 3.4: Uvedené štítkové parametry organického panelu

$P_{max}$	1,3 W
$U_{MPP}$	8,0 V
$I_{MPP}$	0,159 A
$U_{oc}$	11,1 V
$I_{sc}$	0,199 A

Tento zástupce organických panelů, které vynikají svojí extrémně nízkou cenou, flexibilitou společně s nízkou hmotností (tedy i možností využití například při pěší turistice), či možností průsvitnosti/průhlednosti, byl zařazen do instalace především z důvodu porovnání s ostatními běžnými panely. Jak bylo uvedeno v kapitole 2.1.1, mají organické panely zásadní nevýhody a důvod pro zahrnutí je tedy především prozkoumat markantnost těchto nevýhod a zhodnotit konkrétní naměřené výsledky v poměru k uváděným výhodám.

## 3.2 Zapojení systému

V běžném, komerčním využití jsou panely zapojeny do zátěže přes střídač. Zátěž může tvořit buďto síť s různými odběry, nebo případně baterie, která se nabíjí. Střídač samotný je pak v drtivé většině případů vybaven funkcí MPPT (Maximum Power Point Tracking). To znamená, že střídač je schopen sledovat bod maximálního výkonu. Jak je uvedeno v kapitole 1.4 na Obrázku 1.7, při různém osvitu se mění napětí a odebíraný proud, při kterých panel dosahuje maximálního výkonu (pro daný osvit). Střídač, vybavený funkcí MPPT je schopný tento bod určit a provozovat panely v takovém bodě, kdy dodávají maximální dostupný výkon.

Vzhledem k pořizovacím cenám takových střídačů byl ale po konzultaci s vedoucím práce zvolen pro toto měření jiný přístup. Každý z panelů byl zatížen keramickým výkonovým rezistorem s hodnotou  $68 \Omega$  a schopností na sobě zmařit výkon až 10 W, respektive 15 W pro výkonnější panel. Na těchto odporech je měřen výkon, vyráběný panely, i když jsou tak panely provozovány mimo ideální bod zatížení. Charakteristika panelů ale byla proměřena posuvným odporem, jak je uvedeno v kapitole 4.1.1.

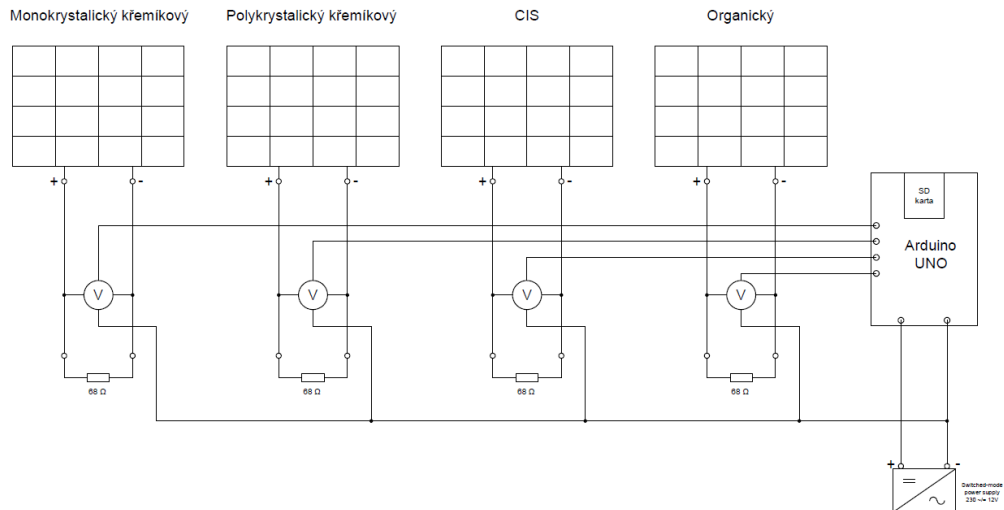
Vzhledem k možnostem uložení měřícího systému, byly napěťové senzory umístěny k mařicím odporům. I proto (i kvůli relativně malému výkonu panelů) byl též kladen důraz na to, aby nebyly vodiče mezi panelem a odporem příliš dlouhé, a nedocházelo tak k přílišnému zkrácení měřeného napětí. Umístění u mařicích odporů bylo zvoleno i z důvodu, že v praxi provozovatele FVE zajímá především výkon, jaký je systém schopný dodat do zátěže.

Celkové schéma zapojení je uvedeno na Obrázku 3.3. Je na něm naznačen i měřící systém, kterému se věnuje následující Kapitola 3.3. V plné velikosti je schéma zapojení přiloženo k práci jako Příloha II - Schéma zapojení.

## 3.3 Měřící systém na platformě Arduino

Jako platformu pro systém měření vybraných parametrů (více rozebráno v Kapitole 4) jsem si zvolil Arduino. Bylo to především z důvodů příznivé ceny a snadné dostupnosti různých potřebných modulů, open-source pojetí celé platformy a také z důvodu univerzálnosti použití vývojových desek Arduino. I přesto, že jsem s programováním desek Arduino a stavbou systému na jeho základu neměl žádné větší předchozí zkušenosti, nebylo to na překážku. Programovací jazyk Wiring, který je zde využíván, je založen na jazyce C++. Též logika výstavby celého systému a připojování různých periférií má mnoho společného s klasickými PLC. Tím, že jsem se již v průběhu studia setkal jak s PLC, tak s programováním v jazyce C, bylo nutné si doplnit jen určité znalosti, specifické pro Wiring a Arduino.





Obrázek 3.3: Schéma zapojení modelové instalace

### 3.3.1 Hlavní měřicí systém

V průběhu příprav instalace na jaře 2022 vzniklo hned několik zamýšlených verzí. První verze počítala s bezdrátovým přenosem dat na servery Arduino, měřením napětí na zátěži, proudu zátěží a teploty u panelů pomocí NTC termistoru. Objevilo se zde několik problémů, a to především s kompatibilitou napěťových senzorů (jedná se v podstatě pouze o analogové napěťové děliče) a vývojové desky s bezdrátovým přenosem. Sensory totiž pracovali s napěťovým rozsahem 0 až 5 V, zatímco zamýšlená vývojová deska Arduino Nano 33 IoT dovozovala na analogovém vstupu maximální napětí 3,3 V. Při snaze vyřešit tento problém předřadným napěťovým děličem byl ale zjištěn podstatný vliv na přesnost měřeného napětí (to se při použití děliče začalo lišit o přibližně 10 %). Dalším problémem se objevil při použití proudových senzorů, které pracovali na základě Hallova jevu. Instalované panely poskytovaly totiž velmi malý proud a proudové senzory poskytovaly relevantní data až od proudu 300 mA. Z těchto důvodů vznikla druhá verze měřicího systému.

Ten byl postaven pouze s NTC termistorem pro měření teploty u panelů a s napěťovými senzory (pro každý panel jeden). Proud zátěží je dopočítáván na základě znalosti hodnoty připojeného odporu a napětí na něm. Jako jádro systému byla vybrána deska Arduino Nano, která sice neumožňuje (bez přídavné periferie) bezdrátově odesílat data, ale nabízí na analogovém vstupu rozsah až do 5 V. Ukládání dat bylo vyřešeno přidáním modulu pro SD kartu s modulem "Real-time clock". Naměřená data jsou tak ukládána do textového souboru na SD kartu s časovou značkou. K napájení byl zvolen modulový napájecí AC/DC zdroj od společnosti LY-ONZG, konkrétně model S-50-12. Ten na výstupu poskytuje stabilizované stejnosměrné napětí 12 V a je schopen dodávat proud maximálně 4,1 A.

Tento systém měřil data od května 2022 do začátku srpna, kdy při manipulaci při sběru dat došlo k nechtěnému kontaktu desky s jedním z vodičů od FV panelu, a tím nevratnému poškození modulu SD karty. U záložního SD modulu se bohužel ukázalo, že nefunguje, jak by měl, a bylo nutné měření na týden přerušit. Během této doby jsem se z důvodu aktuální dostupnosti rozhodl nahradit desku Arduino Nano deskou Arduino Uno s příslušným modulem. V průběhu této doby byl také přepojen senzor teploty k druhému, pomocnému systému (viz dále). Pro lepší připojitelnost senzorů byla vývojová deska vybavena svorkovnicí.

K řídicí desce Arduino Uno tak zůstaly připojeny pouze napěťové senzory a v té podobě systém fungoval po celý zbytek měření. Konkrétní užití senzory, vývojové desky a moduly hlavního i pomocného systému jsou uvedeny v Tabulkách 3.5 a 3.6 níže. Konkrétní rozsahy a specifiky jednotlivých použitých prvků hlavního i pomocného měřicího systému jsou uvedena v Příloze III - Použité komponenty.

Tabulka 3.5: Použité komponenty u původní verze (05/22 - 08/22)

Zařízení	Model	Výrobce
Deska	Arduino Nano R3, ATmega328P Klon	LaskaKit
Senzor napětí	Analogový senzor DC napětí, VDC 0-25V	LaskaKit
Senzor teploty	NTC termistor 10K1% 3950	LaskaKit
Modul SD karty	DS1307 NANO V3.0 Data Logger	DIYMORE MODULE
Svorkovnice	Arduino Nano terminál shield	LaskaKit
Napájecí zdroj	LYONZG S-50-12 12V/4,1A	LYONZG

Tabulka 3.6: Použité komponenty u nové verze (08/22 - konec měření)

Zařízení	Model	Výrobce
Deska	Arduino UNO R3, ATmega328P Klon	LaskaKit
Senzor napětí	Analogový senzor DC napětí, VDC 0-25V	LaskaKit
Modul SD karty	TZT Data Logger Shield V1.0	LaskaKit
Napájecí zdroj	LYONZG S-50-12 12V/4,1A	LYONZG

### 3.3.2 Pomocný měřicí systém

V rámci sledování parametrů panelů bylo nutné průběžně s nimi vyhodnocovat i relevantní klimatická data. Především teplotu u panelů, která má na výrobu vliv, tak intenzitu osvětlení. Původní návrh počítal s měřením dopadající energie zapůjčeným pyranometrem. Při zprovoznění ale byla zjištěna závada na pyranometru a nebylo možné měření intenzity záření realizovat. Rozhodl jsem se proto měřit alespoň intenzitu osvětlení, abych získal alespoň přehled o průběhu světelných podmínek (hlavně přechodu oblačnosti) pro lepší interpretaci získaných průběhů napětí. Vzhledem k chybějícímu údaji o spektru dopadajícího záření nebylo totiž možné přesně určit dopadající energii. Při pokusu o doplnění senzoru spektra jsem narazil na jejich nedostupnost jak věcnou, tak cenovou.

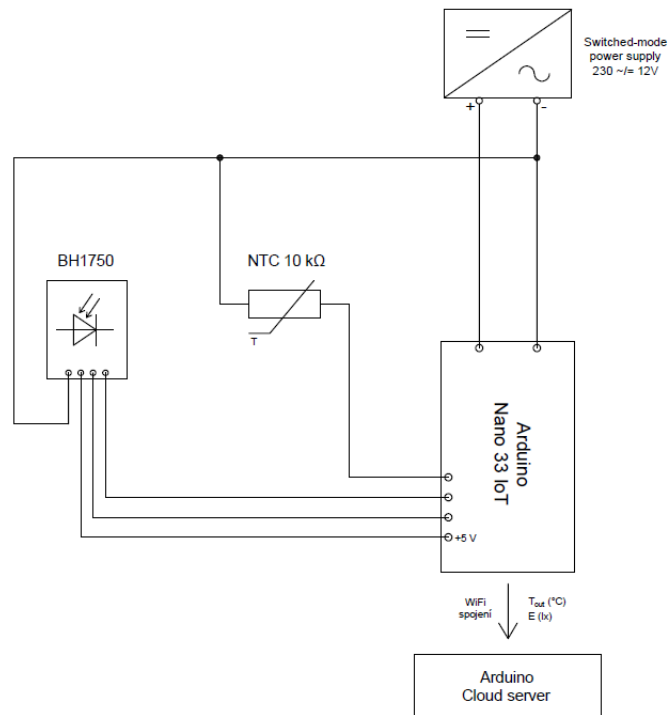
Jak je zmíněno výše, na přelomu července a srpna došlo nešťastnou manipulací ke zničení modulu původního měření. Při výměně hlavního měřicího systému jsem se rozhodl klimatická data měřit pomocí druhé desky Arduino, která měla být původně využita pro měření dodávaného výkonu. Jedná se o zmiňovanou desku Arduino Nano 33 IoT, která umožňuje bezdrátový přenos dat a jejich ukládání na Arduino Serveru. Dalším, a rozhodujícím důvodem pro využití druhé desky bylo vyčerpání potřebných vstupů u desky Arduino UNO. K využití takového řešení jsem přistoupil rovněž z důvodu, že bylo uváděné (i pozorované) problémové chování SD modulu, kdy někteří z uživatelů popisovali selhávání zápisu při častějším zápisu (řádově po desítkách sekund až minutě) většího množství údajů do souboru na kartě.

Vznikl tak druhý, pomocný měřicí systém, který snímal meteorologická data. Díky oddělení těchto dvou systémů mohlo měření probíhat v kratších intervalech a bylo možné tak získat lepší přehled o meteorologické situaci. Pro měření teploty byl fyzicky ponechán a pouze přepojen původní termistorový NTC senzor. Bylo ovšem nutné softwarově upravit algoritmus, neboť napájecí napětí se změnilo z 5 V na 3,3 V. Pro měření intenzity osvětlení byl zvolen modul GY-302 obsahující senzor BH1750FVI. Tento senzor umožňuje digitální přenos přes sériovou sběrnici I2C, což zjednodušuje instalaci a klade menší nároky na obsazenost pinů u mikrokontroléru. Tyto dvě hodnoty jsou po změření ukládány přes WiFi na Arduino IoT Cloud. V rámci tohoto serverového úložiště jsem si vytvořil i grafické rozhraní pro větší přehlednost dat. Ta jdou také samozřejmě stáhnout v CSV formátu a mohla tak být následně vyhodnocena spolu s údaji uloženými na SD kartě. K napájení pomocného měření je použit společný napájecí zdroj s hlavním měřicím systémem. Níže v Tabulce 3.7 jsou uvedeny použité komponenty a jejich podrobnější popis je součástí Přílohy III.

Tabulka 3.7: Použité komponenty pomocného měření (08/22 - konec měření)

Zařízení	Model	Výrobce
Deska	Arduino NANO 33 IoT	Arduino.CC
Senzor intenzity osvětlení	BH1750	LaskaKit
Senzor teploty	NTC termistor 10K1% 3950	LaskaKit
Svorkovnice	Arduino Nano terminál shield	LaskaKit
Napájecí zdroj	LYONZG S-50-12 12V/4,1A	LYONZG

Na Obrázku 3.4 je vidět schéma zapojení pomocného měření. To je ve zvětšené podobě uvedeno v Příloze II, na straně 2 této přílohy.



Obrázek 3.4: Schéma zapojení pomocného měření

Data jsou ukládána ve dvou formách. Data o napětí jsou ukládána do textového souboru na SD kartu, a meteorologická data jsou ukládána na server Arduino IoT Cloud, odkud jsou stahována v CSV formátu. Jak zpracováním a vyhodnocením dat, tak použitým softwarem se zabývá kapitola 4.2 - Metodika vyhodnocení. Níže, na obrázcích 3.5 a 3.6 je ukázka formátu, v jakém jsou data získávána. Na obrázku 3.7 je náhled webového rozhraní, které je využito ke náhledu na snímaná data přímo na serveru.

```

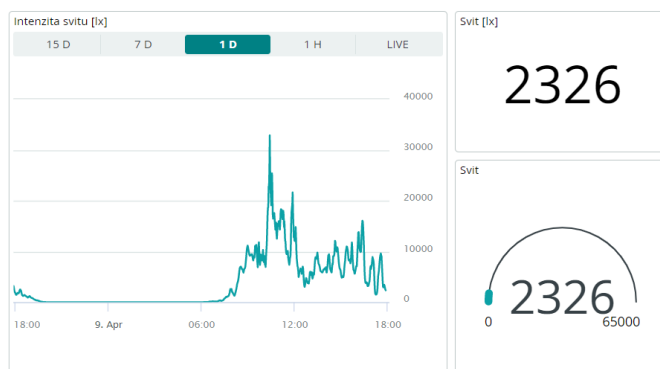
date time U1(Mono) U2(Poly) U3(CIS) U4(Org)
9.10. 15:42 16.90 4.28 4.41 3.96
9.10. 15:47 17.42 4.32 4.31 3.94
9.10. 15:53 14.38 4.29 3.97 3.70
9.10. 15:58 17.53 4.35 4.95 4.53
9.10. 16:3 15.05 4.30 4.04 3.63
9.10. 16:9 9.57 4.18 2.46 2.16
9.10. 16:14 8.44 4.18 2.38 2.19

```

Obrázek 3.5: Formát datového výstupu napětí na panelech

	A	B	C	D
1	time,value			
2	2022-09-24T00:00:28.39Z,0			
3	2022-09-24T00:01:31.225Z,0			
4	2022-09-24T00:02:33.793Z,0			

Obrázek 3.6: Formát datového výstupu intenzity osvětlení



Obrázek 3.7: Webové grafické rozhraní pro zobrazení aktuálních dat (zde o intenzitě osvětlení)

K programování mikrokontrolérů Arduino byly použity celkem dva nástroje. Oba dva jsou oficiálními nástroji společnosti Arduino. První z nich, Arduino IDE ve verzi 1.8.19, je na stránkách výrobce doporučován jako oficiální software pro tvorbu programu vývojových desek Arduino. V úvodu práce na měřicím systému bylo nutné se s tímto prostředím blíže seznámit, neboť jsem s ním neměl takovou zkušenost. Kromě vývojového prostředí a kompilátoru programu obsahuje zároveň i nástroje pro nahrání softwaru do konkrétních desek (v závislosti na osazeném procesoru). Obsahuje také databázi dostupných knihoven, které je možné do svého projektu přidávat a příklady práce s těmito knihovnami.

Druhým použitým nástrojem bylo vývojové prostředí přímo integrované v Arduino IoT Cloud. Toho jsem využil především z důvodu lepší kompatibility s deskou Arduino Nano 33 IoT při nahrávání softwaru a využívání integrovaných knihoven (například přenášení dat přes rozhraní WiFi). Také umožňuje, v případě připojení této desky k internetu, vzdálenou správu a vzdálené nahrávání softwaru.

Při učení se práce s jednotlivými knihovnami, senzory a moduly mi velmi pomohl open-source koncept Arduina. Široká uživatelská základna je velmi aktivní, a tuto aktivitu podporuje i sama společnost Arduino existencí oficiálního fóra i oficiální databází projektů, kde uživatelé sdílejí jimi vytvořené projekty. Proto při učení se bylo téměř vždy možné problematiku studovat jak z manuálů, tak z různých podobných aplikací, kde se uživatelé setkávali například s podobnými problémy a bylo tak snazší odhalit jejich příčinu v mém systému. Bylo také možné využívat uživatelské knihovny pro senzory a moduly. V mnou navrženém měřicím systému jsou používány konkrétně knihovny pro SD modul, zpracování času, bezdrátový přenos dat, sériovou komunikaci I2C, čtení dat ze senzoru intenzity osvětlení a celkovou práci s Arduinem.

V průběhu tvorby systému se vyskytla celá řada větších či menších překážek a problémů. Vyskytly se poruchy (vadné senzory a moduly) a hardwarové nedostatky, jako například nedokonalé spojení mezi vodiči 0 V v konektoru, díky kterým pak byla snímána chybná data. Také v průběhu odlazování softwaru, kdy byl například vyžadován dostatečný rozestup mezi čtením dat z jednotlivých senzorů se vyskytly překážky. Mezi největší výzvy patřilo třeba odlazení ukládání dat. To se ukázalo jako nejvíce problematické a náchylné k problémům (i při změnách

kódu nesouvisejícího přímo s ukládáním) .Systém musel být též dimenzován pro odolávání nepříznivým podmínkám. Například rozmezí teplot, kdy v neizolovaném objektu instalace může v létě pod jeho střechou vystoupat teplota i přes 40 °C, a naopak v zimě při mrazech může klesnout hluboko pod bod mrazu. Bylo též nutné zajistit, aby celý měřicí systém byl znovu schopný obnovení provozu bez vnějšího zásahu po výpadku napájení. Všechny tyto překážky se nakonec podařilo překonat a vznikl autonomní systém, který vyžaduje pouze přenos dat z SD karty do počítače ke zpracování. Tento problém by šlo vyřešit přídatným bezdrátovým modulem a to by však bylo zbytečně složité a vnašelo by další možnosti pro poruchu systému. Podařilo se vytvořit jednoduchý, spolehlivý a efektivní měřicí systém, který umožňuje sběr dat a jejich ukládání pro další zpracování. Má též potenciál pro další rozšíření v případě potřeby o další moduly či senzory.



Obrázek 3.8: Pohled na mikrokontroléry obou měřicích systémů

### 3.4 Instalace systému

Při samotné instalaci muselo být zohledněno několik faktorů. A to jak přírodních, například osvětlení (výška slunce), tak technických. Z nich bylo při umístění panelů limitující především umístění měřicího systému, aby byl přístupný pro sběr dat a zároveň nebyly příliš dlouhé propojovací vodiče (senzor-mikrokontrolér). Také bylo nutné umístit napájení měřicího systému na vhodné místo. Z technického hlediska bylo též nutné řešit umístění odporové zátěže na místo, kde se bude dostatečně dobře chladit. Vzhledem ke dřevěné konstrukci garážového stání bylo při umístění měřicího systému (hlavně jeho napájení) a mařicích odporů, nutné brát v potaz také požární bezpečnost. Pro průkaznost měření bylo též nutné zohlednit překážky, které mohou vrhat stín. Především to byla střecha rodinného domu, komín, případně z východní strany sousední rodinný dům. Nakonec byla zvolena optimální výška, při které je možné těsně pod střechou vhodně umístit měřicí systém, mařicí odpory a napájecí zdroj, a zároveň v této výšce po většinu roku nejsou panely ovlivněné stíny. V průběhu měření jsem zjistil, že panely v

listopadu v pozdních odpoledních hodinách začaly být panely ve spodní řadě překrývány stínem střechy, jak je patrné z Obrázku 3.9. Začal se projevovat i přecházející stín komínu, což je vidět na Obrázku 3.10. Oba tyto snímky byly pořízené dne 12. 11. 2022.



Obrázek 3.9: Zastínění spodních dvou panelů střechou rodinného domu



Obrázek 3.10: Zastínění panelů přecházejícím stínem komínu

Uchycení polykrystalického panelu nebylo nutné, vzhledem k jeho integraci do plastové tašky, příliš řešit. U monokrystalického panelu byly využity předvrtané otvory v hliníkovém rámu, za který byl panel pomocí ocelových drátů uchycen ke střešním latím pod taškami. Pro instalaci CIS a organického panelu bylo nutné vytvořit dřevěné rámečky vlastní konstrukce. U organického panelu to bylo žádoucí i z důvodu jeho vyztužení, neboť jeho ohebnost nebyla při statické instalaci zrovna žádoucí. Tyto rámečky jsou na Obrázku 3.11.



Obrázek 3.11: Dřevěné rámečky CIS a organického panelu

Dále bylo nutné navrhnout optimálně umístění senzorů. Jak senzorů měřících napětí na mařících rezistorech, tak senzorů klimatických podmínek (nejprve teploty, později i intenzity osvětlení). Sensory, měřící napětí na rezistorech byly umístěny v co možná nejmenší vzdálenosti od mikrokontrolerů (řádově 10-30 cm). Mařící rezistory byly umístěné pod střechu, na úroveň nosného horizontálního nosného trámu (na Obr. 3.10 je to přibližně horní úroveň nejspodnější řady střešních tašek).

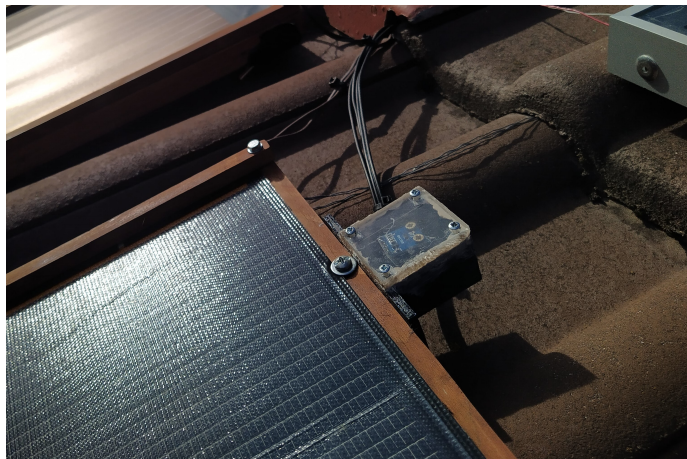
Aby měření teploty probíhalo co nejefektivněji, bylo nutné sensor umístit tak, aby nebyl nadbytečně chlazen (větrem, deštěm) a naopak nebyl nadbytečně zahříván přímým sluncem. Z tohoto důvodu jsem zvolil umístění pod rámeček jednoho z panelů, kdy byl krytý před přímým sluncem a deštěm, nebyl v kontaktu s povrchem střechy a zároveň chlazen větrem shodně, jako panely. Bylo možné tak efektivně měřit teplotu vzduchu u panelů. Umístění teplotního čidla je na Obrázku 3.12.



Obrázek 3.12: Umístění teplotního čidla



Když byla instalace doplněna o senzor intenzity osvětlení, bylo nutné jednak tento senzor vhodně umístit, aby co nejlépe reflektoval světelné podmínky u panelů, a zároveň bylo nutné ho umístit do vhodného pouzdra. Umístění bylo zvoleno na rámeček jednoho z panelů, jak je vidět na Obrázku 3.13. Pouzdro, do kterého je přípravek zapracován, je mnou navržené a následně vytištěné na 3D tiskárně. V této konfiguraci byla provozována až do konce měření.



Obrázek 3.13: Umístění senzoru intenzity osvětlení

Jako mařící rezistory byly po konzultaci s vedoucím práce využity pro všechny panely rezistory se stejnou hodnotou odporu  $R = 68\Omega$ . Drátové rezistory v keramickém pouzdře s cementovou výplní od výrobce ROYALOHM umožňovaly na každém z nich mařit až 10 W, respektive 15 W v případě zátěže monokrystalického panelu.

Tento rezistor u monokrystalického panelu bylo nutné efektivněji chladit, aby byla teplota všech rezistorů podobná a bylo minimalizováno zkreslení rozdílného odporu vlivem teploty. K tomu bylo využito ocelového profilu, se kterým byly spojeny teplo vodivou pastou a zavěšeny za střešní latě. Tento improvizovaný chladič je na Obrázku 3.14.



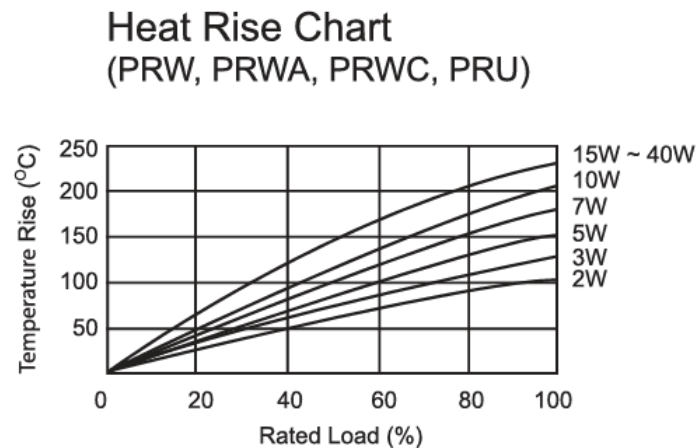
Obrázek 3.14: Zavěšení mařícího rezistoru s improvizovaným chladičem

Rezistory od toho výrobce jsem zvolil i z důvodu, že samotný odporový drát je zatmelený cementovou výplní v keramickém pouzdře, které má velkou teplotní odolnost. Další parametry jsou uvedeny v Tabulce 3.8 níže. Na Obrázku 3.15 je uvedena charakteristika zahřívání odporu v závislosti na procentuálním zatížení (z hlediska mařeného výkonu).

Tabulka 3.8: Vybrané hodnoty mařícího rezistoru uváděné výrobcem v datasheetu [36]

Parametr	Hodnota
$R$	$68\Omega$
Tolerance	$\pm 5\%$
$P_{max}$	10 W (15 W)
TCR	350 ppm/ $^{\circ}\text{C}$
Rozměry (10W)	49x9x10 mm
Rozměry (15W)	49x12,5x11,5 mm

Udávané hodnoty jsou dle výrobce uváděny pro nominální teplotu  $70^{\circ}\text{C}$ .



Obrázek 3.15: Charakteristika zahřívání rezistoru v závislosti na míře zatížení [36]

## 4 Měření

Hlavním cílem této práce bylo optimalizovat FV systém a prozkoumat různá možná technologická řešení. K tomu bylo nutné provést dlouhodobé měření, které by obsáhlo různé druhy počasí - od slunných horkých dnů, přes zimní slunné dny, proměnlivou oblačnost až po dny se zataženou oblohou či panely překrytými sněhem. Měření bylo připravováno od května 2022 a zahájeno bylo 1. června 2022. V průběhu jeho trvání došlo několikrát ke krátkodobému přerušování, např. kvůli technickým závadám. Ukončeno bylo 30. dubna 2023, aby byl dostatek času na finální vyhodnocení a sumarizaci výsledků. Při měření dat byl zaveden postup pro minimalizaci případné chyby měření (technického rázu). Bylo vždy nabráno 10 hodnot (napětí, teploty, či svitu) v rozmezí 0,5 vteřiny a výsledná zapsaná hodnota byla dána průměrem těchto hodnot.

Pro lepší představu o chování panelů vzhledem k zátěži byla proměřena také jejich V-A charakteristika. Tím se zabývá část 4.1.1. V částech 4.3 a 4.4 jsou rozebrány vybrané charakteristické průběhy pro jednotlivé panely za různých meteorologických situací, respektive číselně vyhodnocena určitá období.

### 4.1 Měřené parametry

Původní záměr měřit napětí i proud zátěží nebylo možné z technických důvodů uváděných v kapitole 3.3.1 realizovat (konkrétně měření proudu). Na základě konzultace s vedoucím práce jsem nakonec přistoupil k zatížení panelů rezistorem se stejnou hodnotou odporu, konkrétně  $R = 68\Omega$ . Tím, že byly všechny panely zatíženy konstantní zátěží, odpadla nutnost měřit protékající proud, jehož hodnotu lze snadno získat měřením napětí na konstantní zátěži  $U_Z(V)$ .

V kapitole 3.4 jsou v tabulce 3.8 uvedeny parametry, které jsou pro nominální teplotu  $70^\circ\text{C}$ . Vzhledem k tomu, že se ale rezistory průchodem elektrického proudu zahřívají, nemusela být zátěž po celou dobu měření zcela konstantní a panely tak nemuseli být vždy zatíženy úplně shodně. Výrobce je uváděna teplotní závislost odporu rezistoru s hodnotou  $350 \text{ ppm} / ^\circ\text{C}$ . Pokud bychom tedy například uvažovali maximální výrobu CIS panelu, která činí  $4,5 \text{ Wp}$ , byl by mařící odpor zatížen na  $45 \%$  maximální hodnoty výkonu. Z křivky na obrázku 3.15 pak vyplývá, že rezistor bude mít teplotu přibližně  $110^\circ\text{C}$ . Pokud použijeme koeficient uváděný výrobcem  $350 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$  ( $0,035 \%$  /  $^\circ\text{C}$ ), dostaneme při rozdílu teploty  $40^\circ\text{C}$  oproti normálu rozdíl odporu  $1,4 \%$ , tedy o  $0,95 \Omega$  větší odpor, než při nominální teplotě. Tato odchylka je tedy vzhledem k  $5 \%$  výrobní toleranci uváděné výrobcem zanedbatelná.

Větší rozdíl už ale bude u monokrystalického panelu, který mařící odpor při plné výrobě zatěžuje na přibližně  $86 \%$  možného mařeného výkonu. Při tomto zatížení by měl mít rezistor

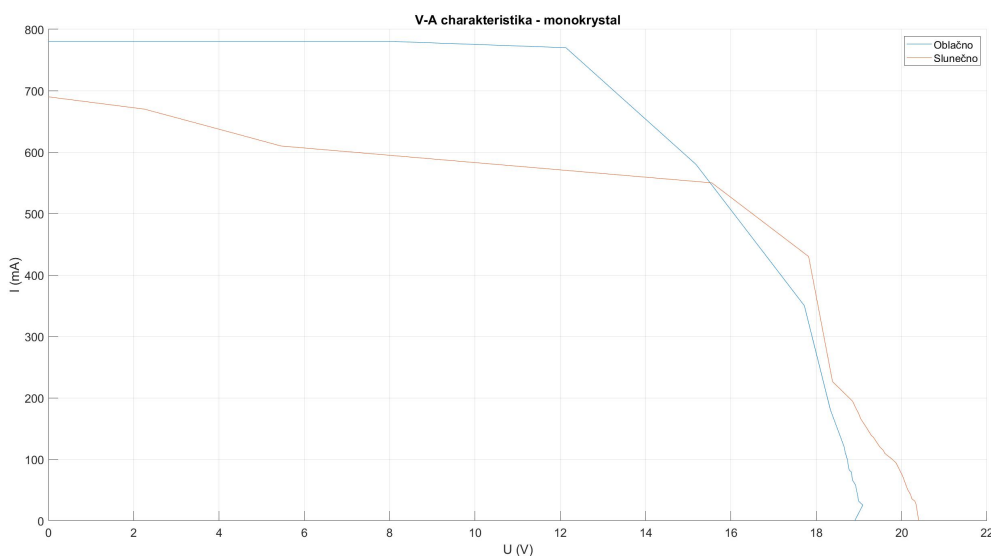
teplotu přibližně 220°C a změna odporu je v tu chvíli o 5,25 % a tedy přibližně o 3,5 Ω. Zde je odchylka vlivem teploty srovnatelná s odchylkou výrobní, a pokud bychom uvažovali krajní případy, bude zatížení o cca 10 % odlišné od uváděných nominálních hodnot. V průběhu dlouhodobého měření však vzhledem k umístění systému a prostředí nebylo možné zajistit, aby všechny rezistory měly trvale shodnou teplotu.

#### 4.1.1 V-A charakteristika panelů

Vzhledem k tomu, že panely byly zatíženy konstantním rezistorem bez MPPT regulátoru, byla do měření vnesena určitá chyba. Panely totiž nebyly provozovány v bodě maximálního možného výkonu a mohli tak být při různých světelných podmínkách zatíženy mimo tento bod. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl proměřit V-A charakteristiku jednotlivých panelů v odlišných světelných podmínkách. Jedna sada hodnot byla naměřena při přímém slunečním záření a jasné obloze, druhá sada naopak při trvale zatažené obloze a tedy převládajícím difuzním záření. Měření bylo provedeno s posuvným odporem s rozsahem cca 60 až 1000 Ω, který byl zapojen místo konstantní zátěže. Pro nižší hodnoty odporu byla vždy připojena sériová kombinace rezistorů o celkových hodnotách 47, 14, 9,4 a 4,7 Ω. Měřené body byly voleny vždy operativně podle velikosti změny proudu a napětí pro každý panel a každé světelné podmínky zvlášť. Napětí bylo snímáno pomocí napěťového senzoru a Arduina, které bylo přepnuté do módu sériové komunikace s připojeným notebookem. Proud byl snímán sériově zapojeným multimetrem v režimu mA-metru, respektive A-metru (pro malé hodnoty odporu).

## Monokrystalický panel

Z měření vyšla následující pro monokrystalický panel následující charakteristika:

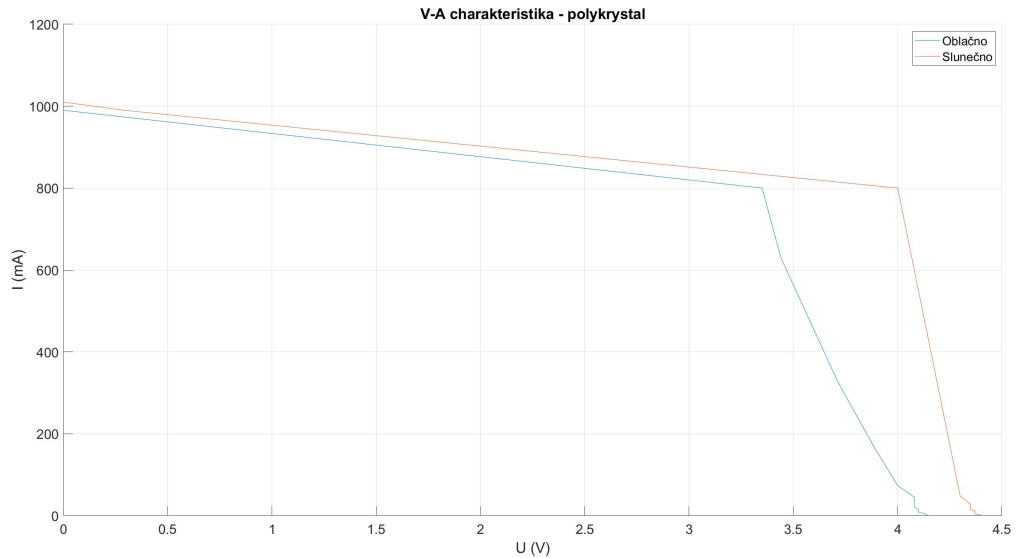


Obrázek 4.1: Naměřená V-A charakteristika monokrystalického panelu

Z průběhu charakteristiky je patrné, že pro slunečný den by se bod MPP nacházel přibližně v místech  $U = 17 \text{ V}$  a  $I = 460 \text{ mA}$ . Oproti uváděným štítkovým hodnotám (tabulka 3.2) je tato hodnota nižší. To je velmi pravděpodobně způsobeno nižší úrovní osvětlení, než je při měření při STC. Podle teoretických předpokladů obecného chování FV panelu by V-A charakteristika měla klesat s klesajícím osvětlením.

## Polykrystalický panel

Charakteristiky naměřené u polykrystalického panelu odpovídají teoretickým předpokladům, že polykrystalické panely mají lepší citlivost pro difúzní záření. To dokládá jednak malý posun charakteristiky směrem dolů při oblačné obloze, ale tato vlastnost byla pozorována i při dlouhodobém měření (jak je blíže popsáno v části 4.3). Byla zjištěna velká strmost charakteristik, jak ilustrují získané hodnoty proudu a napětí uvedené v Tabulkách 4.1 a 4.2. s naměřenými hodnotami.



Obrázek 4.2: Naměřená V-A charakteristika polykrystalického panelu

Z těchto dat byla kromě jiného zjištěna malá citlivost na velikost zátěže v poměrně velkém rozsahu hodnoty odporu zátěže. Tato data byla naměřena při plynulé změně posuvného odporu v rozsahu cca 60 až 1000  $\Omega$  a je patrné, že ve velké části rozsahu nedochází prakticky k žádným změnám napětí a proudu. Až při připojování sériově spojených odporů (tedy od hodnoty 47  $\Omega$  níže) byly patrné skokové změny v proudech. A to jak při přímém, tak při difuzním záření. Při poklesu pod určitou zátěž tedy začne strmě růst proud dodávaný panelem. Dalo by se zde hovořit o tom, že tento panel představuje poměrně tvrdý zdroj.

Tabulka 4.1: Hodnoty pro přímé záření

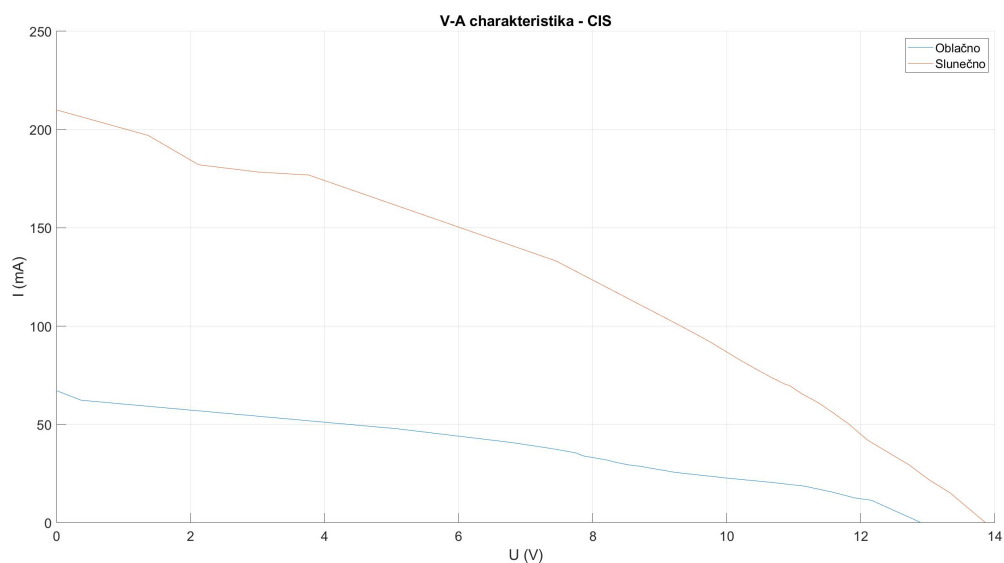
$U_P$ (V)	$I_P$ (mA)
4,41	0
4,37	4,8
4,37	8
4,37	10,7
4,37	12,3
4,35	15,8
4,35	18,7
4,35	17,1
4,35	26,9
4,35	40,3
4,30	47,4
4,00	800
0,29	990
0	1010

Tabulka 4.2: Hodnoty pro difuzní záření

$U_D$ (V)	$I_D$ (mA)
4,15	0
4,13	4,2
4,10	8,3
4,10	11,4
4,10	14,9
4,08	20,9
4,08	27,3
4,08	45,4
4,00	73,1
3,88	173,8
3,71	330
3,44	630
3,35	800
0	990

## CIS panel

U CIS panelu byla zjištěna V-A charakteristika velmi závislá na zátěži.



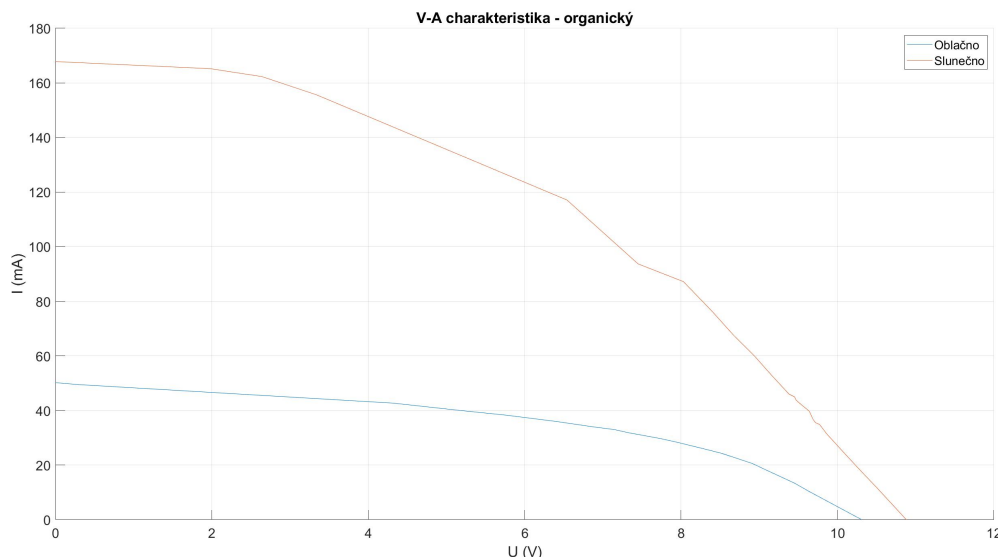
Obrázek 4.3: Naměřená V-A charakteristika CIS panelu

Jak je z Obrázku 4.3 patrné, charakteristiky klesají pozvolně v celém svém rozsahu a nikde není patrný zlom, kdy by se s malou změnou napětí rychle měnil proud. Z toho lze vyvodit, že panel není příliš závislý na tom, jak byl zatížen. Například pro zátěž  $R = 342 \Omega$  byl dodávaný výkon  $P = 241 \text{ mW}$ , pro zátěž  $R = 443 \Omega$  panel vyráběl dodával výkon  $P = 227 \text{ mW}$  a při zatížení  $R = 231 \Omega$  byla výroba o výkonu  $P = 267 \text{ mW}$ . To znamená, že při vzrůstu zátěže o 30 % původní

hodnoty (počítáno  $R = 342 \Omega$ ) dodávaný výkon klesne přibližně o 6 %. A naopak, pokud zátěž o 30 % klesne, vzroste výkon o asi 10 %. Amorfní panely by dle předpokladů měly mít při difuzním záření účinnost relativně srovnatelnou s přímým zářením. Tento předpoklad se zde nepotvrdil. Jak je patrné z charakteristik, při difúzním záření výkon poklesl poměrně hodně. To může být způsobeno degenerací článku z důvodu stárí.

### Organický panel

Obdobná charakteristika jako u CIS panelu byla zjištěna u organického panelu. Jak je z charakteristik organického panelu na obrázku 4.4 patrné, je velmi podobná charakteristice CIS panelu (obrázek 4.3). Je také soustavně klesající v celém rozsahu bez prudších změn. Tato podobnost může být do jisté míry způsobena tím, že oba dva panely, CIS a organický, představují zástupce panelů s amorfní strukturou. Pro difuzní záření je též patrný větší propad dodávaného výkonu.



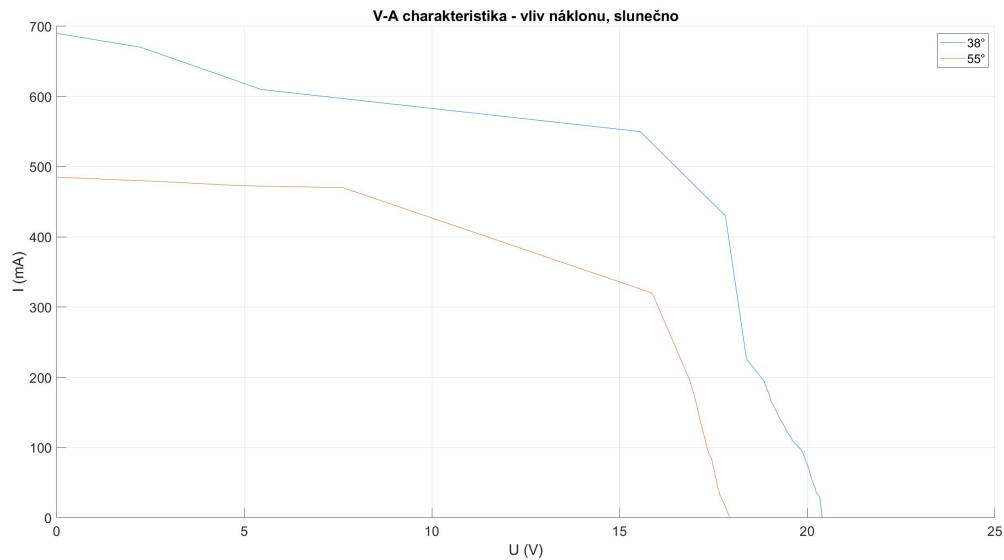
Obrázek 4.4: Naměřená V-A charakteristika organického panelu

### Vliv náklonu na V-A charakteristiku

Pro srovnání možných konstrukčních rozdílů při instalaci FVE byl monokrystalický panel proměřen kromě náklonu  $38^\circ$  (rovnoběžně se střechou) i s náklonem  $55^\circ$ . Pro srovnání je na V-A charakteristice na obrázku 4.5 uvedena jak charakteristika se zvýšeným náklonem, tak i charakteristika při původním sklonu rovnoběžně se střechou, při kterém byl monokrystalický panel dlouhodobě měřen.

Je patrné, že křivky kopírují podobný tvar, ale charakteristika panelu s větším náklonem je níže. Vzhledem k tomu, že měření bylo za slunečného dubnového dne, kdy je Slunce již po-





Obrázek 4.5: Naměřená V-A charakteristika po zvětšení náklonu panelu

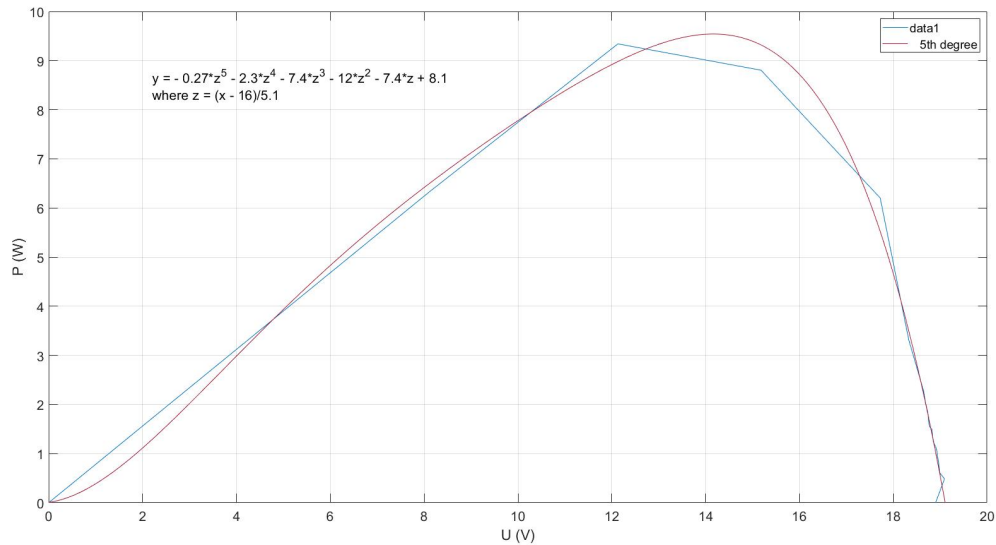
měrně vysoko, je tento závěr odpovídající. Pro většinu roku, kromě zimních měsíců, je výhodnější mít FV panel s menším sklonem.

### Zjištění ideální zatížení

Pokud bychom chtěli znát ideální zatížení panelu pro konkrétní osvitové podmínky (MPP bod), mohli bychom ho získat na základě znalosti předpisu funkce, popisující křivku V-A charakteristiky a následném výpočtu maximální plochy pod křivkou pro proměnné souřadnice bodu na křivce. Souřadnice  $x$  takového bodu by pak reprezentovala napětí a souřadnice  $y$  proud. Při změně velikosti napětí se odpovídajícím způsobem změní proud. Následně MPPT regulátor hledá takovou kombinaci proudu a napětí, při které bude dodávaný výkon nejvyšší a tento pracovní bod dále udržuje. Jeho poloha se společně se změnou osvitových podmínek také mění.

Z naměřených charakteristik se však nepodařilo získat uspokojivý předpis funkce popisující naměřená data, a bylo tedy nutné najít jinou cestu. Z naměřených hodnot napětí a proudu při měření V-A charakteristiky byl dopočítán výkon dodávaný v těchto proměřovaných bodech. Po vykreslení grafu  $P = f(U)$  jsem v softwaru MATLAB pomocí nástrojů grafu vybral funkci, která svým průběhem nejlépe odpovídala průběhu výkonu. Tou byl polynom pátého stupně.

Jako první jsem tento postup aplikoval u V-A charakteristiky monokrystalického panelu se zataženou oblohou (Obrázek 4.1, modrý průběh). Při prokládání funkce výkonu nejlépe svým tvarem průběh polynomu pátého stupně. Průběh funkce  $P = F(U)$ , průběh proložené funkce a rovnice odpovídajícího polynomu je uveden na Obrázku 4.6.

Obrázek 4.6: Průběh funkce  $P = f(U)$  a zvolené proložení polynomem

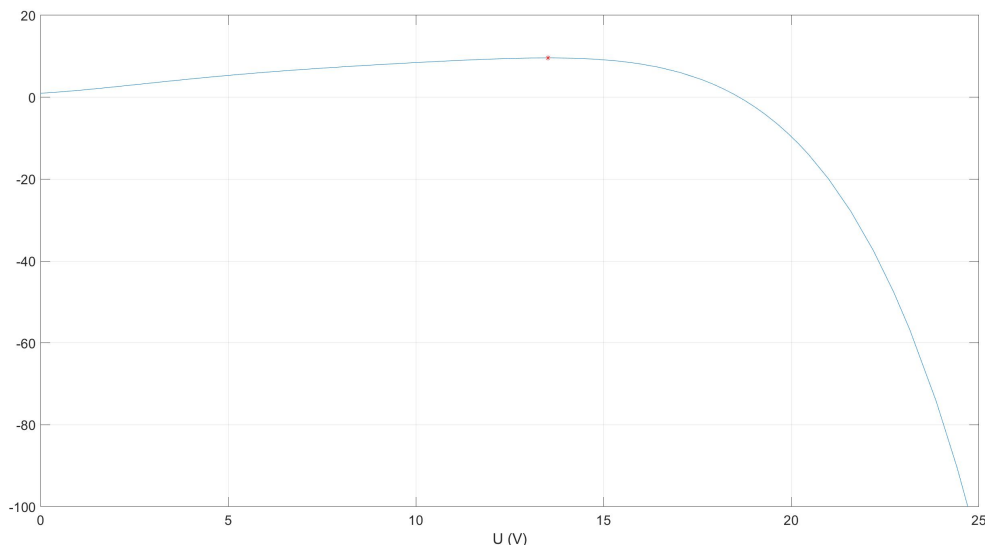
Následně jsem rovnici ve tvaru

$$y = -2,7 \cdot \left(\frac{x-16}{5,1}\right)^5 - 2,3 \cdot \left(\frac{x-16}{5,1}\right)^4 - 7,4 \cdot \left(\frac{x-16}{5,1}\right)^3 - 12 \cdot \left(\frac{x-16}{5,1}\right)^2 - 7,4 \cdot \left(\frac{x-16}{5,1}\right) + 8,1 \quad (4.1)$$

zderivoval. Tuto derivaci jsem položil rovnou nule, abych získal maximum. Řešená rovnice měla tedy tento tvar:

$$-2,65 \cdot \left(\frac{10x-160}{51}\right)^4 - 1,81 \cdot \left(\frac{x-16}{5,1}\right)^3 - 4,35 \cdot \left(\frac{x-16}{5,1}\right)^2 - 0,92 \cdot \left(\frac{x-16}{5,1}\right) + 13,3 = 0. \quad (4.2)$$

Hledané  $x_{max}$  jsem stanovil v intervalu od 0 do 25, jelikož napětí na panelu bylo v tomto rozsahu a hledané  $x_{max}$  odpovídá hodnotě  $U_{MPP}$ . Vyřešením rovnice (4.2) jsem získal hledanou hodnotu  $x_{max} = 13,52$  (Obrázek 4.7, označený bod). Napětí, které by udržoval MPPT regulátor pro maximální výtěžnost při daných osvitových podmínkách by tedy bylo  $U_{MPP} = 13,52$  V.



Obrázek 4.7: Průběh derivace funkce z rovnice (4.2) s vyznačeným maximem

Lze vidět, že umístění bodu MPP na modré V-A charakteristice na obrázku 4.1 by svou pozicí přibližně odpovídalo teoretickému předpokladu umístění bodu MPP na obrázku 1.7.

## 4.2 Metodika vyhodnocení dlouhodobého měření

Jak již bylo zmíněno, pro vyhodnocení výsledků bylo nutné panely sledovat dlouhodobě. Data byla následně rozříděna podle jednotlivých dní a následně pomocí vlastního skriptu v softwaru MATLAB dále zpracována.

V první řadě bylo nutné data z textového souboru přenést do jednotlivých polí. Vznikla tedy samostatná pole, obsahující vždy časovou známku a k ní hodnotu příslušné veličiny. Nejprve tedy napětí, z něj při znalosti zátěže dopočítaný výkon. Po doplnění měřicího systému pak byla zaznamenáván i teplota, později přibyl záznam o hodnotě intenzity osvětlení. U záznamů teploty a svitu byl zvolen jiný interval zaznamenávání, a to 1 minuta. Lépe tak lze získat představu o průběhu svitu (a tím i případné přechodné oblačnosti) a lze také snadněji určit příčinu zvlnění průběhu napětí. Toto zkrácení intervalu však přineslo i jisté problémy.

U zvoleného intervalu záznamů svitu a teploty docházelo občas k situaci, kdy data nebyla odeslána přesně po minutě, ale z nějakého důvodu (nejspíše kvůli kvalitě spojení se serverem či zdržení procesu v samotném Arduinu) došlo ke zkrácení či prodloužení tohoto intervalu o několik jednotek nebo nižších desítek sekund. Takováto prodleva nastávala i u záznamů na SD kartu, tam ale, vzhledem k intervalu záznamů 5 minut, byla řádově sekundová prodleva zanedbatelná. Při zpracování údajů o svitu a teplotě v MATLAB se ukázal formát časové známky "HH:MM:SS" jako problematický, přesněji řešeno uvádění sekund. Bylo tedy nutné čas zao-krouhlit na hodiny a minuty. V některých případech, kdy došlo k posunu měřicího intervalu,

ovšem nastala situace, kdy byla časová známka zaokrouhlena na stejnou minutu. To přineslo samozřejmě problém při vykreslování grafického průběhu svitu, jelikož pro jeden časový údaj byly zaznamenány dvě hodnoty svitu. To bylo nutné ošetřit pomocí cyklu, který před vytvořením časového průběhu intenzity osvětlení vyfiltroval hodnoty s duplicitní časovou známkou a odstranil je. Došlo tím sice k zanesení chyby do měření, ale vzhledem k intervalu záznamů 1 minuta u svitu/teploty a 5 minut u napětí byla tato chyba přijatelná.

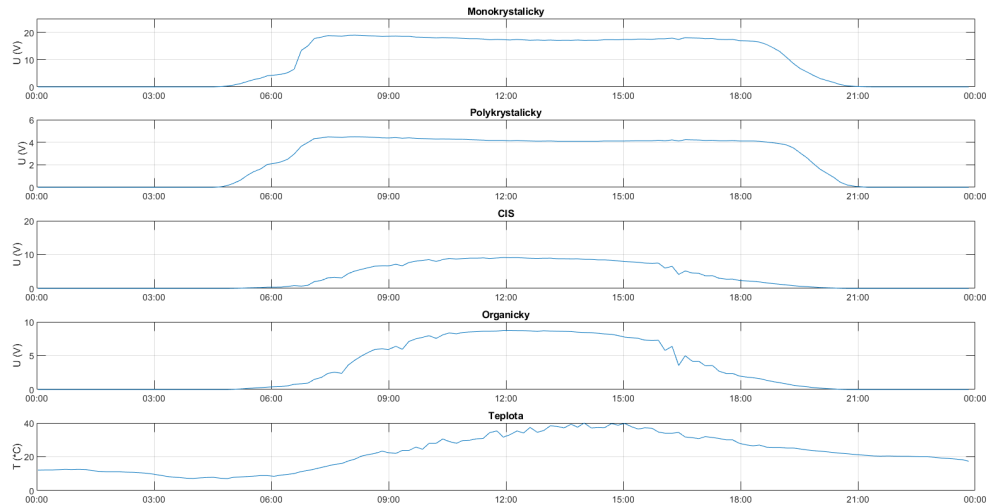
Jak již bylo zmíněno, ze zaznamenané hodnoty napětí byl dopočítán výkon dodávaný v dané chvíli. Při využití numerické integrační metody levých čtverců byl zaveden předpoklad, že mezi jednotlivými zaznamenanými hodnotami napětí se hodnota tohoto napětí nemění. Na základě tohoto předpokladu byla v intervalech mezi záznamy vypočtena vyrobená energie. Poté jsem sečetl energii vyrobenou daným panelem za den a za měsíc a byla následně přepočtena na  $m^2$ , aby byl zohledněn rozdíl ve velikosti panelů. Tato vyrobená energie byla dalším z kritérií při posuzování vhodnosti daného typu panelu, konkrétně při optimalizaci na celkový dodaný výkon. Denní a měsíční vyrobená energie byla také využita pro optimalizaci z hlediska zaměření výroby na zimu či léto.

Dalším zohledňovaným kritériem byla stabilita dodávky při proměnné oblačnosti. K vyhodnocení nejoptimálnějšího řešení z tohoto pohledu byly využity naměřené denní průběhy napětí, ze kterých je dobře patrné, který z typů panelů má nejstabilnější průběh dodávky.

### 4.3 Vybrané charakteristické průběhy

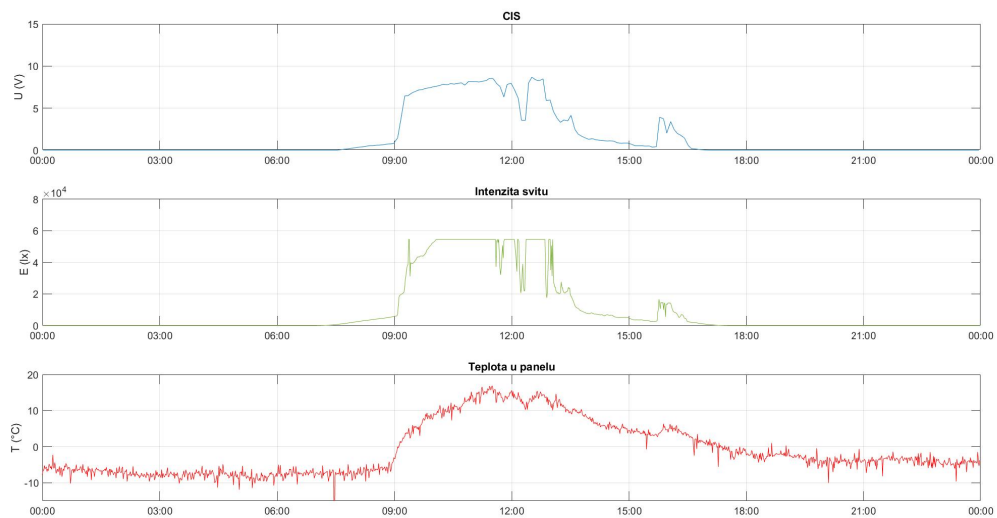
Z celého měření vzniklo velké množství datových sad různých veličin pro daný den. Celkem se jedná o přibližně 1300 souborů se záznamy. Proto jsem se rozhodl vybrat pouze některé průběhy, které ilustrují chování jednotlivých panelů při určitých podmínkách.

Na začátku měření, jak je popsáno v Kapitole 3.3, jsem neměl ještě k dispozici údaje o naměřeném svitu, pouze o teplotě. Údaje proto byly zpracovány v podobě, jaká je vidět na Obrázku 4.8.



Obrázek 4.8: Průběh napětí na jednotlivých panelech a průběh teploty, data ze dne 3.6.2022

Pro detailnější objasnění zvlnění napětí, jako je vidět například u organického panelu mezi 15. a 18. hodinou však bylo potřeba zahrnout i meteorologická data, která by to pomohla vysvětlit. Teplota vzduchu je v tomto případě nevypovídající, jelikož má příliš velkou setrvačnost pro vysvětlení náhlých změn. Po zahrnutí čidla intenzity osvětlení byly naměřené údaje zpracovávány do podoby, která je na Obrázku 4.9.



Obrázek 4.9: Průběh napětí na CIS panelu, průběh svitu a teploty, data ze dne 10.2.2023

Na průběhu teploty (červená křivka) je patrné jemné zvlnění. Tento jen byl pozorován po celou dobu měření a nepodařilo se spolehlivě identifikovat příčinu, tudíž se tento jev nepodařilo odstranit. Mohl být způsoben chybně odečítanou hodnotou na vstupu Arduina, či mohl být způsoben chováním měřicího termistoru. Další možnou příčinou mohlo být kolísání napájecího napětí na výstupním pinu Arduina, přes který byla smyčka termistoru napájena. Ovšem cílem

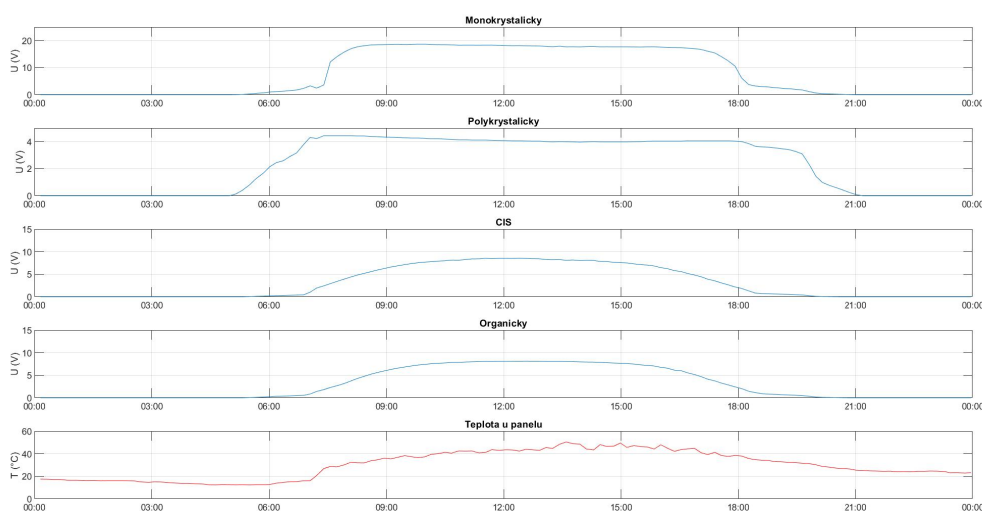
měření teploty bylo orientačně určit teplotu u panelů a nebyla zde vyžadovaná naprosto přesná hodnota. Můžeme tedy říci, že pokud všechny hodnoty oscilují kolem křivky trendu, lze měření považovat za dostatečně přesné. Při výpočtu průměrné denní teploty je tato přesnost také dostatečná.

Na zelené křivce intenzity osvětlení jsou patrné zploštělé vrchní části grafu v určitých místech. Ty jsou dány rozsahem senzoru osvětlení, který byl použitý. Maximální hodnota intenzity osvětlení, jako byl tento senzor schopný zachytit je dle dokumentace  $E_{max} = 65535$  lx. V praxi se však jako maximální hodnota ukázalo  $E_{max} = 54\,612$  lx. To bylo nejspíše způsobeno znečištěním krycího plexiskla prachem či pylem a jeho případnou nedokonalou propustností. Při jasném slunném dni se dle různých zdrojů intenzita osvětlení pohybuje kolem 100 000 lx a při zatažené obloze v rozmezí 3 000 až 20 000 lx [37], [38], [39], [40]. Lze tedy říci, že většinu výkyvů způsobenou oblačností je tento senzor schopný zachytit i přesto, že maximální hodnota přímého záření je mimo jeho rozsah. To bylo také hlavním cílem měření, získat povědomí o průběhu intenzity osvětlení, nikoliv o jeho přesné hodnotě.

Níže uvedené průběhy byly vybrány jako ukázkové průběhy získané během dní, během kterých nastávaly charakteristické situace.

## Slunný den

Prvním vybraným dnem je 25. července 2022. Tento den byl dle naměřených údajů jasným letním dnem. To je patrné i při pohledu na charakteristiku z tohoto dne, která je na Obrázku 4.10



Obrázek 4.10: Průběh napětí panelů, data ze dne 25.7.2022

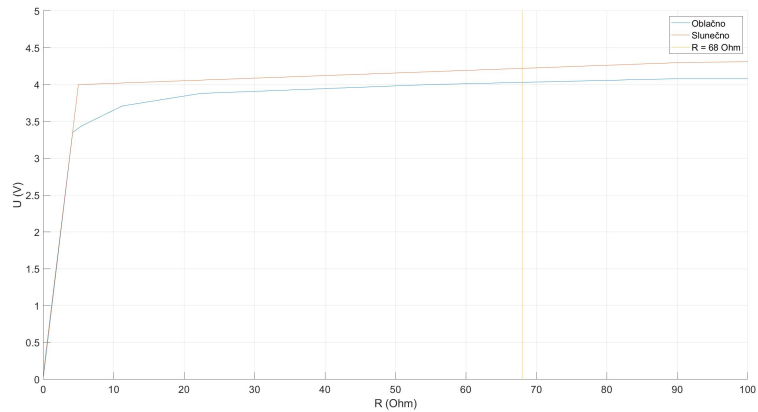
Na průběhu teploty (červená křivka dole) je vidět, že maximální hodnoty zaznamenané čidlem se pohybovaly kolem 55 °C. Tato hodnota je měřená teplota vzduchu ve stínu těsně nad

střešní krytinou. Teplota v průběhu dne rostla až do vrcholu, který nastal mezi 14. a 15. hodinou, bez větších výkyvů. Bez těch také od tohoto vrcholu klesala až do večerních a nočních hodin, kdy se ustálila na přibližně 25 °C. Z toho lze usoudit, že se jednalo s největší pravděpodobností o klasický slunný letní den. Z průběhů napětí lze také vyvodit, že během dne byla nejspíše i jasná obloha. To lze usoudit na základě porovnání s Obrázkem 4.9, kde je vidět, že CIS panel reaguje na oblačnost poměrně výrazně (výrazné poklesy kolem 12. hodiny). Obdobně citlivě se na základě naměřených dat choval i organický panel. Žádné takové propady se ovšem na průbězích napětí CIS a organického panelu z 25. července nevyskytují.

Tvar napětíových průběhů odpovídá průběhu naměřených V-A charakteristik (Obrázky 4.1, 4.2, 4.3 a 4.4) pro přímé záření. CIS a organický panel svůj výkon mění plynule v rámci dne bez výraznějších změn napětí při změnách osvit, jak napovídá jejich zaoblená V-A charakteristika. Oproti tomu monokrystalickému a polykrystalickému panelu prudce vzrůstá výkon při překonání určité hranice intenzity osvětlení. Tomu odpovídá jejich zalomená V-A charakteristika.

Další skutečností, kterou můžeme na Obrázku 4.10 pozorovat, je teplotní závislost jednotlivých panelů. Dle teoretických předpokladů platí, že amorfnní panely jsou obecně méně závislé na teplotě, než panely krystalické. Pokud se podíváme na průběh teploty od 9:00, tak až do přibližně 14:00 roste. Mezi 14. a 15. hodinou má přibližně stejnou hodnotu a od 15. hodiny začíná klesat. Pokud se podíváme na průběh napětí na krystalických panelech, tak lze říci, že se kolem 9. hodiny již oba pohybují kolem svého maximálního možného výkonu. Mezi 9. a 14. hodinou jejich napětí ale postupně klesá. Nedá se zde hovořit o poklesu slunečního svitu, neboť stále teplota roste. Oproti tomu napětí amorfnních panelů stále vzrůstá. Část křivky napětí krystalických panelů je mezi 14. a 15. hodinou poměrně konstantní, stejně jako teplota. Chování takto závislé na teplotě u amorfnních panelů patrně není. Od 15. hodiny dále napětí na všech panelech s výjimkou polykrystalického klesá.

To je částečně v rozporu s předpoklady, že difuzní záření by měly lépe zpracovávat amorfnní panely, popřípadě polykrystalický panel. V tomto případě však nejlépe dle průběhů klesající intenzitu přímého a rostoucí podíl difuzního záření nejlépe zpracovává polykrystalický panel. Pokud si totiž z naměřených hodnot napětí a proudu pro V-A charakteristiky dopočítáme hodnoty odporu zátěže a uděláme jejich grafický průběh, dostaneme průběhy odpovídající Obrázku 4.11. Tím dostaneme závislost napětí na panelu na velikosti zátěže při konstantním osvitu. Žlutá přímka reprezentuje odpor zátěže, která byla na panel připojena.

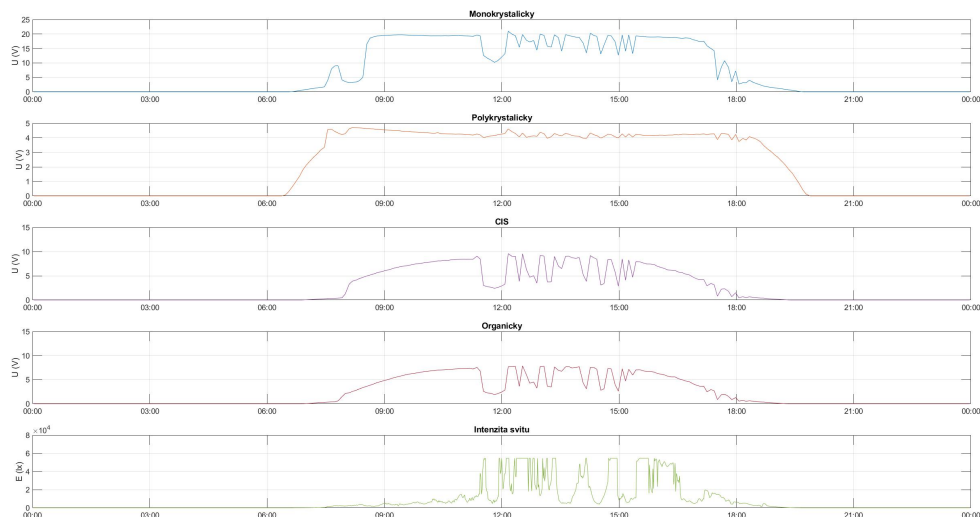


Obrázek 4.11: Závislost napětí panelu na velikosti zátěže

Jak je z této závislosti patrné, panel při změně rostoucím podílu difuzního záření (pokles z červené na modrou křivku), dojde pouze k malé změně napětí (při zachování konstantní zátěže). Tím lze vysvětlit, proč na Obrázku 4.10 napětí polykrystalického panelu po 15. hodině téměř neklesá, na rozdíl od ostatních panelů. Lze tím také vysvětlit dřívější náběh výkonu ráno a delší doběh večer.

### Reakce na přechodnou oblačnost

Dalším vybraným dnem je 6. dubna 2023. Tento den byl charakteristický přechodnou oblačností, a tedy i kolísavou intenzitou osvětlení v průběhu dne. Celkový přehled napětí je na Obrázku 4.12.

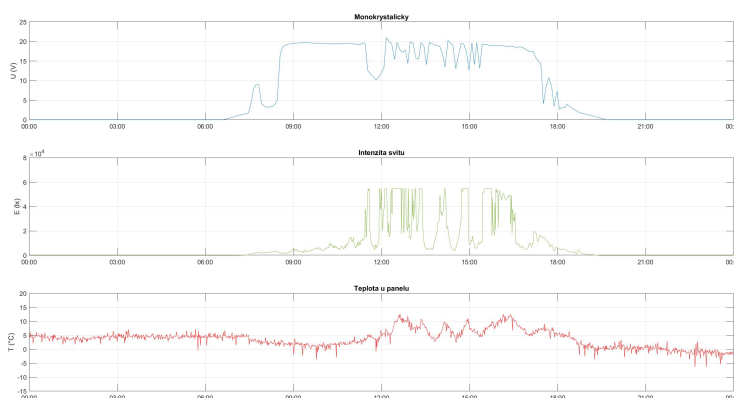


Obrázek 4.12: Časový průběh napětí a intenzity osvětlení dne 6. 4. 2023



Na grafech je možné vidět, že nejmenší citlivost na změny světelných podmínek opět vykazuje polykrystalický panel. A to i přesto, že jsou změny osvětlení poměrně velké - z cca 55 000 lx na cca 7 000 lx (například propad před 12. hodinou). Ostatní panely na tyto změny reagují o poznání více. CIS a organický panel můžeme pozorovat propad výroby o více než polovinu původního dodávaného výkonu. To opět odpovídá zjištěným charakteristikám, ale je to v rozporu s teoretickými předpoklady o nejlepší účinnosti amorfních panelů pro difuzní záření.

U monokrystalického panelu nejsou změny tak výrazné, jako u dvou amorfních článků. Na Obrázku 4.13, kde je detail průběhu na monokrystalickém článku, je vidět, že největší propad byl zaznamenán právě před 12. hodinou, ostatní poklesy osvětlení se neprojeví tak markantně.

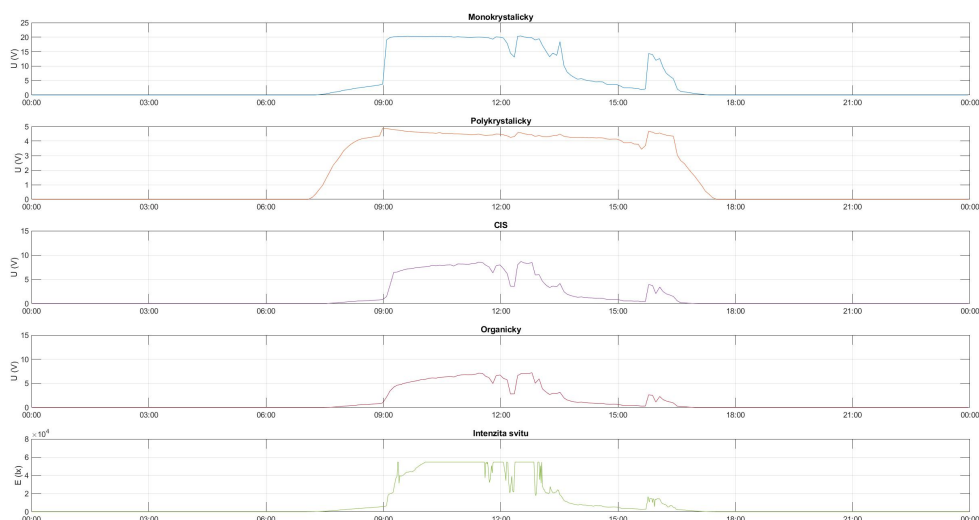


Obrázek 4.13: Časový průběh napětí a intenzity osvětlení na monokrystalickém panelu, 6. 4. 2023

To mohlo být způsobeno charakterem přecházející oblačnosti. Okamžik měření mohl nastat při chvilkovém rozjasnění, a nabírané hodnoty mohli být tímto zkresleny. Též je na Obrázku 4.13 zřetelný pokles napětí v ranních hodinách, přibližně kolem 8:00. Při prvotním zjištění tohoto výkyvu nebylo zcela jasné, co ho způsobuje. Při dalším pozorování ale bylo zjištěno, že komín domu, která sousedí s místem instalace na východní straně, vrhá při nízké výšce Slunce ráno stín na tento panel. Pokud se zastínění zkombinuje s nižší úrovní osvětlení v ranních hodinách, je možný vznik takového propadu.

### Závislost na intenzitě

Další ukázkou toho, jak silně závislá je výroba na intenzitě osvětlení, ilustrují průběhy na Obrázku 4.14. Jak je z nich zřejmé, všechna napětí kopírují výkyvy intenzity osvětlení, ať už směrem nahoru, či směrem dolů.



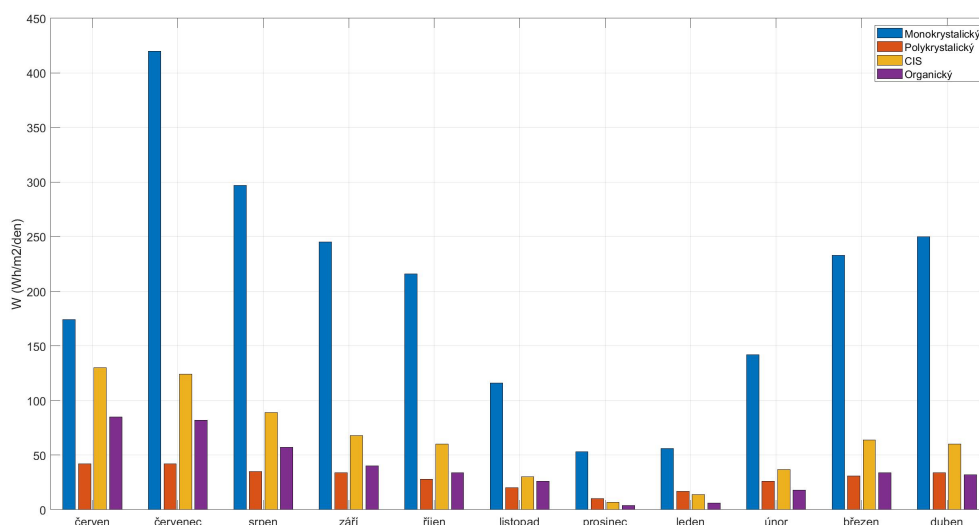
Obrázek 4.14: Časový průběh napětí a intenzity osvětlení, 10. 2. 2023

Za povšimnutí zde stojí ranní náběhy výkonu jednotlivých panelů. Pokud se podíváme na průběh intenzity osvětlení, lze říci, že v době přibližně od 7:30 do 9:00 lineárně roste. Tomu odpovídají i průběhy napětí na všech panelech, kromě polykrystalického. Ten jako jediný v této době roste a lze říci, že v 9:00, kdy začíná svít výrazněji růst, je polykrystalický panel již téměř na plném výkonu. V rámci růstu výkonu také lze pozorovat rozdíl mezi CIS a organickým panelem, které se jinak chovají po celou dobu měření velmi podobně. Zde je však malý rozdíl, a to v rychlosti náběhu výkonu. U CIS panelu je po 9. hodině nárůst přeci jen o něco rychlejší, než je tomu v případě organického článku. U monokrystalického článku lze pozorovat poměrně strmý nárůst společně s rostoucím osvitem.

## 4.4 Celkové naměřené hodnoty

Pokud se podíváme na celková naměřená data, dostaneme vcelku dobrý přehled o celkovém dodávaném výkonu. Zároveň, aby byla zohledněna rozdílná velikost panelů, byly tyto údaje vztaženy přepočtem na  $m^2$  a na počet dní, kolik probíhalo v daném měsíci měření.

V prvním přehledu na Obrázku 4.15 vidíme graficky znázorněno, kolik  $Wh/m^2$  bylo každý den v daném měsíci průměrně vyrobeno. Číselné hodnoty jsou uvedeny v Tabulkách 4.3 a 4.4.



Obrázek 4.15: Průměrná denní výroba jednotlivých FV panelů v každém dni v daném měsíci

Tabulka 4.3: Získané hodnoty průměrné denní výroby jednotlivých FV panelů 2022

W ( $Wh/m^2/den$ )	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec
Monokrystalický	174	420	297	245	216	116	53
Polykrystalický	42	42	35	34	28	20	10
CIS	130	124	89	68	60	30	7
Organický	85	82	57	40	34	26	4

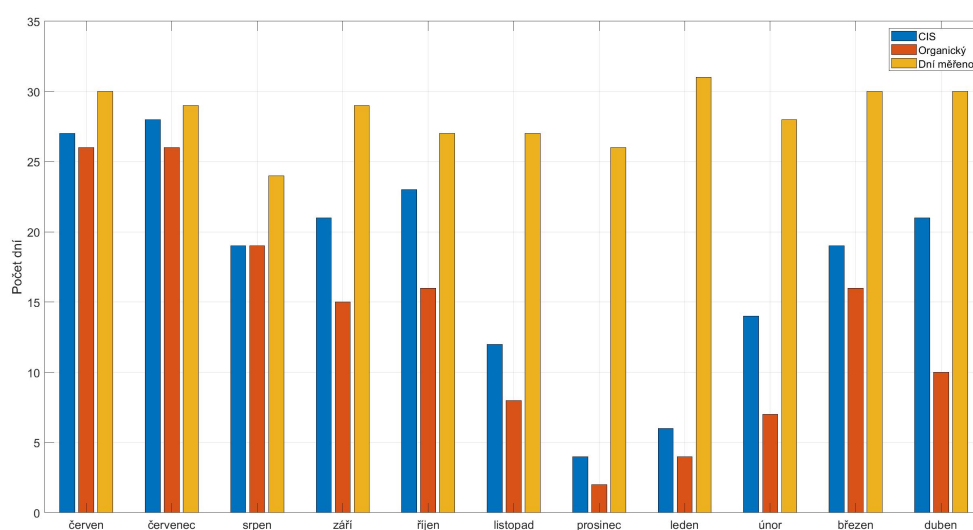
Tabulka 4.4: Získané hodnoty průměrné denní výroby jednotlivých FV panelů 2023

W ( $Wh/m^2/den$ )	leden	únor	březen	duben
Monokrystalický	56	142	233	250
Polykrystalický	17	26	31	34
CIS	14	37	64	60
Organický	6	18	34	32

Z toho je patrné, že monokrystalický panel dodává každý měsíc nejvíce výkonu. Pokles v červnu byl způsoben tím, že při mém dvoutýdenním pobytu v zahraničí došlo k uvolnění spojovací svorky měřícího senzoru a tím k chybným zaznamenávaným údajům. Tuto závadu jsem bohužel objevil až po mém návratu při procházení aktuálních dat. Patrný je též velký rozdíl mezi výrobou v lednu a v srpnu, který činí téměř osminásobek ( $420 Wh/m^2/den$  v srpnu oproti  $53 Wh/m^2/den$  v lednu).

Polykrystalický panel nemá tak vysoký dodávaný výkon na  $m^2$ , jak by mohlo být očekávané. Hlavní vliv měla s největší pravděpodobností jeho konstrukce. Zabudováním přímo do střešní tašky byla totiž omezena možnost ochlazování panelu prouděním větru kolem něj. Tímto způsobem konstrukce bylo omezeno i předávání tepla do okolí panelu, jelikož ze spodní strany byla pod střechou v horkých dnech vyšší teplota, než ve venkovním prostředí. V zimních měsících je pak celkový úhrn slunečního svitu obecně nižší. Při demontáži modelové instalace byla také nalezena drobná prasklinka v jednom ze článků polykrystalického panelu. Pro přesnou identifikaci závažnosti této praskliny by bylo nutné poškozený článek nasnímat termokamerou za provozu a vyhodnotit zahřívání článku, kterým by se vážnost dopadů praskliny na funkčnost dala posoudit.

V jistém smyslu překvapující výsledky přinesly hodnoty průměrné výroby u CIS panelu a organického panelu. Dle předpokladů by totiž měly tyto druhy panelů mít nižší citlivost na přímé záření. Výroba by tedy měla být stabilnější s ohledem na možné výkyvy dopadajícího záření. Denní průběhy napětí ale prokazovaly značnou nestálost dodávaného výkonu při měnících se světelných podmínkách. Přesto však, především v letních a podzimních měsících dodávají v průměru více energie, než polykrystalický panel. Nejvýraznější rozdíl lze pozorovat v červenci, kdy výroba CIS panelu ( $124 \text{ Wh}/m^2/\text{den}$ ) téměř trojnásobku výroby polykrystalického panelu ( $42 \text{ Wh}/m^2/\text{den}$ ). Výroba organického panelu dosahovala téměř dvojnásobku polykrystalického panelu - organický panel vyrobil v červenci v průměru  $82 \text{ Wh}/m^2$  denně. To mohlo být důsledkem například výše zmiňované závady na polykrystalickém panelu a jeho zahříváním. Také se mohla projevit kombinace nižší teplotní závislosti amorfních panelů a špatného chlazení polykrystalického panelu. Počet dní, v daném měsíci, kdy dodávaly amorfní panely více energie, než polykrystalický, je vidět v grafu na Obrázku 4.16.



Obrázek 4.16: Počet dní v měsíci, kdy převyšovala výroba amorfních panelů výrobu polykrystalického panelu

## 5 Navrhovaná optimalizační řešení

Na základě teoretických vědomostí a dat získaných dlouhodobým měřením lze navrhnout konkrétní řešení. Každé z níže uvedených řešení klade důraz na jiný upřednostňovaný aspekt (či jejich kombinaci), který by mohl hrát roli při rozhodování potenciálního provozovatele. Zároveň jsou uvedeny limitující či podmiňující předpoklady, které hrají roli v tom, kdy by byly přínosy navrhovaného řešení platné.

### Celoroční řešení s monokrystalickými panely

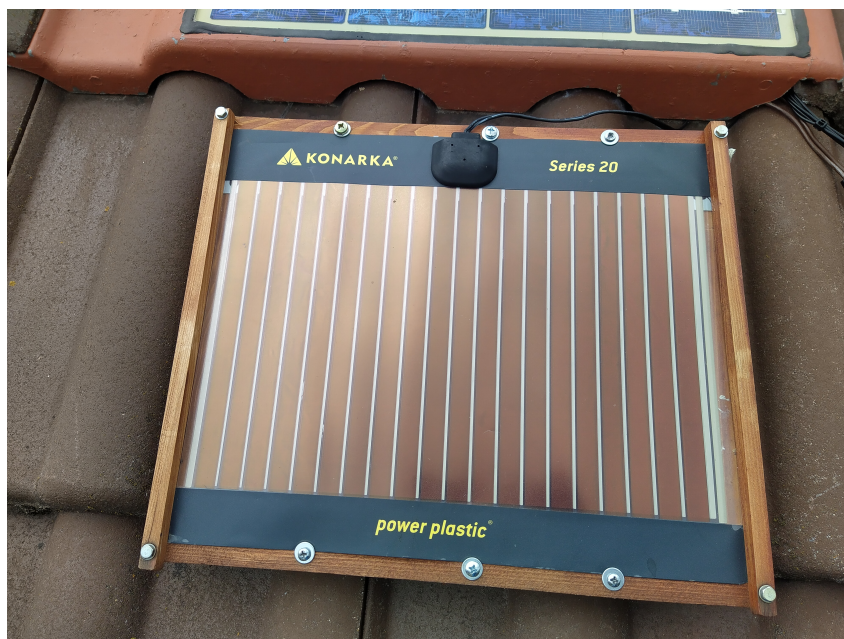
Pokud bychom vzali do úvahy pouze požadavek na maximum vyrobené energie bez ohledu na další faktory, byla by na základě dlouhodobé analýzy jasně doporučena instalace monokrystalických panelů. Absolutní množství energie vyrobené monokrystalickým panelem v modelové instalaci bylo v každém měsíci jednoznačně nejvyšší. Pokud by byla instalace o pevně dané ploše, tento typ panelů by vyrobil nejvíce. Lze také říci, že pokud bychom stanovili maximální spotřebu, kterou by chtěl provozovatel pokrýt, stačila by k uspokojení dodávky nejmenší plocha. To by mohlo být výhodné především v situaci, kdy by měl provozovatel omezenou plochu k instalaci, např. velikostí střechy či rozsahem zastínění části plochy. Jistým omezením u tohoto řešení je pořizovací cena, která je u monokrystalických panelů nejvyšší z dalších typů sledovaných v měření. Zde by tedy velmi záleželo, jaké množství energie by FVE provozovateli vyrobila a kolik by byly pořizovací náklady FVE z monokrystalických panelů.

### Celoroční řešení s amorfními panely

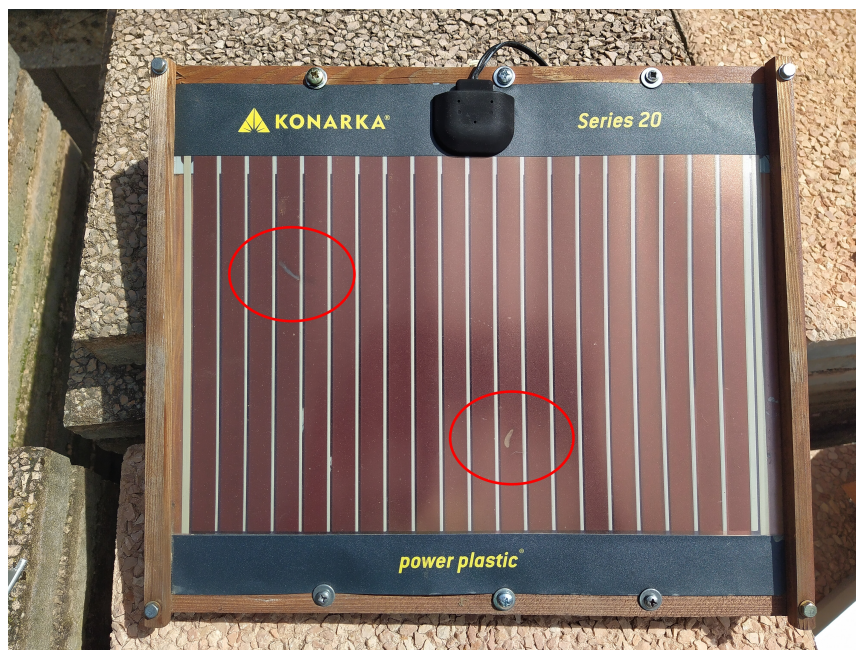
V případě CIS a organických panelů se ukázalo, že v rámci modelové instalace měli druhý, respektive třetí nejvyšší výnos vztážený na  $m^2$ . Důvody, proč tomu tak může být, jsou zmíněny v Kapitole 4.4. Tyto výsledky dávají těmto panelům zajímavou perspektivu, protože obecně se cena těchto panelů pohybuje podstatně níže, než je tomu v případě krystalických panelů. V některých případech až o polovinu. Též mají nižší teplotní závislost, což může přinést další výhodu v případě, že by byl použit větší panel. U větší instalace, kde lze předpokládat více panelů a blíže u sebe, by bylo očekávané mírně zhoršené chlazení. Což by ale díky malému teplotnímu koeficientu nemuselo tolik vadit. Že amorfní panely skutečně reagují na rostoucí teploty méně popsáno na Obrázku 4.10. Pokud by tedy další významný aspekt při instalaci u provozovatele hrála cena, a nebylo by zároveň nutné pokrývat nijak vysokou spotřebu (například na rekreačních objektech), mohl by především CIS panel představovat zajímavou alternativu.

Zřejmě největší slabinou amorfních panelů, kromě nižší účinnosti je především jejich životnost, která je oproti krystalickým panelům podstatně nižší (2-5 let u amorfních panelů a více než 25 let u krystalických) [41]. Degradace za rok měření byla patrná především u organického panelu. Na Obrázku 5.1 je vidět stav při instalaci panelu v květnu 2022, a na Obrázku 5.2 jeho

stav při demontáži v červnu 2023. Jasně patrné jsou na Obrázku 5.2 červeně zvýrazněné stopy degenerace článku.



Obrázek 5.1: Organický panel při instalaci v květnu 2022



Obrázek 5.2: Organický panel při demontáži v červnu 2023.

## Řešení s integrovanými polykrystalickými panely ve střešní tašce

Polykrystalické panely jsou v současné době hojně využívány. Jejich největší výhodou je dobrá účinnost, vyšší než u amorfních panelů, ale zároveň nižší cena než u monokrystalických panelů. Dle teoretických předpokladů by měl mít i lepší citlivost na difuzní záření, což se potvrdilo hlavně stabilitou dodávaného výkonu - byl zaznamenán menší pokles v dodávaném výkonu při zhoršení světelných podmínek. Z části bylo dáno tvarem charakteristiky, a také to mohlo být způsobeno zatížením, které bylo v ploché části charakteristiky. Vzhledem k tomu, že měřeno bylo specifické konstrukční řešení (integrace polykrystalického FV panelu do střešní tašky), bude se následující řešení týkat pouze takovéto možnosti umístění. Jiné umístění je řešeno v dalších návrzích.

Z naměřených dat je patrné, že polykrystalický panel vynikal svou stabilitou a relativní nezávislostí na změně světelných podmínek, jak je rozebráno v Kapitole 4.3 u Obrázku 4.12. I přes tuto stabilitu ovšem vyrobil v průběhu roku nejméně energie na  $m^2$  plochy. Z Obrázku 4.15 je markantní pokles oproti ostatním zkoumaným panelům především v létě. Jak již bylo naznačeno, může to být způsobeno především špatným chlazením takto konstrukčně řešených panelů. Jejich použití by tedy pro zlepšení efektivity vyžadovalo zlepšení chlazení. To by bylo například na rodinném domě obtížně proveditelné, ale v jistých aplikacích by to možné bylo. Například při instalaci takovýchto "solárních tašek" na garážové stání či pergolu, kde může kolem střechy ze spodní strany volně proudit vzduch a zlepšit tak odvod tepla ze střešní krytiny. Integrace fotovoltaických panelů do střechy by byla také vhodná tam, kde je provozovatelem kladen důraz na estetiku a celkový vzhled budovy.

Další vhodná aplikace tohoto technického řešení by dle zjištěného chování mohla být u objektů s nízkou spotřebou v ostrovním režimu. Typicky například odlehlá chata u lesa či chatka v zahrádkářské kolonii. V případě kombinace nízké spotřeby a ostrovního režimu by bylo možné dobře využít relativní netečnost článku ke změnám intenzity osvětlení, jelikož by mohla být pro provozovatele elektrická energie stále dostupná relativně nezávisle na světelných podmínkách, byť v menším množství.

## Řešení pro zimní období

Vyšší zahřívání polykrystalického panelu v létě se ovšem projevilo jako výhoda v zimním období, když napadl sníh. Jeho rychlejší a vyšší zahřívání totiž způsobilo, že sníh z něj odtál a sklouzl dolů podstatně rychleji, než u ostatních panelů. Mohl tak dodávat větší množství energie (vztaženo k maximálnímu výkonu) a dříve, než ostatní panely.

Pokud bychom chtěli FVE optimalizovat na zimní období, je nutné zohlednit dva klíčové faktory. Malou výšku Slunce nad obzorem v zimních měsících a převládající podíl difuzního záření. První z uvedených parametrů by bylo možné vyřešit větším úhlem náklonu u FV panelů,

kdy by díky tomu sluneční paprsky dopadaly více přímo (tj. ve směru bližšímu normále plochy panelů). Roli by tedy hrálo konstrukční řešení FVE jako úhel plochy (střechy), kde je instalována, či zvýšení náklonu pomocí např. ocelové konstrukce. Druhý z parametrů, tedy vysoký podíl difuzního záření, lze optimalizovat volbou vhodného technologického řešení. Předpoklad lepší účinnosti amorfních panelů se v prosinci a lednu v prováděném měření nepotvrdil. Mohlo ale zde hrát roli více faktorů, především ohledně technické realizace měření, konkrétně zatížení panelů. Potvrdila se ale lepší citlivost polykrystalických panelů než monokrystalických. Proto by v případě optimalizace výroby na zimu bylo dle získaných dat nejvhodnější využít polykrystalický panel. Další zkoumanou optimalizací, například pomocí simulačního softwaru, by mohl být jejich náklon.

### **Řešení pro letní období**

Z hlediska požadavku na maximální výkon by bylo pro letní období nejvhodnější první zmiňované řešení s monokrystalickými panely. Pokud by ovšem provozovatel neměl vysoké nároky na dodávaný výkon a požadoval by výrobu především v létě, mohla by být alternativa v podobě amorfních CIS panelů. Jednat by se mohlo o instalaci na rekreační objekt s malou spotřebou. Pořízení FVE s CIS panely by bylo méně finančně náročné. Podstatně nižší výroba v zimních měsících (oproti monokrystalickým panelům) by v takovém případě nehrála tak významnou roli, vzhledem k využívání většiny rekreačních objektů na Tábořsku pouze v létě.

Konstrukčně by se dala letní instalace obecně optimalizovat snížením náklonu, vzhledem k pozici Slunce na obloze v letních měsících. V létě, kdy teplota vzduchu u panelů i samotných panelů může dosahovat poměrně vysokých hodnot, je vhodné zajistit dostatečný odvod tepla u panelů. To je možné zajistit především ponecháním dostatečného prostoru. V praxi je v závislosti na typu střešní krytiny ponechávána mezi střešou a panelem mezera 5 až 10 cm.

Ve všech výše uvedených řešeních není zmiňována možnost instalace samostatného polykrystalického panelu, jako byl měřený monokrystalický panel. Tato možnost je samozřejmě v praxi reálná a využívaná, nicméně takovýto typ panelu nebyl k dispozici pro zapůjčení a nemohl tak být měřen. Uvádění optimalizačních možností s využitím panelu, který nebyl součástí modelové instalace by tedy nebylo podloženo žádnými naměřenými daty a pozorovaným chováním. Při aplikování obecně známých a popsanych vlastností lze předpokládat, že chování a použití by bylo z větší části podobné, jako u monokrystalických. Oproti nim ale nabízejí polykrystalické panely většinou nižší pořizovací cenu.



## 6 Závěr

Ze získaných dat lze samozřejmě možné vyvozovat závěry platné především přímo pro měřené panely. Parametrů, které mohou do měření zasáhnout a ovlivnit výsledky, je celá řada. K nejpodstatnějším patří stáří panelu, jeho umístění a způsob uchycení na střeše, vhodnost jeho zatížení či sklon. Podstatnou roli může hrát i abnormalita v meteorologických podmínkách pro daný měsíc, či rok. Technologická a konstrukční doporučení ve vyhodnocení této práce proto vycházejí nejen z naměřených dat a zjištěných skutečností, ale také se opírají o obecně platné předpoklady a teoretické znalosti, jejichž platnost mohla být narušena abnormálními výkyvy počasí, či způsobem technického řešení některých aspektů měření.

Cílem doporučení stanovených v Kapitole 5 je představit řešení, která mohou pomoci optimalizovat systém podle určitých, provozovatelem stanovených priorit. Každé doporučení tedy klade důraz na jiný požadavek a nelze bez znalosti přesných požadavků říci, které z nich je pro vybranou lokalitu na Tábořsku nejlepší. Vždy bude záležet na požadavcích, které budou na FVE kladeny a jaké výsledky budou očekávány. Svá řešení jsem rozdělil na základě nejběžnějších požadovaných vlastností, kterými většinou bývají maximalizace výnosu, pořizovací cena, životnost a případně větší výroba v určitém období.

Celkově nejlepším řešením z uváděných možností se ale jeví využití monokrystalických panelů, především z důvodu maximálního dodávaného výkonu. Polykrystalický panel s konstrukčním řešením, které bylo měřeno, v létě díky svému pravděpodobnému přehřívání, nedosahoval takových výkonů. Varianta s monokrystalickými panely vyžaduje sice o něco vyšší počáteční investici, než například instalace polykrystalických panelů. Nabízí ale nejlepší využití prostoru, který bývá při instalaci na střechu značně omezený. Životnost krystalických panelů obecně také mnohonásobně převyšuje životnost amorfních panelů. Využití CIS nebo organických panelů by představovalo časově i finančně náročnou výměnu všech instalovaných panelů FVE v krátkém časovém horizontu. I z těchto důvodů nejsou amorfní panely i přes své některé nesporné výhody komerčně příliš rozšířené. Současný vývoj FV článků, i těch amorfních, ale jejich životnost i účinnost stále zvyšuje. Proto je tedy do budoucna možné, že se i amorfní panely budou v komerční sféře vyskytovat častěji, než je tomu teď.

Při realizaci této diplomové práce se vyskytlo několik problémů, které bylo nutné vyřešit určitým kompromisem. Jedním z nich byla například volba zátěže, která nebyla, už kvůli jejich rozdílnému maximálnímu výkonu, pro všechny měřené panely ideální. Nejideálnějším řešením by bylo využití MPPT regulátorů. Tím by byl ovšem do měření vnesen další prvek, který by mohl znamenat zkreslení výsledků. V krajním případě by mohl například z důvodu poruchy udržovat pracovní bod zcela mimo vhodnou pozici a tím by byla naměřená data zcela irelevantní.

Dalším z faktorů je pořizovací cena takového zařízení, kterým by bylo nutné osadit každý z panelů. I proto byla na základě konzultace s vedoucím práce použita zvolená konstantní zátěž, byť to znamenalo určitou chybu. Také se v určitých momentech získané výsledky lišily od teoretických předpokladů a bylo nutné zjistit příčinu této odlišnosti. Ta se mohla nacházet ve specifické meteorologické situaci, ve vlastnostech konkrétního použitého panelu či to mohl být důsledek technického provedení některého z měření. V případě, že byla takováto odlišnost důsledkem chyby (technické nebo lidské, například v kódu či ve výpočtech při vyhodnocení dat), bylo nutné zajistit odstranění této chyby.

V průběhu jsem také narazil na nutnost osvojit si určité znalosti a dovednosti, se kterými jsem se předtím ve větší míře neseťkal. Jednalo se hlavně o seznámení se s platformou Arduino, její strukturou, logikou zapojení periférií a komunikačními protokoly. Dále bylo nutné celý systém naprogramovat a to vyžadovalo naučit se pracovat v programovacím jazyce Wiring. Také jsem prohloubil své znalosti softwaru MATLAB, který jsem využíval ke zpracování velkého množství naměřených dat. Při fyzické realizaci modelové instalace jsem měl možnost ověřit si své schopnosti řešit neočekávané problémy, hledat jejich příčinu a zajistit jejich odstranění, nebo přijít s jiným řešením. Po odborné stránce mě práce posunula v oblasti problematiky fotovoltaických panelů, a to ve znalosti vlastností a chování určitých typů panelů. Také mi přinesla lepší znalost meteorologických a světelných podmínek v místě budoucí instalace FVE.

Problematika optimalizace FV systémů je velmi široká. I z důvodu, že meteorologické podmínky jsou silně lokální záležitostí a je nutné brát je vždy s ohledem na místo, kde byly změřeny. Z hlediska konstrukčních optimalizací by dalším možným směrem rozšíření této práce mohlo být zjištění vlivu sklonu a určení optimální hodnoty tohoto úhlu. Případně by bylo možné blíže prozkoumat vliv omezení či zlepšení chlazení kolem panelů a závislost vyrobeného množství energie na tomto faktoru pro každý ze zkoumaných typů. Z technologického hlediska by bylo možné sledovat rychlost degradace zvolených FV panelů, například termokamerou a opakovaným měřením V-A charakteristiky. Všemi z uvedených možností dalšího směřování by bylo také nutné se zabývat dlouhodobě a proto se jim nebylo možné dostatečně věnovat v rámci této práce. Prozkoumání těchto dalších aspektů by ale zcela jistě přineslo podrobnější pohled na mnou zkoumanou problematiku a zpřesnilo by dosažené výsledky.

# Seznam použité literatury

- [1] Svět energie: Fotovoltaický jev [online]. ČEZ [cit. 2022-12-03]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/einstein/f3.htm>
- [2] BECHNÍK, Bronislav. Nejpoužívanější pojmy ve fotovoltaice [online]. 2014 [cit. 2022-11-15]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/11772-nejpouzivanejsi-pojmy-ve-fotovoltaice>
- [3] BANNERT, Petr. Praktika z fotovoltaiky [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: [http://files.polous.cz/solar\\_energy/Petr%20Bannert%20-%20Praktika%20z%20fotovoltaiky.pdf](http://files.polous.cz/solar_energy/Petr%20Bannert%20-%20Praktika%20z%20fotovoltaiky.pdf). Publikace. Vyšší odborná a střední průmyslová škola Varnsdorf.
- [4] BECHNÍK Bronislav. Historie a perspektivy OZE - fotovoltaika, méně rozšířené technologie [online]. [cit. 2022-12-10], článek dostupný z <https://oze.tzbinfo.cz/fotovoltaika/5517-historie-a-perspektivy-oze-fotovoltaika-menerozsirene-technologie>
- [5] LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. Fotovoltaika: teorie i praxe využití solární energie. 2., dopl. vyd. Praha: Ilsa, 2010. ISBN 978-80-904311-5-7.
- [6] BENDA, Vítězslav, Kamil STANĚK a Petr WOLF. Fotovoltaické systémy [online]. 2011 [cit. 2022-12-03]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/10537342-Fotovoltaicke-systemy.html>. Učební text k semináři. ČVUT.
- [7] CHMEL, Ladislav a Ivo HAMERNÍK. Fotovoltaika, fototermika [online]. Brno: publi.cz, 2016 [cit. 2022-12-04]. ISBN 978-80-88058-02-1. Dostupné z: <https://publi.cz/books/91/Cover.html>
- [8] CIHELKA, Jaromír. Sluneční vytápěcí systémy. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1984, 206 s. ISBN 04-236-84.
- [9] RANC, David. Možnosti zvýšení výkonu a využití vyrobené energie z malých fotovoltaických elektráren. Plzeň, 2016. Diplomová práce. ZČU v Plzni. Vedoucí práce Ing. Stanislav Jiřinec.
- [10] NASA Public Lessons Learned System: Earth Orbit Environmental Heating [online]. 1.2.1999 [cit. 2023-03-01]. Dostupné z: <https://llis.nasa.gov/lesson/693>
- [11] KAŇKA, Jan. Deklinace Slunce v průběhu desetiletí. Časopis Světlo [online]. 7.2.2012, 1/2012 [cit. 2023-03-01]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/clanek/deklinace-slunce-v-prubehu-desetileti-568>

- [12] DLOUHÝ, Tomáš. Obnovitelné zdroje energie: Solární energie (4. přednáška) [online]. 2018 [cit. 2023-03-01]. Dostupné z: <http://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/2018/06/OZE-p4.pdf>. Učební text. ČVUT v Praze.
- [13] Absorption Coefficient. PVEducation [online]. [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/absorption-coefficient>
- [14] LI, Yongxi, Xiaheng HUANG a Stephen R. FORREST. Non-fullerene acceptor organic photovoltaics with intrinsic operational lifetimes over 30 years. Nature Communications [online]. 14.9.2021, 2021(12) [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25718-w>
- [15] ŠURKALA, Milan. Průhledné organické solární panely dosáhly 10,8% účinnosti. Svět Hardware [online]. 2020 [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/pruhledne-organicke-solarni-panely-dosahly-10-8-ucinnosti/52880>
- [16] VONDRA, Tomáš. Organické solární panely trhají rekordy - a konečně jsou odolné proti poškození. Obnovitelně.cz [online]. 24.5.2019 [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: <https://www.obnovitelne.cz/clanek/818/organicke-solarni-panely-trhaji-rekordy-a-konecne-jsou-odolne-proti-poskozeni>
- [17] DEB, Satyen K. Recent developments in high-efficiency PV cells. In: World Renewable Energy Congress VI. Pergamon, 2000. p. 2658-2663.
- [18] POULEK, Vladislav a Martin LIBRA. Konstrukce a výroba fotovoltaických článků a panelů I. Elektro [online]. 03/2010 [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/konstrukce-a-vyroba-fotovoltaickych-clanku-a-panelu-10310>
- [19] Germanium Telluride Absorber Layer, A Proposal for Low Illumination Photovoltaic Application Using AMPS 1D. In: AL NOMAN, Abdullah, Jaynul ABDEN a Mohammad Aminul ISLAM. Konference "International Conference on Computer, Communication, Chemical, Materials and Electronic Engineering"[online]. Rajshahi University, 2/2018n. 1. [cit. 2023-02-28]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/The-Shockley-Queisser-limit-defines-the-maximum-theoretical-efficiency-of-a-solar-cell\\_fig1\\_324819847](https://www.researchgate.net/figure/The-Shockley-Queisser-limit-defines-the-maximum-theoretical-efficiency-of-a-solar-cell_fig1_324819847)
- [20] VOBOŘIL, David. Revoluční solární články mohou překonat teoretický limit účinnosti 32 %. O energetice.cz [online]. 15. 6. 2016 [cit. 2023-03-05]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje-energie/revolucni-solarni-clanky-mohou-prekonat-teoreticky-limit-ucinnosti-32-procent>

- [21] Solar Energy Technologies Office: Solar Photovoltaic Cell Basics [online]. U.S. Department of Energy [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-cell-basics>
- [22] MIHULKA, Stanislav. Grafenové brnění chrání perovskitové solární články před poškozením. EkonTech [online]. 2020 [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: <https://www.ekontech.cz/clanek/grafenove-brneni-chrani-perovskitove-solarni-clanky-pred-poskozenim>
- [23] MASTNÝ, Petr. Obnovitelné zdroje elektrické energie. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [24] Konarka Power Plastic® 20 Series: Product Specifications [online]. In: . [cit. 2023-04-07]. Dostupné z: <https://www.econologie.com/fichiers/partager/1254647073FCWNkM.pdf>
- [25] JEONG, Jay. PHOTOVOLTAICS: Measuring the 'Sun'. In: LASER FOCUS WORLD [online]. 21.5.2009 [cit. 2023-04-07]. Dostupné z: <https://www.laserfocusworld.com/lasers-sources/article/16566681/photovoltaics-measuring-the-sun>
- [26] Arduino IoT Cloud [online]. [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://create.arduino.cc/iot/things>
- [27] Arduino IDE. Arduino.cc [online]. [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/software>
- [28] Arduino Forum. Arduino Forum [online]. [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://forum.arduino.cc/>
- [29] Project Hub. Arduino Project Hub [online]. [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://projecthub.arduino.cc/>
- [30] SD. GitHub [online]. [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://github.com/arduino-libraries/SD>
- [31] RTCLib. GitHub [online]. [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://github.com/adafruit/RTCLib>
- [32] ArduinoIoTCloud. GitHub [online]. [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://github.com/arduino-libraries/ArduinoIoTCloud>
- [33] Wire.h. GitHub [online]. [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://github.com/esp8266/Arduino>
- [34] BH1750FVI Library. GitHub [online]. [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://github.com/claws/BH1750>

- [35] SPI. GitHub [online]. [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://github.com/arduino/ArduinoCore-avr>
- [36] ROYALOHM Datasheet: Cement Fixed Resistors [online]. In: . [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/f79bbaf70436af9f10159e1c9a1f7e1c/axial.PDF>
- [37] VELUX, Denní světlo [online]. In: . [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://velcdn.azureedge.net/-/media/marketing/cz/odbornici/architekti-a-projektanti/pdf/moss/deic-denni-svetlo.pdf>
- [38] Kolik světla je potřeba?. LEDSVITI.cz [online]. 15.9.2018 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.ledsviti.cz/blog/kolik-svetla/>
- [39] Lux: Jednoduše vysvětleno. Světla24.cz [online]. [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.svetla24.cz/inspirace/intenzita-osvetleni-lux>
- [40] Denní osvětlení. WikiSkripta [online]. [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: [https://www.wikiskripta.eu/w/Denn%C3%AD\\_osv%C4%9Btlen%C3%AD](https://www.wikiskripta.eu/w/Denn%C3%AD_osv%C4%9Btlen%C3%AD)
- [41] 3 Amorphous Solar Panels Advantages and Disadvantages [online]. 6. 2. 2023 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://energytheory.com/3-amorphous-solar-panels-advantages-and-disadvantages/>
- [42] Fotovoltaika: otázky a odpovědi. SOLLARIS [online]. [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.sollaris.cz/fotovoltaika-a-jeji-princip/casto-kladene-otazky>

# Seznam obrázků

1.1	Energie při uvolnění elektronu, upraveno z [6] . . . . .	13
1.2	Maximální účinnost pro běžné spektrum, převzato a upraveno z [19] . . . . .	14
1.3	Konstrukce FV článku [2] . . . . .	15
1.4	Náhradní schéma FV článku . . . . .	16
1.5	Podíl přímého a difuzního záření v průběhu roku [7] . . . . .	17
1.6	Orientace osvětlované plochy (panelu) vůči slunečnímu záření [12] . . . . .	18
1.7	Změna V-A charakteristiky panelu v závislosti na intenzitě záření [2] . . . . .	21
1.8	Změna V-A charakteristiky panelu v závislosti na jeho teplotě [3] . . . . .	22
2.1	Závislost absorpčního koeficientu na vlnové délce pro vybrané materiály [13] .	24
2.2	Struktury (zleva) tenkovrstvého, monokrystalického a polykrystalického článku, převzato z [21] . . . . .	27
3.1	Pohled na modelovou instalaci . . . . .	29
3.2	Detail modelové instalace . . . . .	29
3.3	Schéma zapojení modelové instalace . . . . .	33
3.4	Schéma zapojení pomocného měření . . . . .	36
3.5	Formát datového výstupu napětí na panelech . . . . .	36
3.6	Formát datového výstupu intenzity osvětlení . . . . .	36
3.7	Webové grafické rozhraní pro zobrazení aktuálních dat (zde o intenzitě osvětlení)	37
3.8	Pohled na mikrokontroléry obou měřících systémů . . . . .	38
3.9	Zastínění spodních dvou panelů střechou rodinného domu . . . . .	39
3.10	Zastínění panelů přecházejícím stínem komínu . . . . .	39
3.11	Dřevěné rámečky CIS a organického panelu . . . . .	40
3.12	Umístění teplotního čidla . . . . .	40
3.13	Umístění senzoru intenzity osvětlení . . . . .	41
3.14	Zavěšení mařičního rezistoru s improvizovaným chladičem . . . . .	41
3.15	Charakteristika zahřívání rezistoru v závislosti na míře zatížení [36] . . . . .	42
4.1	Naměřená V-A charakteristika monokrystalického panelu . . . . .	45
4.2	Naměřená V-A charakteristika polykrystalického panelu . . . . .	46
4.3	Naměřená V-A charakteristika CIS panelu . . . . .	47
4.4	Naměřená V-A charakteristika organického panelu . . . . .	48
4.5	Naměřená V-A charakteristika po zvětšení náklonu panelu . . . . .	49
4.6	Průběh funkce $P = f(U)$ a zvolené proložení polynomem . . . . .	50
4.7	Průběh derivace funkce z rovnice (4.2) s vyznačeným maximem . . . . .	51
4.8	Průběh napětí na jednotlivých panelech a průběh teploty, data ze dne 3.6.2022 .	53

4.9	Průběh napětí na CIS panelu, průběh svitu a teploty, data ze dne 10.2.2023 . . .	53
4.10	Průběh napětí panelech, data ze dne 25.7.2022 . . . . .	54
4.11	Závislost napětí panelu na velikosti zátěže . . . . .	56
4.12	Časový průběh napětí a intenzity osvětlení dne 6. 4. 2023 . . . . .	56
4.13	Časový průběh napětí a intenzity osvětlení na monokrystalickém panelu, 6. 4. 2023 . . . . .	57
4.14	Časový průběh napětí a intenzity osvětlení, 10. 2. 2023 . . . . .	58
4.15	Průměrná denní výroba jednotlivých FV panelů v každém dni v daném měsíci .	59
4.16	Počet dní v měsíci, kdy převyšovala výroba amorfních panelů výrobu polykrystalického panelu . . . . .	60
5.1	Organický panel při instalaci v květnu 2022 . . . . .	62
5.2	Organický panel při demontáži v červnu 2023. . . . .	62



# Přílohy

## Seznam příloh

Příloha I - Produktový list organického panelu

Příloha II - Schéma zapojení

Příloha III - Použité komponenty

Příloha IV - Naměřená data