



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

## DIAGNOSTIKA FV MODULŮ RŮZNÝMI DRUHY TERMOKAMER

DIAGNOSTICS OF PV MODULES WITH DIFFERENT TYPES OF THERMAL CAMERAS

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

**Bc. Ivana Pallová**

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**Ing. Kristýna Jandová, Ph.D.**

**BRNO 2025**

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektrotechnická výroba a management**

Ústav elektrotechnologie

**Studentka:** Bc. Ivana Pallová

**ID:** 173719

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2024/25

**NÁZEV TÉMATU:**

## Diagnostika FV modulů různými druhy termokamer

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte problematiku fotovoltaických křemíkových modulů a seznamte se s možnými defekty v těchto modulech. Proveďte diagnostiku vybraných fotovoltaických modulů na zvolené FV elektrárně pomocí různých druhů termokamer firmy HIMICRO. Metodou elektroluminiscence určete přesněji případné defekty. Pořízené snímky z termokamer zpracujte v programu Hikmicro Analyzer, vyhodnoťte je a okomentujte možné příčiny nalezených defektů. Proveďte analýzu výkonu a finanční analýzu měřené FV elektrárny. Vytvořte predikci vývoje výkonu a finanční úsporu v závislosti na změřených datech.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucí práce.

**Termín zadání:** 10.2.2025

**Termín odevzdání:** 27.5.2025

**Vedoucí práce:** Ing. Kristýna Jandová, Ph.D.

**doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce je zaměřena na možné defekty fotovoltaických článků a modulů, diagnostiku a vyhodnocení vlivu defektů na výkon fotovoltaické elektrárny. V rámci teoretické části jsou představeny defekty článků a modulů a možné diagnostické metody, pomocí kterých lze tyto defekty odhalit. Zvláštní zaměření je zde na diagnostiku závad pomocí termografie. V praktické části je provedena diagnostika fotovoltaických modulů pomocí termokamer a jejich vyhodnocení. Následuje část, kde pomocí elektroluminiscence byly zobrazeny defekty solárních článků. V závěrečné části je vytvořena predikce výkonu a finanční analýza fotovoltaické elektrárny v závislosti na míře poškození solárních panelů.

## **Klíčová slova**

Fotovoltaické články, termografie, diagnostika, elektroluminiscence, defekty, predikce výkonu, finanční analýza

## **Abstract**

This thesis is focused on possible defects of photovoltaic cells and modules, diagnostics and evaluation of the effect of defects on the performance of photovoltaic power plant. The theoretical part presents the defects of cells and modules and possible diagnostic methods that can be used to detect these defects. A special focus is here on the diagnosis of defects using thermography. In the practical part, the diagnosis of photovoltaic modules using thermal cameras and their evaluation is presented. This is followed by a section where defects in solar cells were imaged using electroluminescence. In the final part, a performance prediction and financial analysis of the PV plant is made depending on the level of damage of the solar panels.

## **Keywords**

Photovoltaic cells, thermography, diagnostics, electroluminescence, defects, performance prediction, financial analysis

## **Bibliografická citace**

PALLOVÁ, Ivana. *Diagnostika FV modulů různými druhy termokamer*. Online, diplomová práce. Kristýna JANDOVÁ (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2025. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/169223>. [cit. 2025-05-23]

# Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení studenta:** *Bc. Ivana Pallová*

**VUT ID studenta:** *173719*

**Typ práce:** *Diplomová práce*

**Akademický rok:** *2024/25*

**Téma závěrečné práce:** *Diagnostika FV modulů různými druhy termokamer*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 23. května 2025

-----  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Kristýna Jandová, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

Dále bych chtěla poděkovat společnosti SERVIS SOLAR 24, spol. s r.o. za zprostředkování solárních panelů, které byly klíčové pro praktickou část závěrečné práce.

V Brně dne: 23. května 2025

-----  
podpis autora

# Obsah

|                                                                      |           |
|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| SEZNAM OBRÁZKŮ.....                                                  | 9         |
| SEZNAM TABULEK.....                                                  | 10        |
| ÚVOD.....                                                            | 11        |
| <b>1. ENERGIE SLUNCE.....</b>                                        | <b>12</b> |
| 1.1 DIFUZNÍ A PŘÍMÉ ZÁŘENÍ.....                                      | 13        |
| <b>2. FOTOVOLTAICKÉ ČLÁNKY A MODULY.....</b>                         | <b>15</b> |
| 2.1 FOTOVOLTAICKÝ JEV.....                                           | 15        |
| 2.2 DRUHY FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ.....                                | 16        |
| 2.2.1 Křemíkové články monokrystalické.....                          | 16        |
| 2.2.2 Křemíkové články polykrystalické.....                          | 16        |
| 2.2.3 Tenkovrstvé články.....                                        | 17        |
| 2.3 FOTOVOLTAICKÉ MODULY.....                                        | 19        |
| 2.3.1 Konstrukce.....                                                | 19        |
| 2.3.2 Voltampérová charakteristika.....                              | 20        |
| 2.4 DEFEKTY FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ A MODULŮ.....                     | 22        |
| 2.4.1 Virový defekt.....                                             | 22        |
| 2.4.2 Vnitřní pnutí v materiálu.....                                 | 23        |
| 2.4.3 Nehomogenní difúzní vrstva.....                                | 23        |
| 2.4.4 Mechanické poškození.....                                      | 24        |
| 2.4.5 Delaminace fotovoltaického panelu.....                         | 24        |
| 2.4.6 Šnečí cestičky (Snailtrails).....                              | 25        |
| 2.4.7 Hot spots.....                                                 | 25        |
| 2.4.8 PID – Potenciální indukovaná degradace.....                    | 26        |
| <b>3. METODY DIAGNOSTIKY MODULŮ.....</b>                             | <b>28</b> |
| 3.1 VIZUÁLNÍ KONTROLA.....                                           | 28        |
| 3.2 LBIC METODA.....                                                 | 28        |
| 3.3 ELEKTROLUMINISCENCE.....                                         | 29        |
| 3.4 TERMOGRAFIE.....                                                 | 30        |
| 3.4.1 Zásady měření.....                                             | 31        |
| <b>4. TERMOKAMERY.....</b>                                           | <b>32</b> |
| 4.1 PARAMETRY.....                                                   | 32        |
| 4.1.1 Emisivita.....                                                 | 32        |
| 4.1.2 Spektrální rozsah.....                                         | 33        |
| 4.1.3 Přesnost.....                                                  | 34        |
| 4.1.4 Rozlišení detektoru, FOV a IFOV.....                           | 35        |
| 4.1.5 Teplotní citlivost.....                                        | 35        |
| 4.2 MODELÝ TERMOKAMER HIKMICRO.....                                  | 36        |
| 4.2.1 Série Eco.....                                                 | 36        |
| 4.2.2 Série B.....                                                   | 36        |
| 4.2.3 Série M.....                                                   | 36        |
| 4.2.4 Série G.....                                                   | 36        |
| 4.3 POŘIZOVACÍ NÁKLADY VYBRANÝCH TERMOKAMER PRO KONTROLU PANELŮ..... | 37        |
| <b>5. ANALÝZA MODULŮ.....</b>                                        | <b>39</b> |
| 5.1 POUŽITÉ PŘÍSTROJE.....                                           | 39        |
| 5.2 VIZUÁLNÍ KONTROLA.....                                           | 42        |
| 5.3 REFERENČNÍ KONTAKTNÍ TEPLMĚR.....                                | 42        |
| 5.4 KONTROLA POMOCÍ TERMOKAMER.....                                  | 42        |
| 5.5 HIKMICRO ANALYZER.....                                           | 46        |

|           |                                               |           |
|-----------|-----------------------------------------------|-----------|
| 5.6       | ANALÝZA A VYHODNOCENÍ TERMOGRAMŮ .....        | 48        |
| 5.7       | ZHODNOCENÍ .....                              | 50        |
| <b>6.</b> | <b>METODA ELEKTROLUMINISCENCE .....</b>       | <b>51</b> |
| 6.1       | PRVNÍ PANEL .....                             | 51        |
| 6.2       | DRUHÝ PANEL .....                             | 52        |
| 6.3       | ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ELEKTROLUMINISCENCE.....  | 53        |
| <b>7.</b> | <b>VÝKONOVÁ A EKONOMICKÁ ANALÝZA FVE.....</b> | <b>54</b> |
| 7.1       | STÁVAJÍCÍ FOTOVOLTAICKÁ ELEKTRÁRNA .....      | 54        |
| 7.2       | NAMĚŘENÝ VÝKON A VÝNOS Z FVE .....            | 54        |
| 7.3       | MODELOVÁ ANALÝZA.....                         | 58        |
| 7.3.1     | <i>Model 1</i> .....                          | 58        |
| 7.3.2     | <i>Model 2</i> .....                          | 59        |
| 7.3.3     | <i>Model 3</i> .....                          | 59        |
| 7.3.4     | <i>Model 4</i> .....                          | 60        |
| 7.3.5     | <i>Grafické porovnání</i> .....               | 60        |
| 7.4       | SHRNUTÍ.....                                  | 62        |
| <b>8.</b> | <b>ZÁVĚR.....</b>                             | <b>63</b> |
|           | <b>LITERATURA.....</b>                        | <b>64</b> |
|           | <b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>          | <b>67</b> |

# SEZNAM OBRÁZKŮ

|      |                                                                                    |    |
|------|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1-1  | Různé podoby sluneční energie [1].....                                             | 12 |
| 1-2  | Roční souhrn globálního slunečního záření v ČR [kWh/m <sup>2</sup> ] [4].....      | 13 |
| 1-3  | Difúzní a přímé záření v ČR [4] .....                                              | 14 |
| 2-1  | Princip funkce fotovoltaického článku [7].....                                     | 15 |
| 2-2  | Struktura křemíkového článku [11] .....                                            | 17 |
| 2-3  | Porovnání monokrystalického, polykrystalického a amorfního článku [6].....         | 18 |
| 2-4  | Konstrukce fotovoltaického panelu [10] .....                                       | 19 |
| 2-5  | Voltampérová charakteristika fotovoltaického článku .....                          | 20 |
| 2-6  | Vliv teploty na výkon fotovoltaického článku [3].....                              | 21 |
| 2-7  | Vliv intenzity slunečního záření na výkon fotovoltaického článku [3] .....         | 22 |
| 2-8  | Vírový defekt [17] .....                                                           | 23 |
| 2-9  | Pnutí v materiálu [17] .....                                                       | 23 |
| 2-10 | Nehomogenní difúzní vrstva [17] .....                                              | 24 |
| 2-11 | Delaminace fotovoltaického panelu [13].....                                        | 24 |
| 2-12 | Šnečí cestičky (Snailtrails) [13].....                                             | 25 |
| 2-13 | Detekování horkého místa [13].....                                                 | 26 |
| 2-14 | Potenciální indukovaná degradace (PID) [13] .....                                  | 27 |
| 3-1  | Vypálený fotovoltaický článek [20].....                                            | 28 |
| 3-2  | Metoda elektroluminiscence – panel bez defektů [21] .....                          | 29 |
| 3-3  | Metoda elektroluminiscence – panel s defekty [21].....                             | 30 |
| 3-4  | Snímek fotovoltaické elektrárny z dronu [20] .....                                 | 30 |
| 4-1  | Příklad rozostřeného snímku z termokamery.....                                     | 34 |
| 4-2  | Příklad zaostřeného snímku z termokamery .....                                     | 34 |
| 4-3  | Příklad zobrazení termokamery Hikmicro B20 [27] .....                              | 35 |
| 4-4  | Porovnání snímků s různou teplotní citlivostí [25] .....                           | 35 |
| 4-5  | Zobrazení vývoje cen vybraných modelů termokamer Hikmicro v letech 2021-2025 ..... | 37 |
| 5-1  | Zkoumané fotovoltaické moduly .....                                                | 39 |
| 5-2  | Termokamera Hikmicro Eco [28] .....                                                | 40 |
| 5-3  | Termokamera Hikmicro B20 [28].....                                                 | 40 |
| 5-4  | Termokamera Hikmicro M60 [28].....                                                 | 41 |
| 5-5  | Kontaktní teploměr TMD50 s čidlem TYP101.....                                      | 42 |
| 5-6  | Detekování hotspotů termokamerou Hikmicro M60 ze zadní strany .....                | 43 |
| 5-7  | Detekování hotspotů termokamerou Hikmicro M60 z přední strany .....                | 44 |
| 5-8  | Detekování hotspotů termokamerou Hikmicro B20 ze zadní strany .....                | 44 |
| 5-9  | Detekování hotspotů termokamerou Hikmicro B20 z přední strany .....                | 45 |
| 5-10 | Detekování hotspotů termokamerou Hikmicro Eco ze zadní strany .....                | 45 |
| 5-11 | Detekování hotspotů termokamerou Hikmicro Eco z přední strany.....                 | 46 |
| 5-12 | Hikmicro Analyzer – úvodní zobrazení.....                                          | 47 |
| 5-13 | Hikmicro Analyzer – prostředí pro analýzu.....                                     | 48 |
| 5-14 | Analýza snímku z termokamery Hikmicro M60.....                                     | 48 |
| 5-15 | Analýza snímku z termokamery Hikmicro B20.....                                     | 49 |
| 5-16 | Analýza snímku z termokamery Hikmicro Eco .....                                    | 50 |
| 6-1  | Snímek prvního panelu pomocí elektroluminiscenční metody .....                     | 51 |
| 6-2  | Snímek prasklin na některých článcích prvního panelu .....                         | 52 |
| 6-3  | Snímek druhého panelu pomocí elektroluminiscenční metody.....                      | 52 |
| 7-1  | Pohled na fotovoltaickou elektrárnu .....                                          | 54 |
| 7-2  | Výkon FVE v MWh v závislosti na čase.....                                          | 56 |
| 7-3  | Výnos z FVE v Kč v závislosti na čase.....                                         | 58 |
| 7-4  | Pokles výroby FVE v závislosti na čase.....                                        | 61 |
| 7-5  | Finanční výnos FVE v závislosti na čase .....                                      | 61 |
| 7-6  | Celkový finanční výnos FVE za analyzované období .....                             | 62 |

## SEZNAM TABULEK

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabulka 4-1 Příklad tabulky hodnot emisivity různých materiálů [24] .....             | 33 |
| Tabulka 4-2 Vývoj cen použitých termokamer Hikmicro v Kč .....                        | 38 |
| Tabulka 5-1 Vybrané parametry použitých termokamer Hikmicro.....                      | 41 |
| Tabulka 7-1 Naměřený výkon FVE za jednotlivé měsíce v MWh od uvedení do provozu ..... | 55 |
| Tabulka 7-2 Výnos z FVE za jednotlivé měsíce v Kč od uvedení do provozu .....         | 57 |
| Tabulka 7-3 Predikce bez poškození fotovoltaických panelů a poklesu výkonu .....      | 59 |
| Tabulka 7-4 Predikce s poškozením fotovoltaických panelů a poklesu výkonu o 10 %..... | 59 |
| Tabulka 7-5 Predikce s poškozením fotovoltaických panelů a poklesu výkonu o 20 %..... | 60 |
| Tabulka 7-6 Predikce s poškozením fotovoltaických panelů a poklesu výkonu o 30 %..... | 60 |

# ÚVOD

V posledních letech je kladen velký důraz na získávání elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Důvodem není pouze fakt, že neobnovitelných zdrojů není nekonečné množství, ale i požadavky ohledně snížení emisí vypouštěných při výrobě elektrické energie právě z těchto zdrojů (příkladem je uhlí). Celkově se klade také velký důraz na ochranu klimatu. Omezováním podílu těchto elektráren na celkové výrobě elektrické energie je samozřejmě nutné ji doplnit z jiných zdrojů.

Nejdiskutovanější jsou stále fotovoltaické elektrárny, které po několika letech znovu zažívají velký nárůst a zájem ze strany spotřebitelů. Konkrétně je velký zájem o umístění menších fotovoltaických elektráren na střechy převážně rodinných domů, což velmi přispěje k jejich vyšší soběstačnosti. Tento zvýšený zájem lze připisovat zejména nárůstu cen energií v posledních letech.

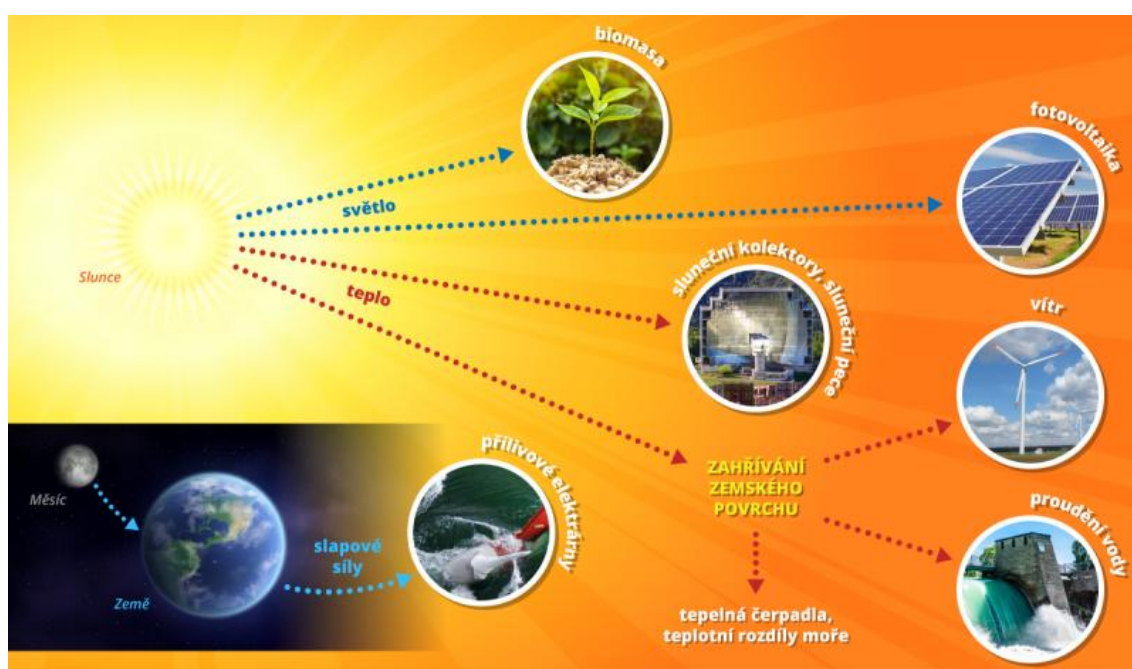
Důležitá je ale nejen výstavba nových elektráren, ale i kontrola a případná inovace již stávajících. Z toho důvodu narůstá i zájem o přístroje vhodné na proměření solárních panelů. Na tuto poptávku aktivně reagují i výrobci měřicí a testovací techniky, kteří představují nové i inovované přístroje. Běžný spotřebitel však hledá možnosti jednoduché kontroly bez nutnosti nákupu specializovaných zařízení. Jedná se pak především o přístroje informativního charakteru, kdy není potřeba získat přesné naměřené hodnoty. K tomuto účelu jsou stále více využívány termokamery, které rychle a nedestruktivně dokáží odhalit tepelné změny na fotovoltaických modulech.

Při vizuální kontrole fotovoltaických panelů nemusí být některé defekty na první pohled viditelné. Z toho důvodu se pro konkrétní určení mohou využít další diagnostické metody. Zde byla použita metoda elektroluminiscence u které je ovšem potřeba analyzovaný panel odmontovat a převést jej do laboratoře disponující potřebnou technikou a temnou místností. Při posuzování je nezbytné rozlišovat defekty vzniklé při výrobě, následné manipulaci a vlivem klimatických podmínek.

V rámci této diplomové práce jsou tedy nejdříve představeny různé defekty solárních článků. Analyzovaná fotovoltaická elektrárna byla vybrána z důvodu jejího sníženého výkonu v posledních letech. Je zde provedena diagnostika fotovoltaických panelů pomocí vybraných termokamer společnosti Hikmicro. Následně je provedena diagnostika pomocí elektroluminiscenční metody pro určení konkrétních defektů. V poslední části je vytvořena výkonová a finanční analýza na základě změřených dat a predikce jejich vývoje v budoucnosti.

# 1. ENERGIE SLUNCE

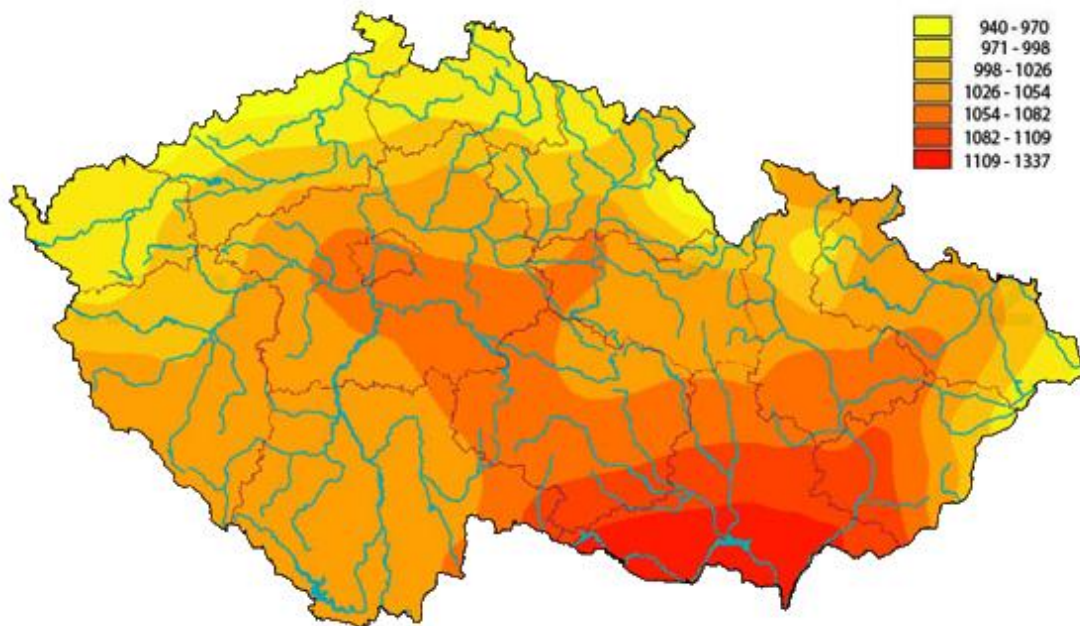
Klíčovým zdrojem energie pro celou naši planetu je energie ze Slunce. Můžeme proto říci, že téměř veškerá energie využívaná lidstvem pochází právě ze Slunce. Ovšem tato energie má mnoho forem a podob jak je patrné z Obrázku 1-1. Díky slunečnímu teplu dochází k vypařování vody, dešťové srážky z mraků naplní řeky a přehradní nádrže vodních elektráren. Dochází tedy k neustálému koloběhu vody na Zemi. Ohříváním zemského povrchu a atmosféry zase vznikají vrstvy s různou teplotou, hustotou a tlakem. Vyrovnáváním atmosférického tlaku vzniká vítr, který roztáčí vrtuli připojenou ke generátoru větrné elektrárny. Sluneční záření potřebují také rostliny ke svému růstu. Vzniklá rostlinná hmota, nebo odpadní produkty živočichů se nazývají biomasa. Z biomasy se následně vyrábí pevná, kapalná nebo plynná biopaliva. [1][2]



Obrázek 1-1 Různé podoby sluneční energie [1]

Energie ze slunečního záření je ovlivněná různými faktory, jako je roční období, počasí nebo geografická poloha. Z hlediska využití jsou nejpodstatnějšími faktory - počet hodin slunečního svitu a intenzita záření. V České republice mohou v některých oblastech hodnoty dosahovat až  $1140 \text{ kWh/m}^2$ . Roční záření v nejvíce slunných krajinách Země přesahuje hodnoty  $2200 \text{ kWh/m}^2$ . [3]

Vhodnost možných lokalit nejlépe prezentuje Obrázek 1-2, který představuje globální sluneční záření. Tyto údaje jsou na základě dlouhodobého meteorologického měření. V České republice dopadne na jeden  $\text{m}^2$  přibližně  $950 - 1340 \text{ kWh}$ .

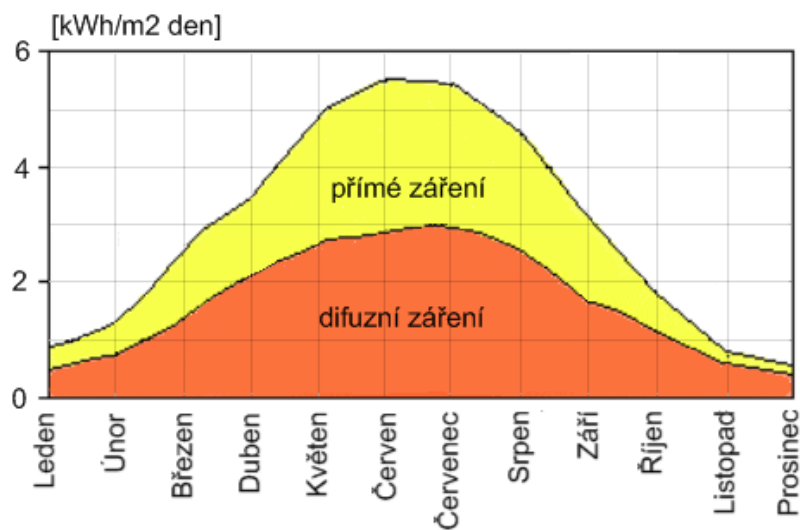


Obrázek 1-2 Roční souhrn globálního slunečního záření v ČR [ $\text{kWh/m}^2$ ] [4]

Roční souhrn slunečního záření je důležitý údaj při hodnocení energetické bilance a také výpočtu návratnosti investice. Když totiž známe roční hodnotu dopadajícího slunečního záření na plochu fotovoltaického systému ( $\text{m}^2$ ) s konverzní účinností fotovoltaického panelu (14 %), můžeme určit roční množství vyrobené elektrické energie jako přibližně 133-188kWh. [4][5]

## 1.1 Difuzní a přímé záření

V případě jasné oblohy bez mraků dopadá na Zemi největší část slunečního záření a to bez změny směru. Jedná se o tzv. přímé záření. Pokud se přímé záření rozptýlí v mracích a v atmosféře, jedná se pak o záření difúzní. Toto záření, které jde ze všech směrů, je závislé na klimatických a geografických podmínkách. Globální sluneční záření je pak součtem těchto dvou záření na horizontálním zemském povrchu (Obrázek 1-3). Na Obrázku 1-3 je zřejmý podíl přímého a difúzního záření v jednotlivých částech roku. Zatímco v období letních měsíců mají obě záření přibližně stejný podíl, v zimním období je patrný vyšší podíl záření difúzního. [4][6]



Obrázek 1-3 Difúzní a přímé záření v ČR [4]

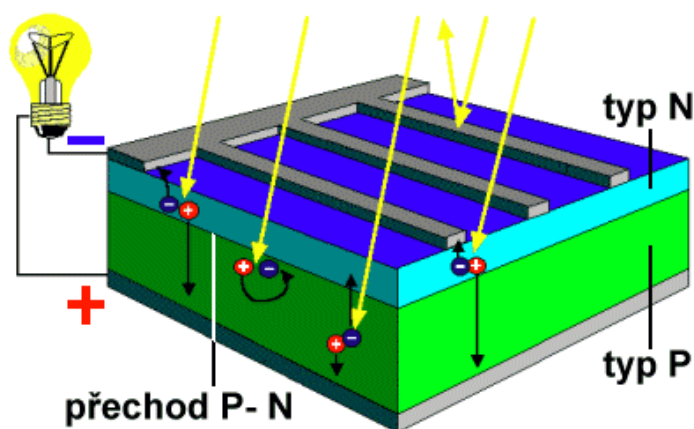
U fotovoltaických panelů složených z polykrystalických nebo monokrystalických fotovoltaických článků potřebujeme k dosažení maximální výtěžnosti především záření přímé tzn. přímé sluneční světlo. Fotovoltaické panely vyrobené na bázi amorfního křemíku tzv. tenkovrstvé, dokáží zužitkovat i difúzní záření. I přesto vyrobí tyto panely méně energie než panely z monokrystalických nebo polykrystalických křemíkových článků (v rámci ročního souhrnu). Tenkovrstvé články mají velikou výhodu zejména v období zimních měsíců kvůli zužitkování i nízkého slunečního světla. [4][6]

## 2. FOTOVOLTAICKÉ ČLÁNKY A MODULY

Základní prvek fotovoltaických panelů je fotovoltaický článek, jehož fyzikální podstatou je fotoelektrický jev. Jedná se vlastně o polovodičovou diodu, která je schopná přeměňovat světlo na elektrickou energii. Základem je tenký plátek křemíku, který je dopován dalšími prvky. Pomocí fotovoltaického jevu je tento článek schopný přeměnit dopadající sluneční záření na elektrický proud. [3][4][7]

### 2.1 Fotovoltaický jev

Alexandr Edmond Becquerel objevil v roce 1893 fotovoltaický jev, který umožnil využití světla (jeho částic - fotonů) k přeměně na elektrickou energii. Základem solárního článku je křemíková destička s vodivostí typu P (s příměsí bóru). Na horní ploše této destičky se při výrobě vytváří tenká vrstva polovodiče typu N. Tato vrstva obsahuje sítotiskem vytvořené úzké vodivé kontakty. Jelikož ve vrstvě typu N se nachází přebytek záporných elektronů a ve vrstvě typu P jejich nedostatek, vzniká mezi oběma vrstvami P-N přechod. Tento přechod je vlastně elektrická bariéra, která zabraňuje volnému přechodu elektronů z místa jejich nadbytku do místa, kde je jejich nedostatek. Což znamená, že volné elektrony mohou snadno přecházet z vrstvy P do vrstvy N, ale v opačném směru nikoliv.



Obrázek 2-1 Princip funkce fotovoltaického článku [7]

Dopadne-li světlo na povrch fotočlánku, energie fotonů je předána atomům v krystalové mřížce křemíku a uvolňují se z ní elektrony. V případě, že by zde nebyla bariéra přechodu P-N mezi vrstvami, elektrony by volně přecházely z místa přebytku na místo nedostatku a fotočlánek by se nemohl stát zdrojem napětí. Díky P-N přechodu se tak neděje a elektrony v horní vrstvě (typ N) nemohou přecházet do vrstvy spodní (typ P). Opačným směrem je to však umožněno, proto se počet elektronů ve vrstvě N stále zvyšuje. Nahromaděním volných elektronů vznikne mezi spodní a horní vrstvou elektrické napětí (přibližně 0,6 V). V článku se energie dopadajícího světla mění na

elektrickou energii. Když připojíme k článku nějaký spotřebič, kladné a záporné náboje se začnou vyrovnávat a obvodem začíná procházet elektrický proud. [3][7][8]

## 2.2 Druhy fotovoltaických článků

V dnešní době je většina fotovoltaických článků vyrobena z krystalického křemíku. Hlavní příčinou jsou již známé a zaběhnuté technologie výroby. Samozřejmě je zde ale stále snaha o zlevnění výroby a vyvíjení nových materiálů a technologií. Příkladem jsou tenkovrstvé články, které umožňují výrobu vícevrstevných článků. [9]

### 2.2.1 Křemíkové články monokrystalické

Základní a nejstarší typ fotovoltaických článků. Vyrábí se z polykrystalického křemíku pomocí Czochralského metody. Tedy pomalým tažením zárodka krystalu z taveniny velmi čistého křemíku. Tato metoda začíná být v dnešní době ekonomicky méně výhodná. Proto díky snaze o zdokonalování technologie tažení monokrystalů a především hromadné zavedení technologie kontinuálního tažení se snižují náklady a je umožněno vyrábět stále větší rozměry destiček.

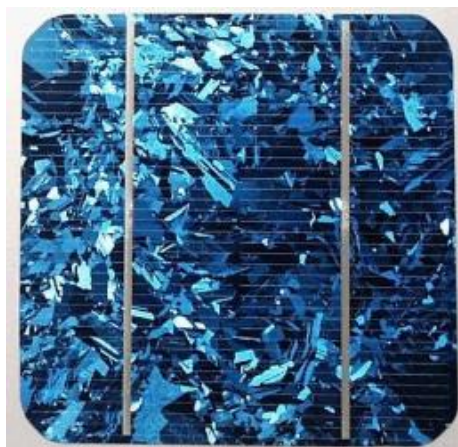
Tyče monokrystalického křemíku se rozřezou pomocí drátové pily, což je několik větších paralelně napnutých drátů. Alternativou k ocelovému drátu je použití drátu diamantového spolu s chladicí kapalinou. To by umožnilo mnohem vyšší rychlost řezání ingotu. Nařezané plátky byly silné přibližně 0,25 – 0,35 mm, ale je možné vyrábět i články o tloušťce pouze 0,1 mm. PN přechod je vytvořen po celé ploše destičky difuzí fosforu, který vytvoří vrstvu s vodivostí typu N.

Velmi podstatným faktorem u výroby fotovoltaických článků je nalezení optimální rovnováhy mezi snahou o co nejhustější pokrytí a eliminaci negativních dopadů možných prasklin článku. V současné době je tloušťka destiček obvykle do 180  $\mu\text{m}$ . Výhodou monokrystalických článků je velmi dobrá odolnost proti povětrnostním podmínkám, trvanlivost a účinnost. [9][10][11]

### 2.2.2 Křemíkové články polykrystalické

Jedná se o nejběžnější typ fotovoltaického článku. Proces výroby je velmi podobný jako u monokrystalických článků. Vyrábí se odléváním čistého křemíku do vhodných forem a nařezáním takto vzniklých tyčí. Odlévání je na rozdíl od tažení podstatně jednodušší a je možné připravit i bloky se čtvercovým nebo obdélníkovým průřezem. Při vytváření P-N přechodu pomocí difúze fosforu se zde, na rozdíl od monokrystalických článků, musí použít nižší teplota, kvůli možnosti zhoršení parametrů materiálu při teplotách nad 900  $^{\circ}\text{C}$ .

Takto vyrobené články mají o trochu horší elektrické vlastnosti (účinnost a nižší proud), jelikož se na styku jednotlivých krystalických zrn vyskytuje vyšší odpor. Účinnost těchto článků je nižší než u monokrystalických. Výhodou u nich ale je, jejich ideálnost pro nízké sluneční světlo. Z toho důvodu jsou u nás používané nejčastěji. [9][10][11]



Obrázek 2-2 Struktura křemíkového článku [11]

### 2.2.3 Tenkovrstvé články

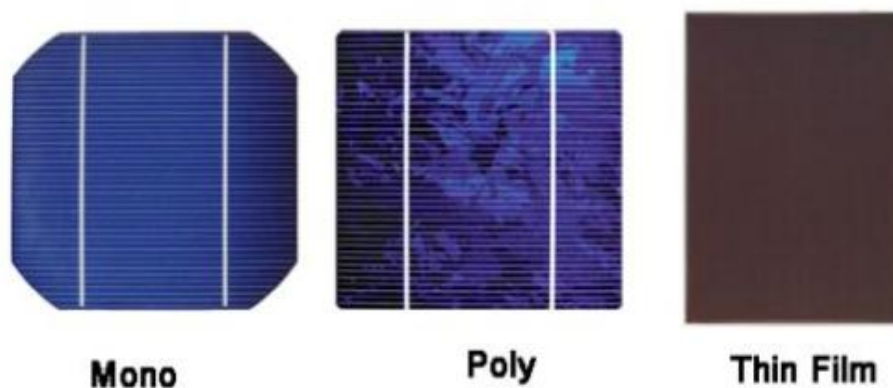
Tenkovrstvé fotovoltaické články byly vyvinuty za účelem úspory materiálu a nákladů. Při výrobě jsou nanášeny slabé vrstvy na podklad ze skla nebo fólie. Tyto články mají oproti krystalickým lepší vlastnosti při nízkých úrovních ozáření a také stojí méně. V rámci ročního výnosu mohou dosahovat vyšších hodnot, zvláště při difúzním ozařování. Ačkoliv výroba tenkovrstvých článků je levnější, cena celého fotovoltaického panelu může být vzhledem na prostorovou náročnost výroby vyšší. [9]

#### **Amorfní křemík**

Můžeme jej nazvat křemíkem v neuspořádané formě z důvodu jeho neperiodické struktury v celém objemu krystalu. Oproti monokrystalickým a polykrystalickým článkům je zde spotřeba materiálu na výrobu podstatně nižší. To má za následek že i cena tohoto článku je nízká. Pro výrobu se využívá rozkladu vhodných sloučenin křemíku ve vodíkové atmosféře. Pomocí této metody je možné připravit velice tenké vrstvy křemíku na podkladu z fólie nebo ze skla.

Tyto vrstvy křemíku, jak bylo již zmíněno nemají pravidelnou strukturu, obsahují určité množství vodíku a také větší množství poruch. Protože některé atomy křemíku nevytvoří vazby, vznikají tak nenasycené vazby. Ty vytvářejí energetické hladiny v pseudozakázaném pásu. Nižší účinnost je způsobena vlivem rekombinačních center.[9][10][11]

Rozdíl mezi monokrystalickým, polykrystalickým a amorfním článkem je i dobře viditelná. O čemž je možné se přesvědčit na Obrázku 2-3.



Obrázek 2-3 Porovnání monokrystalického, polykrystalického a amorfního článku [6]

### **CIGS články**

Varianta pevných, tenkých a ohebných článků, které obsahují měď, indium, galium a selen. Jednotlivé vrstvy článku jsou nanášeny pomocí napařovací technologie. Jednou z hlavních výhod je schopnost reagovat na červenou složku světla, která převládá při mlze nebo zatažené obloze. Tato schopnost je velkou výhodou v oblastech s typickým počasím pro střední Evropu.

V případě fotovoltaických CIGS článků se nejčastěji využívají polovodiče ve formě polykrystalické tenké vrstvy. Na rozdíl od křemíku, který světlo absorbuje až hluboko v objemu, CIGS zachytí až 95 % dopadajícího záření již v prvním mikrometru materiálu pod povrchem. Článek může být jako heteropřechod obsahující vrstvu CdS sloužící jako polovodič typu N. Může být však použit i jako heteropřechod obsahující pouze CIGS polovodič, a přímo na něj nanést průhlednou elektrodu (katodu). Díky této vlastnosti je možné vyrábět velmi tenké fotovoltaické články. Obě struktury pak jsou umístěné na podložce z molybdenem pokrytého skla, nerezové oceli nebo hliníku, která tvoří anodu. [12][13]

### **Perovskité články**

Perovskit se na Zemi vyskytuje v podobě tvrdého minerálu. V roce 2009, kdy byla představena technologie s jeho využitím, dosahovaly tyto články účinnosti kolem 4 %. Po čtyřech letech se podařilo účinnost navýšit na 15 %. Stále to ale byla skoro poloviční hodnota, které bylo třeba dosáhnout, aby se mohlo mluvit o srovnání s křemíkovými panely. Nicméně tyto články zaujaly mnoho vědců, kteří vidí příležitost ve výzkumu a zdokonalení přípravy a postupů výroby perovskitů.

Nanáší se pouze slabá vrstva perovskitu, která se nastříká a následně proběhne žihání. Hlavní předností je vysoký absorpční koeficient, což znamená, že tento materiál absorbuje celé viditelné sluneční spektrum. Tyto články tedy mohou být mnohem tenčí, levnější, účinnější, lehké a i ekologické řešení. Navíc v kombinaci s křemíkovými články mohou vzniknout tandemové (hybridní) panely.

Stále se ovšem jedná o články ve výzkumu, které mají ještě mnoho nedostatků a z pohledu životnosti ještě zdaleka nedosahují úrovně článků křemíkových.[10][14]

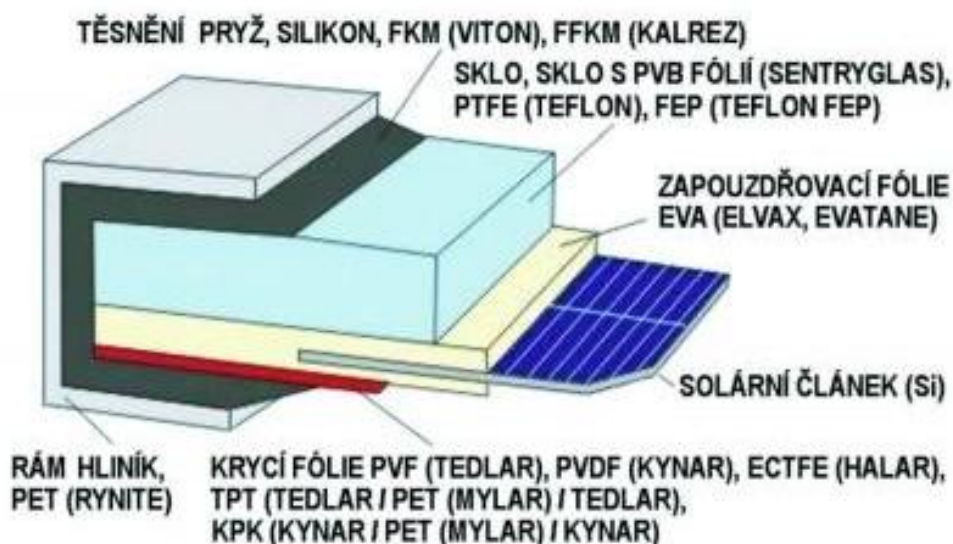
## 2.3 Fotovoltaické moduly

Fotovoltaické články jsou velice citlivá zařízení, proto aby plnily svou funkci po řadu let se zapouzdřují do fotovoltaických modulů (panelů). Díky tomuto zapouzdření jsou články následně chráněny před nepříznivými okolními vlivy jako jsou kroupy, koroze, mechanické poškození, znečištění apod.

### 2.3.1 Konstrukce

Do fotovoltaických modulů (panelů) se skládají jednotlivé články v sérioparalelní kombinaci, aby pro definované osvětlení poskytly požadované stejnosměrné napětí a výkon. Maximální výkon závisí především na celkové ploše fotovoltaického panelu.

Nejčastější konstrukce panelů je vyráběna následovně (Obrázek 2-4). Na přední straně panelu je temperované (kalené) sklo, které je velmi odolné vůči nárazu, odolá dokonce i celkem velkým kroupám. Na sklo se pokládá plastová etylvinylacetátová fólie (EVA) a na ni se skládají propojené fotovoltaické články. Přes tyto články se znovu pokládá plastová EVA fólie. Zadní stěnu nejčastěji tvoří laminátová kompozice PFV-PET-PFV (polyvinylidenfluorid-polyetyléntereftalát-polyvinylidenfluorid). Poté proběhne vyčerpání vzduchu mezi těmito vrstvami a následné zahřátí panelu nad teplotu tání EVA fólie. Etylvinylacetát se po teplotním zpracování rozteče a zalije fotovoltaické články v prostoru mezi zadní laminátovou stěnou a předním sklem panelu. Posledním krokem je zarámování panelů a zatmelení pomocí silikonového tmelu do hliníkových profilů a opatření krabicí s výstupními kontakty. Hotové panely jsou tak utěsněny proti vodě či jiným nečistotám a fotovoltaické články jsou zapouzdřeny v měkké hmotě, aby při mechanickém namáhání nepopraskaly (například díky silnému větru).[15][16]

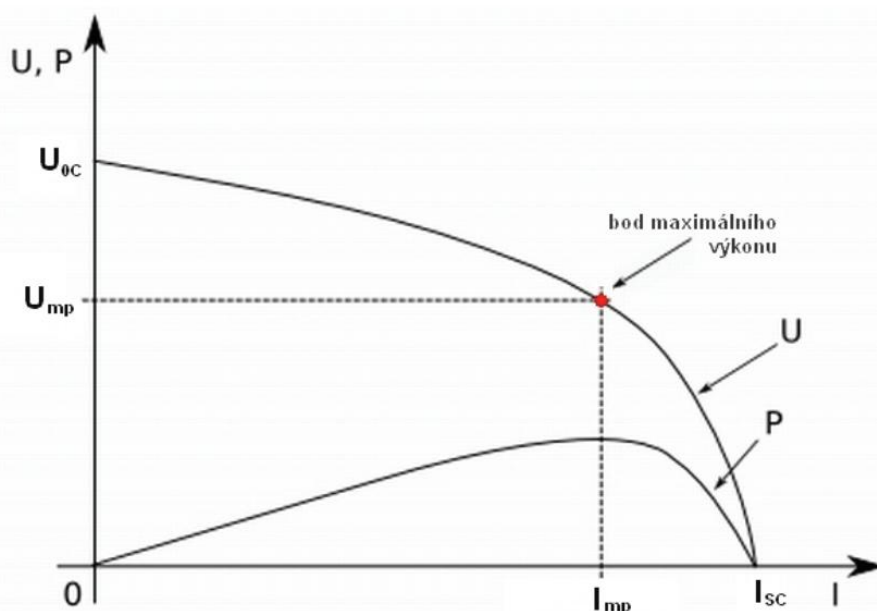


Obrázek 2-4 Konstrukce fotovoltaického panelu [10]

Životnost fotovoltaických panelů se běžně pohybuje v rozmezí 25-35 let. Panel v průběhu času ztrácí na své účinnosti. Jedná se ovšem o malou ztrátu o cca 0,3 % ročně, což nemá významný vliv na výnosy z fotovoltaické elektrárny. Obvykle se po dvanácti letech provozu garantuje účinnost 90 % (panel starý 25 let by měl mít účinnost stále nad 80 %). Fotovoltaické panely jsou zařízení v podstatě bezúdržbové. Je ovšem doporučeno provádět alespoň kontrolu znečištění panelů. V případě, že je panel znečištěn nebo zakryt (například vrstvou sněhu) je výnos celého systému výrazně snížený. [10][15]

### 2.3.2 Voltampérová charakteristika

Jako základní informace o činnosti solárních článků je voltampérová charakteristika. Jak lze spatřit na Obrázku 2-5 jsou hraničními veličinami na této charakteristice napětí naprázdno ( $U_{0C}$ ) a proud nakrátko ( $I_{SC}$ ). Maximální napětí na článku představuje právě napětí na prázdně, kterého je možno dosáhnout pokud není ke článku připojen žádný spotřebič. Proud nakrátko pak představuje maximální (zkratový) proud, jenž může být dodáván při dané intenzitě slunečního záření. [3]



Obrázek 2-5 Voltampérová charakteristika fotovoltaického článku

Výkon článku je určen jako součin napětí a proudu. Každý článek má pracovní bod na charakteristice, kde je jeho nejvyšší výkon. Tento bod označujeme MPP (o určitém napětí  $U_{mp}$  a proudu  $I_{mp}$ ). Výkon  $P$  tohoto určitého článku pak záleží na ozáření, spektru světla a teplotě článku. Je dán vztahem

$$P = U_{mp} \cdot I_{mp} , \quad (2.1)$$

Charakteristické provozní hodnoty fotovoltaického článku jsou činitel plnění FF a účinnost  $\eta$ . Činitel plnění je dán jako podíl maximálního výkonu v bodu MPP a maximálního výkonu definovaného pomocí maximálního napětí a maximálního proudu. Můžeme tedy napsat rovnici

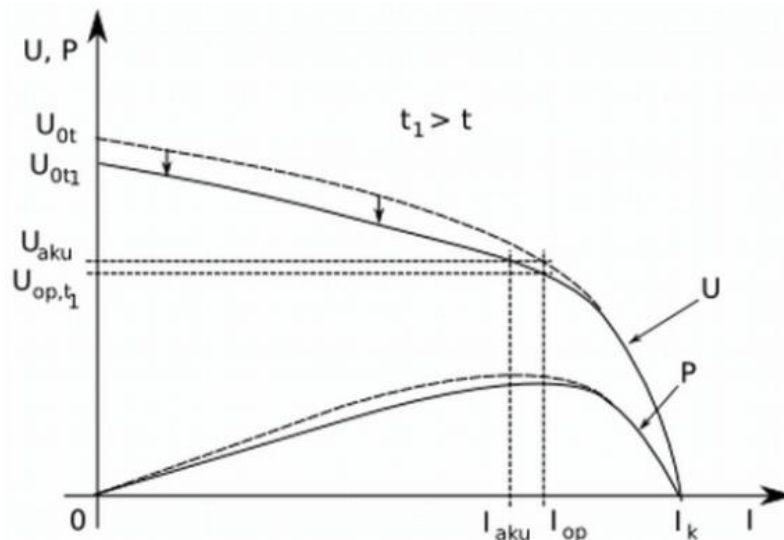
$$FF = \frac{U_{mp} \cdot I_{mp}}{U_{oc} \cdot I_{sc}}, \quad (2.2)$$

Účinnost solárního článku můžeme definovat pomocí rovnice (2.3). Z této rovnice je patrné, že účinnost je dána jako podíl maximálního výkonu článku v bodu MPP a výkonu dopadajícího slunečního záření ( $P_{in}$ ).

$$\eta = \frac{U_{mp} \cdot I_{mp}}{P_{in}}, \quad (2.3)$$

Výše uvedené charakteristické ukazatele jsou určeny za standardních testovacích podmínek, tedy při intenzitě slunečního záření  $I = 1000 \text{ W.m}^{-2}$ , standardní testovací teplotě STC = 25°C, a definované vzduchové hmotě (Air Mass) AM = 1,5. Průběh charakteristiky ovlivňuje především teplota a hodnota intenzity slunečního záření.

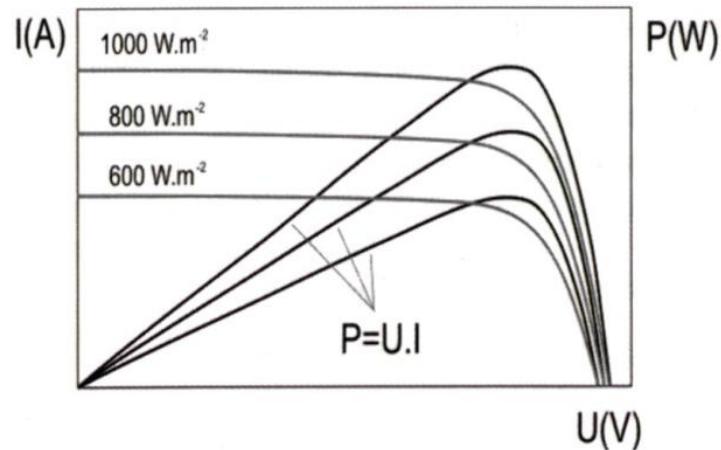
Důležité je, že vlivem zvýšené teploty klesne napětí naprázdno. Při delší sluneční intenzitě nebo zhoršených podmínkách chlazení článku, dojde ke zvýšení povrchové teploty. Při vysokých teplotách následně dojde ke změně elektrických vlastností článku. To vede ke snížení zatěžovací charakteristiky směrem k nižšímu napětí Obrázek 2-6. [3]



Obrázek 2-6 Vliv teploty na výkon fotovoltaického článku [3]

Účinnost fotovoltaických článků je závislá na intenzitě dopadajícího záření a velikosti paralelního a sériového odporu. Pokud bude sériový odpor  $R_s$  malý, pak výkon

článků s rostoucí intenzitou záření poroste, dosáhne maxima a až při velkých intenzitách záření začne klesat. Při velkém sériovém odporu výkon článků s rostoucí intenzitou záření klesá (tento efekt můžeme pozorovat převážně u tenkovrstvých fotovoltaických článků). Průběhy závislosti výkonu fotovoltaických článků na intenzitě slunečního záření lze spatřit na obrázku 2-7. [3]



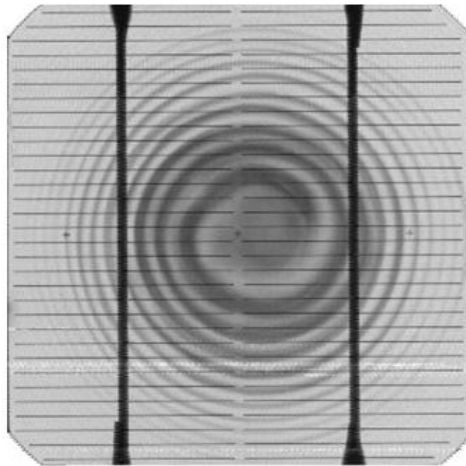
Obrázek 2-7 Vliv intenzity slunečního záření na výkon fotovoltaického článku [3]

## 2.4 Defekty fotovoltaických článků a modulů

K defektům může dojít již při výrobě, nesprávné manipulaci nebo instalaci. Je možné se jim vyvarovat pokud bude dodržen pracovní postup. Zároveň ale mohou také vzniknout v průběhu života článku degradací fotovodivé vrstvy. Defekty fotovoltaických článků určíme podle odchylky od stanoveného intervalu požadovaných vlastností. Zároveň ale defekt nemusí nutně znamenat nefunkčnost panelu.

### 2.4.1 Vírový defekt

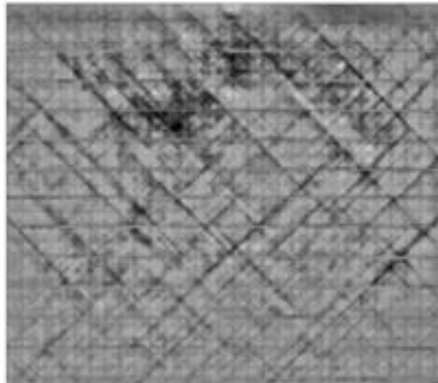
Jedná se o nejčastější materiálový defekt vznikající již při výrobě monokrystalického křemíku. A to z důvodu vnikání příměsí do křemenného ingotu během Czochralského metody (Obrázek 2-8). U tohoto defektu dochází ke znehodnocení veškerého materiálu.



Obrázek 2-8 Vírový defekt [17]

#### 2.4.2 Vnitřní pnutí v materiálu

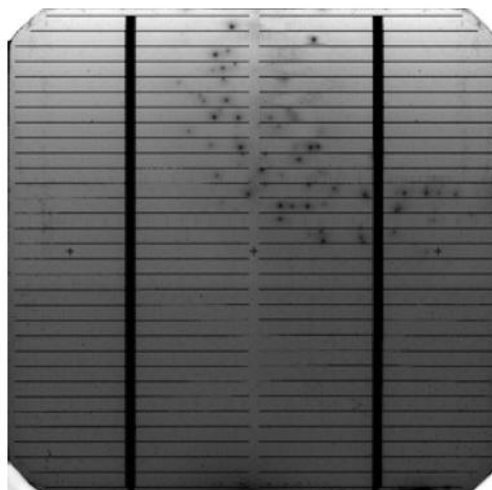
Pnutí materiálu také vzniká při výrobě. Tento defekt je způsoben špatným technologickým postupem tzn. špatné tažení u Czochralského metody.



Obrázek 2-9 Pnutí v materiálu [17]

#### 2.4.3 Nehomogenní difúzní vrstva

Ke vzniku tohoto defektu dochází při výrobě článků a to konkrétně v průběhu difúze, kdy se vytváří vrstva typu N. Může být způsoben například vnikajícími nečistotami.



Obrázek 2-10 Nehomogenní difúzní vrstva [17]

#### 2.4.4 Mechanické poškození

Pod pojmem mechanické poškození se skrývá mnoho možností. Dochází k nim nejčastěji při nesprávné manipulaci. Mezi nejčastější poškození patří poškrábání, praskliny a mikropraskliny, skrytý lom, neobroušené hrany nebo odštípnutí části článku.[17][18]

#### 2.4.5 Delaminace fotovoltaického panelu

K této závadě může dojít v důsledku špatné přilnavosti EVA fólie nebo špatných postupů čištění skla během výrobního procesu. Projevuje se oddělením jednotlivých vrstev, hlavně EVA fólie od fotovoltaických článků a tvrzeného skla. Následkem je vznik dutin a bublin mezi jednotlivými vrstvami panelu. Může se jednat o závažnou poruchu, pokud se vyskytne mezi rámem a články, jelikož působením vody s chloridy dojde k vyplnění vzniklých dutin a následně nesprávné funkčnosti fotovoltaického panelu.



Obrázek 2-11 Delaminace fotovoltaického panelu [13]

#### 2.4.6 Šnečí cestičky (Snailtrails)

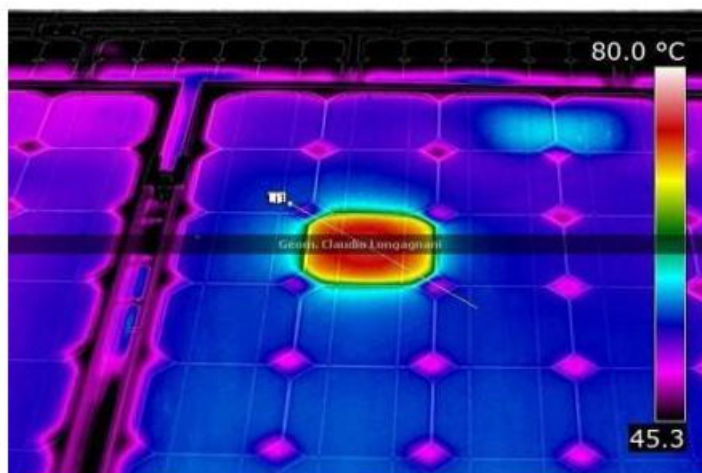
U tohoto defektu se na povrchu fotovoltaických článků (pod krycím sklem a laminační vrstvou) začne objevovat zabarvení, které vypadá jako náhodné cestičky. Takzvané „šnečí cestičky“ jsou obvykle vidět na více článcích v panelu. Většina zasažených panelů pochází z období kolem roku 2010. Tvar těchto prasklin se liší dle typu článku (monokrystal, polykrystal, článek se zkosenými rohy atd.). Mechanismus vzniku těchto prasklin je v současné době již prokázán. Na hranách praskliny dochází k fotochemické reakci stříbrné pasty, která tvoří sběrníkový systém PV článku. Praskliny jsou na začátku velmi jemné a nelze je vidět pouhým okem. V případě kdy dojde k vizualizaci těchto „cestiček“ a jejich dalšímu šíření, může dojít k nevratnému poškození. [18][19]



Obrázek 2-12 Šnečí cestičky (Snailtrails) [13]

#### 2.4.7 Hot spots

Jako častý defekt se považuje i vznik horkých míst (tzv. hot spots). Tyto oblasti se objevují v místech defektů krystalické mříže fotovoltaických článků. Důsledkem toho se tyto poškozená místa mohou velmi zahřívat. Pokud je teplotní rozdíl mezi místy 60 °C a více, jedná se již o závažný problém, který může vyústit ve zničení článku a celého fotovoltaického panelu. Výskyt hot spotů je v dnešní době stále velmi rozšířený.



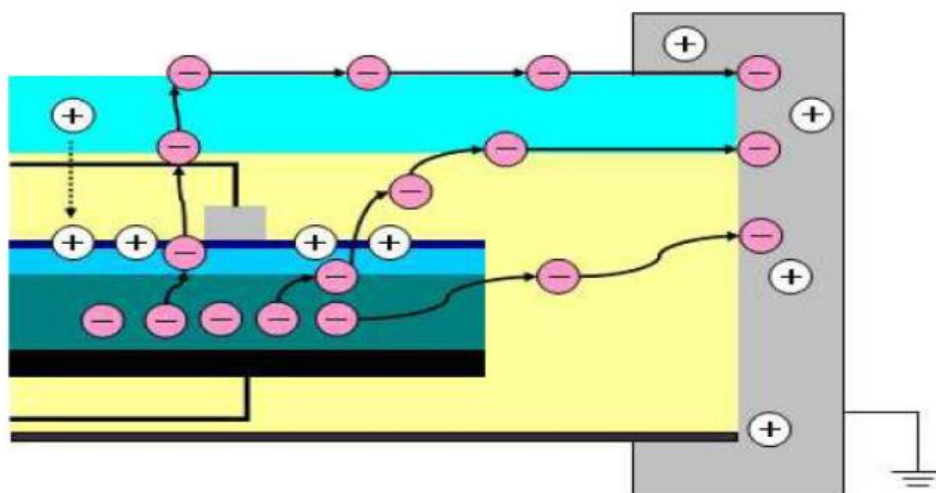
Obrázek 2-13 Detekování horkého místa [13]

#### 2.4.8 PID – Potenciální indukovaná degradace

Potenciálem indukované degradace (PID) jsou stále vážnou hrozbou. V minulosti nešlo o tak známý problém, avšak s větším zájmem o fotovoltaické elektrárny získal na závažnosti. Tento jev se také nazývá jako vysokonapěťový stres. Jde o fyzikální jev, který způsobuje pokles výkonu bez známé příčiny. Celý jev závisí na pozici panelu ve stringu, kde je u záporného pólu přibližně 250 - 400 V, ale rámy panelů mají díky uzemnění 0 V. Díky tomu začínají vznikat svodové proudy, které po sobě zanechávají polarizaci a tím mohou negativně ovlivnit voltampérovou charakteristiku.

V laboratorních podmínkách není detekování PID díky zrychleným procesům složité. Ovšem za normálních podmínek se potenciálem indukovaná degradace nemusí odhalit. Především to je z důvodu, že v běžných podmínkách dochází k degradaci mnohem pomaleji a prováděná kontrola tak nemusí tento defekt odhalit.

Jednou z možných ochran proti PID je pravidelná výměna pozice modulů ve stringu. Tento způsob je ovšem celkem náročný a i nákladný. Další možností je v případě, kdy systém nevyrábí jev odpojit od měniče a mezi uzemněný rám a články v modulech zapojit zdroj napětí s polaritou, která způsobí drift iontů opačným směrem než je tomu při PID. [9][13][18]



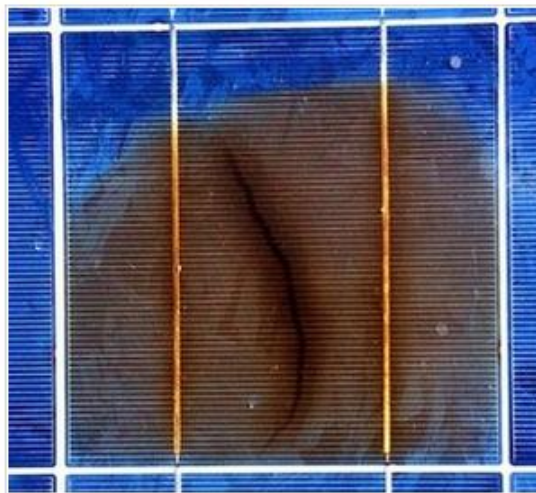
Obrázek 2-14 Potenciální indukovaná degradace (PID) [13]

### 3. METODY DIAGNOSTIKY MODULŮ

Jelikož je fotovoltaický modul (panel) tou nejdůležitější částí fotovoltaické elektrárny, závisí na jeho kvalitě celá produkce. Z toho důvodu je důležitý přehled o stavu panelů a jejich případných závadách.

#### 3.1 Vizuální kontrola

Jedná se o nejjednodušší (a také nejlevnější) způsob kontroly fotovoltaických panelů. Pouze takto jednoduchou metodou lze odhalit velkou část defektů fotovoltaických panelů, jako například delaminaci, šnečí cestičky nebo zežloutnutí EVA fólie. Pomocí vizuální kontroly lze odhalit i závady, které mnohem sofistikovanější metody nejsou schopné určit (například uvolněný hák, jehož absence by mohla za silnějšího větru vést k uvolnění fotovoltaického modulu).



Obrázek 3-1 Vypálený fotovoltaický článek [20]

Nejčastěji nalezenou závadou jsou šnečí cestičky, které jsou zmíněné v předcházející kapitole. Vyhledání tohoto defektu je možné jen u panelů, které mají zadní stranu pouze z jedné vrstvy PET. Panely s mezivrstvou PTFE lépe odolávají pronikání vlhkosti do panelu a nedochází tak k vytvoření šnečích cestiček.

Pokud u článku vlivem praskliny dojde k pohybu prasklých segmentů, může nastat kvůli vzrůstajícímu přechodovému odporu zahřívání. To může dosáhnout až takové teploty že dojde k vypálení daného článku a k prasknutí předního skla. [20]

#### 3.2 LBIC metoda

LBIC (Light Beam Inducted Current) metoda je jedna z nejrozšířenějších metod pro diagnostiku. Využívá se zde svazku světelného záření vycházejícího z LED diody nebo z laseru. Tento zdroj se pohybuje těsně nad povrchem zkoumaného článku na který je zaostřený světelný svazek.

V případě, že je ozářeno místo s defektem, zaznamenáme prudký pokles výstupního proudu z článku. Tímto způsobem je vytvořena tzv proudová mapa, která představuje model chování vzorku v jeho jednotlivých částech. Díky spektru světelného zdroje, které ovlivňuje hloubku vniku záření do článku, je možné nalézt defekty v různých vrstvách.

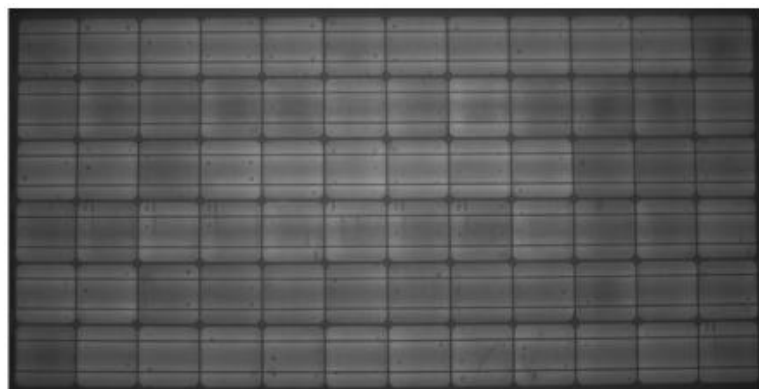
Přesnost a zároveň i správnost proudových map závisí na použitém zdroji záření, tedy na hloubce vniku záření do vzorku. Důležitý je i krok s jakým je vzorek skenován. Z toho vyplývá nevýhoda této metody, protože pro dosažení dostatečně hustých proudových map může měření trvat i několik hodin. [13][21]

### 3.3 Elektroluminiscence

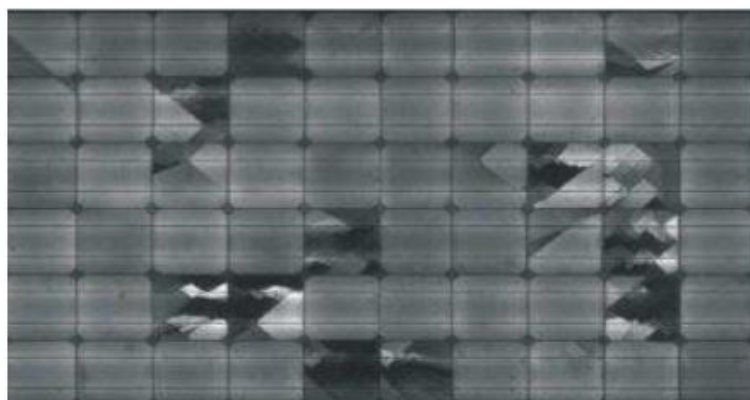
Tato metoda testování odhaluje přítomnost procesních a materiálových vad fotovoltaických panelů, které vznikly při výrobě nebo následné manipulaci. Elektroluminiscence je světelná emise záření vznikající při zářivé rekombinaci křemíku. Princip je na základě recipročních schopností článku z hlediska jeho funkce jako plošné polovodičové diody.

Článek tedy dokáže přeměnit světelnou energii na elektrickou a i elektrickou energii na světelnou. Po připojení článku ke zdroji v propustném směru začne narůstat energie mezi vodivostními pásy. Při překročení energetické hladiny nastává emise světelného záření z povrchu fotovoltaického článku. Záření se následně detekuje pomocí CCD kamery pro snímání obrazu a převádí se pomocí vhodného zařízení do viditelného spektra.

Defekty takto zkoumaného materiálu se projevují jako místa emitující malou nebo žádnou hodnotu záření. Nevýhodou této metody je nutnost temného prostředí kvůli rekombinaci elektronů. Z toho důvodu jsou nutné laboratorní podmínky.



Obrázek 3-2 Metoda elektroluminiscence – panel bez defektů [21]



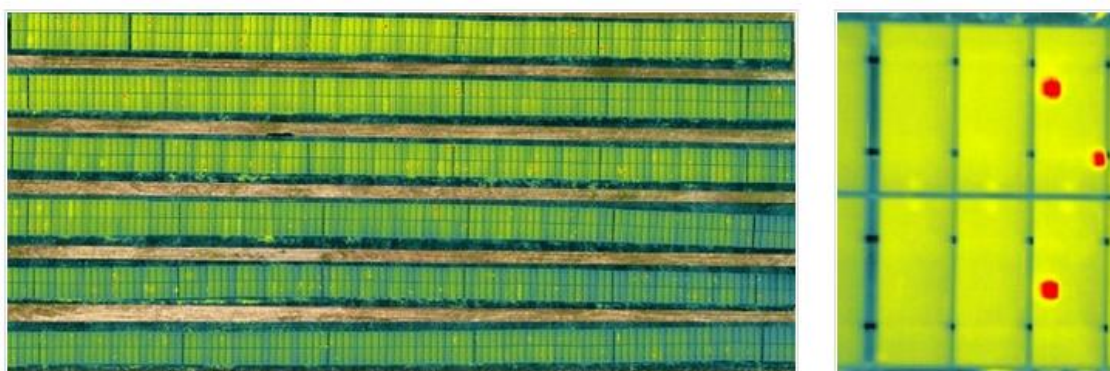
Obrázek 3-3 Metoda elektroluminiscence – panel s defekty [21]

Uvedené obrázky představují rozdíl mezi panelem bez defektů a panelem s defekty odhalenými pomocí metody elektroluminiscence. [13][21]

### 3.4 Termografie

Termografické měření je v poslední době stále více populární. Rozšířilo se nejen mezi majiteli velkých fotovoltaických parků, ale využívají tuto metodu i majitelé malých střešních instalací. Jedná se o rychlou metodu detekce vadného modulu a zajištění lepšího provozu fotovoltaických elektráren. Především zde není nutnost demontáže a přemístění panelů do laboratorních podmínek. Ve své podstatě nyní neexistuje vhodná alternativa pro takto rychlé odhalení vadných panelů.

Termografie je nedestruktivní měřicí metoda pro odhalení tepelných poruch FV modulů. Měření může být provedeno za normálního provozu nejen pro samotný modul, ale i pro rozsáhlé systémy. Výhodou je, že kontrolu lze provádět nejen ruční termokamerou, ale i pomocí kamery umístěné na dronu. Což je velice efektivní způsob při kontrole rozsáhlých fotovoltaických elektráren, jak je vidět na obrázku 3-4. [13][20]



Obrázek 3-4 Snímek fotovoltaické elektrárny z dronu [20]

### 3.4.1 Zásady měření

Pro správnou diagnostiku fotovoltaických panelů pomocí termokamer je nezbytně nutné dodržovat určité zásady, které mají vliv na kvalitu dosažených výsledků. Přesnost měření nejvíce závisí na vlivu okolí. Jedná se zejména o teplotu okolí, prašnost prostředí ve kterém měření probíhá a vlhkost vzduchu. U termokamer je tedy nutné kompenzovat následující vlastnosti okolí a měřeného objektu, které mají nepříznivý vliv na měření.

- vlhkost vzduchu
- vzdálenost od objektu
- emisivita
- atmosférická teplota
- zdánlivá odražená teplota

Je zde ale podstatný ještě jeden faktor a tím je intenzita záření a oblačnost v místě a čase měření. Je nutné, aby na fotovoltaické moduly dopadalo v průběhu měření sluneční záření o minimální intenzitě  $700 \text{ W/m}^2$  při ideálně bezmračné obloze. Jde o minimální hranici kdy má měření smysl. Diagnostika při vyšších hodnotách je samozřejmě mnohem účinnější, protože defekty jsou viditelné pouze když je modul zatěžován přeměnou dopadajícího slunečního záření. Fotovoltaické moduly pracují i při nižší intenzitě, ale tepelné rozdíly jsou méně patrné.

Další zásadou je, že teplota okolí a stejně rychlost větru by měly být dostatečně nízké. Zorný úhel má být roven nejlépe  $90^\circ$ , určitě by ale neměl být menší než  $60^\circ$  vzhledem k rovině modulu. Základem je se také vyvarovat chyb vzniklých odrazy pozorovatele, kamery a okolních objektů. Velmi důležité je i správné nastavení emisivity zkoumaného objektu.

Pokud je to možné provádí se měření ze zadní strany modulů, kvůli transparentnosti polymeru pro IR a minimalizací možnosti odrazů.

Výsledné snímky je nutné následně i správně vyhodnotit. Častou chybou je nesprávné nastavení rozsahu teplot při pořizování snímků. Při velkém rozsahu teplot může vyšší teplota defektu téměř splynout s okolím. Proto je důležité si všimnout rozložení teplot na fotovoltaickém modulu, rozmístění a také tvar teplotních abnormalit. [13][20]

## 4. TERMOKAMERY

Princip termokamery vychází ze skutečnosti, že všechna tělesa vyzařují elektromagnetické záření. Intenzita elektromagnetického záření závisí na povrchu měřeného tělesa a na jeho teplotě. Termokamera převádí tepelné záření do obrazu nazývaného termogram, ze kterého je možné následně vyčítat informace o teplotě.

Jednou z výhod práce s termokamerou je okamžité sledování změn teplot zkoumaného objektu, reálný obraz a jednoduchá manipulace. Nesmíme také opomenout teplotní citlivost, díky níž je možné rozlišit i malé rozdíly teplot. V dnešní době již není ani pořizovací cena termokamer příliš vysoká. Dá se tedy aktuálně už považovat za běžné měřicí zařízení.

### 4.1 Parametry

Při výběru termokamery je vhodné ujasnit si konkrétní použití (budovy, desky plošných spojů, rozváděče atd.) a pak jsou důležité jednotlivé parametry. Nejedná se pouze o hodnotu rozlišení a rozsah teploty, jak si může myslet mnoho uživatelů, ale i další podstatné veličiny.

#### 4.1.1 Emisivita

Emisivita je definována jako poměr intenzity vyzařování reálného tělesa ( $M$ ) k intenzitě vyzařování absolutně černého tělesa ( $M_0$ ) se stejnou teplotou.

$$\mathcal{E} = \frac{M}{M_0}, \quad (4.1)$$

Jedná se o bezrozměrnou veličinu nabývající hodnot od nuly do jedné, která určuje schopnost tělesa vyzařovat teplo. Emisivita dosahuje hodnoty 1 pouze pro absolutně černé těleso. Povrchy běžných těles mají emisivitu menší než jedna. Hodnoty emisivity jsou téměř u všech materiálů známé. Z toho důvodu je nejjednodušší způsob určení emisivity materiálu dohledání v patřičných tabulkách. Avšak tyto hodnoty byly získány v laboratorních podmínkách a nemusí přesně souhlasit s hodnotami v podmínkách reálných.

Tabulka 4-1 Příklad tabulky hodnot emisivity různých materiálů [24]

| Materiál                               | Emisivita |
|----------------------------------------|-----------|
| Hliník, leštěný                        | 0,05      |
| Mosaz, matná, zašlá                    | 0,22      |
| beton                                  | 0,54      |
| Cihla běžná                            | 0,85      |
| Měď, zoxidovaná                        | 0,65      |
| Elektrotechnická páska, černá plastová | 0,95      |
| Lak, černý, matný                      | 0,97      |
| Lak, černý, lesklý                     | 0,87      |
| Přůž                                   | 0,93      |
| Papír, bílý                            | 0,90      |
| Porcelán, glazovaný                    | 0,92      |

Určení emisivity je možné provádět následujícími metodami:

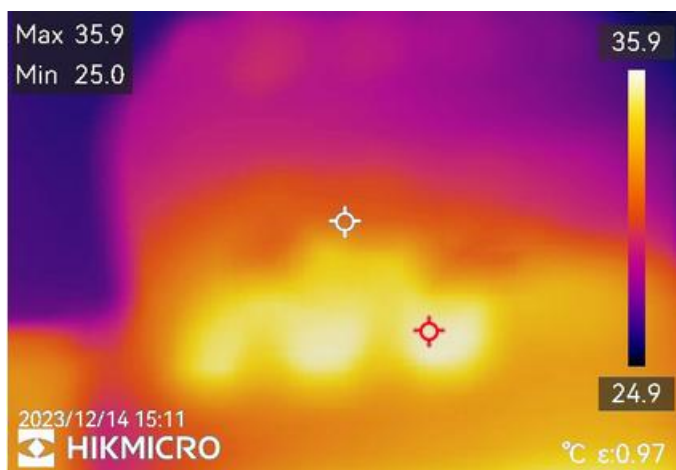
- Použitím patřičných tabulek
- Materiál ohřejeme na známou teplotu, kterou určíme dotykovým teploměrem. Následně na bezdotykovém měřicím zařízení měníme hodnotu emisivity, dokud teplota neodpovídá teplotě změřené dotykovým teploměrem. Nyní nastavená hodnota emisivity povrchu tělesa je správná.
- Při relativně nízké teplotě umístíme na měřené těleso speciální plastovou samolepku se známou emisivitou. Bezdotykovým měřicím zařízením pak změříme teplotu u této samolepky. Poté změříme povrchovou teplotu tělesa bez samolepky a měníme emisivitu aby odpovídala správné teplotě.
- V případě kdy je možné měřený povrch natřít, jej natřeme matnou černou barvou, která má emisivitu kolem 0,95. Po změření teploty na tomto upraveném povrchu zaměříme bezdotykové měřicí zařízení na jinou část povrchu (neupravenou) a provedeme obdobný postup, který byl popsán výše. [22][23]

#### 4.1.2 Spektrální rozsah

Spektrálním rozsahem kamery se rozumí rozsah vlnových délek v němž termokamera zaznamenává infračervené záření (tzn. měří). Spektrální rozsah přístroje je dán jak parametry optiky, tak i citlivostí detektoru, který je schopen zaznamenávat infračervené záření jen o určitých vlnových délkách. Většina termokamer je vybavena tepelným detektorem a jejich spektrální rozsah je téměř vždy v intervalu vlnových délek 7-14  $\mu\text{m}$ . Lze se ale setkat i termokamerami s jinými spektrálními rozsahy (2-5  $\mu\text{m}$  nebo 8-9,4  $\mu\text{m}$ ), které vždy obsahují chlazené kvantové detektory. [25]

### 4.1.3 Přesnost

V současné době je u termokamer standardem přesnost  $\pm 2$  °C nebo  $\pm 2$  % z naměřené hodnoty, přičemž platí větší z obou hodnot. Existují i kamery, kde je chyba měření  $\pm 1$  °C nebo  $\pm 1$  %, ale ty jsou jednak velmi drahé a v běžné praxi se vyskytují jen výjimečně. Pro přesnost je důležité mít snímek z termokamery řádně zaostřený. V případě rozostřeného snímku se mohou zobrazené teploty lišit a jedná se pak o chybné měření.



Obrázek 4-1 Příklad rozostřeného snímku z termokamery



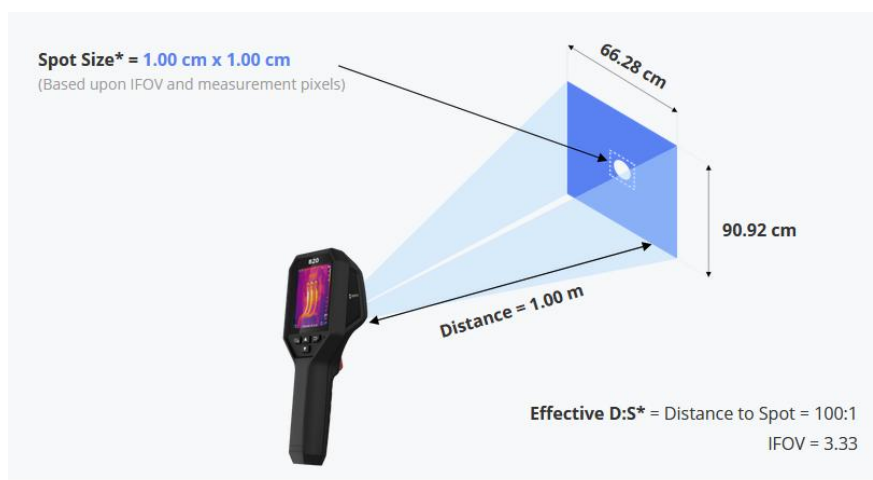
Obrázek 4-2 Příklad zaostřeného snímku z termokamery

Na výše uvedených snímcích pořízených termokamerou s manuálním ostřením je tento rozdíl v zaostření velmi patrný. U obrázku 4-1 vidíme odlišnost zobrazené maximální a minimální teploty oproti obrázku 4-2.

#### 4.1.4 Rozlišení detektoru, FOV a IFOV

Rozlišení detektoru udává počet bodů (pixelů) v matici, která tvoří obrazový senzor. U termokamer však není důležité jen rozlišení detektoru, ale i velikost zorného pole. Jednoduše řečeno údaj o zorném poli specifikuje tu část prostoru, kterou je objektiv termokamery schopen zachytit a z které do něj přichází infračervené záření.

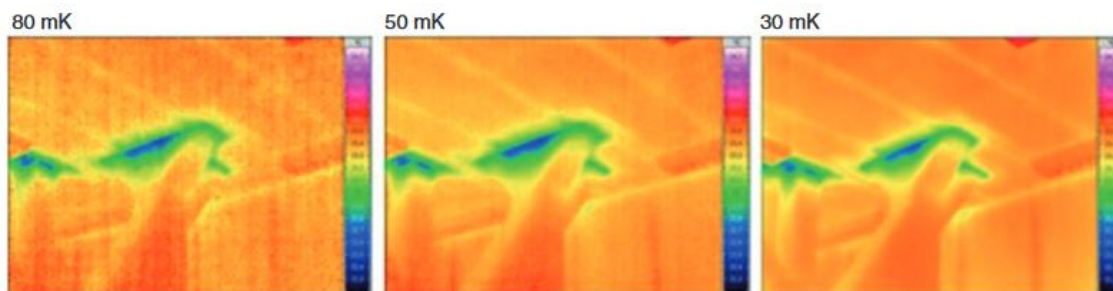
Zorné pole je nejčastěji popisováno jako zorný úhel, tedy parametr FOV (Field of View). Parametr IFOV (Instantaneous Field of View) určuje část prostoru, kterou je schopný zachytit jeden pixel detektoru. Tento parametr je udáván v jednotkách rovinného úhlu mrad. V případě malého rozlišení detektoru termokamery je nutné pořizovat snímky buď z menší vzdálenosti nebo s jiným objektivem, které mohou termokamery nabízet.



Obrázek 4-3 Příklad zobrazení termokamery Hikmicro B20 [27]

#### 4.1.5 Teplotní citlivost

Teplotní citlivost termokamer je udávána pomocí parametru NETD (Noise Equivalent Temperature Difference). Jedná se o nejmenší rozdíl teplot, který vyvolá signál větší, než je vlastní šum systému. NETD se udává buď ve stupních Celsia nebo v Kelvinech a vyjadřuje, jaké nejmenší teplotní rozdíly je termokamera na povrchu černého tělesa schopna zaznamenat. Platí zde pravidlo, že čím je tato hodnota menší tím je to lepší, jak je patrné z obrázku níže.



Obrázek 4-4 Porovnání snímků s různou teplotní citlivostí [25]

Na všech snímcích z obrázku 4-4 je patrný geometrický most v místě nosného sloupu i když na snímku s vyšší teplotní citlivostí jsou detaily méně výrazné. Je tedy důležité si stanovit jaké objekty a detaily je třeba měřit. V současné době se však tato hodnota pohybuje již kolem 40 mK což je dostatečná hodnota pro většinu aplikací. [25][26]

## 4.2 Modely termokamer Hikmicro

Společnost Hikmicro vznikla pod záštitou společnosti HIKVISION, která je známá jako lídr v oblasti stacionárních zabezpečovacích systémů a loveckých pomůcek. Termokamery společnosti Hikmicro jsou vzhledem k jejich parametrům a nízké ceně velmi žádané. To je také podpořeno množstvím modelů, které již byly na trhu představeny. Díky velkému výběru si téměř každý uživatel může zvolit termokameru přesně podle parametrů, které potřebuje od malých modulů pro telefony po větší modely s laserovým zaměřováním a vyměnitelnými objektivy. Protože společnost Hikmicro představila již více než 25 různých modelů termokamer, stručně si představíme rozdíly mezi jednotlivými sériemi. Pro názornost rozdílů mezi sériemi bude v praktické části vybrána pouze jedna kamera ze série Eco, B a M.

### 4.2.1 Série Eco

Tato série je navržena pro základní kontrolu teplot, jako náhrada klasických pyrometrů. Vzhledem ke své kompaktnosti a nízké ceně je vhodná pro nahrazení běžných pyrometrů. Navíc se stále jedná o termokameru, která měří v infračerveném i viditelném spektru.

### 4.2.2 Série B

U termokamer této série jsou již lepší parametry než u série Eco. Disponuje nejen větším displejem, ale také větším rozlišením. Tyto termokamery mají již automaticky i manuálně nastavitelný rozsah a více zobrazovacích režimů (vizuální, termální, obraz v obraze z optického a tepelného pohledu a fúzi obou kanálů). Umožňuje mimo jiné i nastavení zvukového a zábleskového alarmu, či ovládání a pořizování snímků pomocí telefonu, díky přenosu živého obrazu. Snímky jsou plně radiometrické pro následné zpracování

### 4.2.3 Série M

Tyto termokamery jsou již určeny pro profesionální kontroly. Disponují většinou parametrů jako série B, ale mají ještě širší rozsah funkcí. Rozlišení infračerveného detektoru je zde ještě o něco vyšší. Možnost zaznamenání hlasových i textových poznámek. Sekvenční snímání s nastavitelným počtem a intervalem. Vestavěný laserový ukazatel. Možnost manuálního ostření při pořizování termogramů.

### 4.2.4 Série G

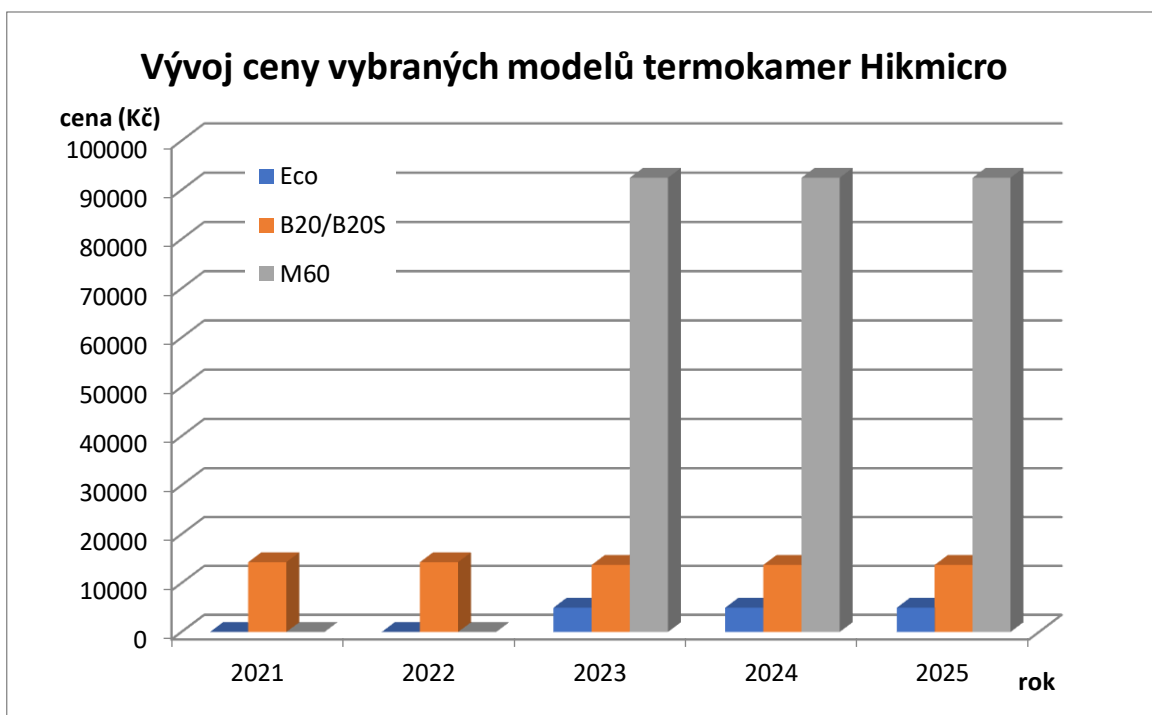
Termokamery nejvyšší řady. Vhodné pro všechna běžná měření v průmyslu, elektrotechnice nebo stavebnictví. Tyto termokamery mají manuální, automatické a oproti nižším modelům hlavně laserové ostření. Možnost vyměnitelných objektivů pro případné rozšíření oblastí použití. Dalším rozdílem oproti předchozí sérii je GPS

rozhraní pro ukládání polohy, vestavěný kompas, samozřejmě vyšší rozlišení infračerveného detektoru a také dotykový displej. [28]

### 4.3 Pořizovací náklady vybraných termokamer pro kontrolu panelů

První termokamery představila společnost Hikmicro na našem trhu v roce 2021 a během 4 let se stala známým a kvalitním dodavatelem termokamer pro odborníky, revizní techniky i nezkušené uživatele. Za tuto dobu rozšířila své portfolio o nespočet modelů pro nejrůznější aplikace.

Jak je vidět na Obrázku 4-5 z vybraných modelů termokamer Hikmicro je na českém trhu nejdéle model B20, který byl v roce 2024 inovován o nový displej a poskytl tak uživatelům přesnější zobrazení pořízených snímků. Zároveň s tímto vylepšením byl model přejmenován na B20S.



Obrázek 4-5 Zobrazení vývoje cen vybraných modelů termokamer Hikmicro v letech 2021-2025

Modely Eco a M60 byly oba poprvé představeny až v roce 2023. Jak je z obrázku patrné, tak cena modelů použitých v praktické části pro kontrolu solárních panelů se výrazně liší. Výběr těchto modelů byl zcela záměrný, aby se mohly zhodnotit a porovnat mezi sebou jednotlivé výstupy.

Tabulka 4-2 Vývoj cen použitých termokamer Hikmicro v Kč

|          | 2021  | 2022  | 2023  | 2024  | 2025  |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Eco      | -     | -     | 4959  | 4959  | 4959  |
| B20/B20S | 14274 | 14274 | 13719 | 13719 | 13719 |
| M60      | -     | -     | 92475 | 92475 | 92475 |

V tabulce je představený konkrétní cenový rozdíl mezi vybranými modely termokamer. Jak bylo zmíněno výše, model B20 byl na českém trhu představen jako první a po dvou letech jej následovaly modely Eco a M60. Cena těchto modelů zůstává od roku 2023 nezměněna. Vzhledem k parametrům a cenám za jednotlivé modely se tyto termokamery řadí mezi snadno dostupné produkty s přesnými a relevantními výsledky.

## 5. ANALÝZA MODULŮ

V rámci této praktické části je provedena diagnostika fotovoltaických modulů SST240-60M nacházejících se v Jihomoravském kraji u kterých majitel zaznamenal pokles výkonu. Jedná se o panely jejichž stáří je více než 10 let. Lze tedy předpokládat nalezení různých defektů, popsanych v kapitole 2. Měření bylo provedeno při hodnotě intenzity slunečního záření kolem  $700 \text{ W/m}^2$ , což je minimální hodnota pro uskutečnění relevantního měření.



Obrázek 5-1 Zkoumané fotovoltaické moduly

### 5.1 Použité přístroje

V předchozí kapitole byly popsány důležité parametry termokamer a následně stručně představeny termokamery Hikmicro. Pro praktickou část byl vybrán jeden model ze série Eco, B a M. Jedná se konkrétně o modely Eco, B20 a M60. Tyto termokamery mají navzájem odlišné parametry a proto je možné očekávat rozdílnou kvalitu výsledků.

#### **Hikmicro Eco**

Kompaktní termokamera pro základní kontroly teplot převážně v průmyslových prostředích. Tato termokamera byla navržena jako náhrada klasických pyrometrů. Rozlišení infračerveného detektoru je  $96 \times 96$  a teplotní citlivost  $50 \text{ mK}$ .

U tohoto modelu nelze očekávat příliš kvalitní termogramy s detaily. Z toho důvodu se zde jedná spíše o snímky informativního charakteru bez přílišných detailů.



Obrázek 5-2 Termokamera Hikmicro Eco [28]

### **Hikmicro B20**

Odolný a snadno přenosný model s 3,2" palcovým displejem. Rozlišení infračerveného detektoru je již 256x192 a teplotní citlivostí 40 mK. Tento model je vhodný pro průmyslové kontroly a rychlé prověření elektrického vybavení, strojů a i dalšího majetku. Disponuje pevným ostřením a má možnost nejen infračerveného zobrazení, ale i obraz v obraze, zobrazení ve viditelném spektru nebo kombinaci infračerveného a viditelného snímku.

Zde jsou očekávány již kvalitnější snímky s více detaily. Vzhledem k cenové hladině se jedná o nejrozšířenější model, který by na základě svých parametrů měl splňovat požadavky pro diagnostiku modulů.



Obrázek 5-3 Termokamera Hikmicro B20 [28]

### **Hikmicro M60**

Termokamera navržena pro profesionální kontroly teplot nejen v průmyslových prostředích. Rozlišení infračerveného detektoru 384x288 a teplotní citlivost je 35 mK.

Tento model má navíc možnost záznamu textových a hlasových poznámek k jednotlivým radiometrickým snímkům. Na rozdíl od předešlých dvou modelů má tento již vyměnitelnou baterii pro případ delší doby provozu, ale je i větších rozměrů a tím pádem těžší.

Díky tomuto modelu by mělo být zaznamenáno na infračervených snímcích dostatek detailů. Je to ovšem podmíněno správných zaostřením na měřený objekt, protože jedině tento model má možnost manuálního ostření.



Obrázek 5-4 Termokamera Hikmicro M60 [28]

Tabulka 5-1 Vybrané parametry použitých termokamer Hikmicro

|                           | Eco                           | B20                           | M60                           |
|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Rozlišení detektoru       | 96x96                         | 256x192                       | 384x480                       |
| Spektrální rozsah         | 7,5-14 $\mu\text{m}$          | 8-14 $\mu\text{m}$            | 7,5-14 $\mu\text{m}$          |
| Zorné pole                | 50°x50°                       | 37,2°x50°                     | 41,9°x33,3°                   |
| Vyměnitelný objektiv      | Ne                            | Ne                            | Ne                            |
| Prostorové rozlišení      | 8,89 mrad                     | 3,3 mrad                      | 1,13 mrad                     |
| Teplotní rozsah           | -20°C až 550°C                | -20°C až 550°C                | -20°C až 550°C                |
| Teplotní citlivost        | 50 mK                         | 40 mK                         | 35 mK                         |
| Přesnost                  | $\pm(2^\circ\text{C} + 2 \%)$ | $\pm(2^\circ\text{C} + 2 \%)$ | $\pm(2^\circ\text{C} + 2 \%)$ |
| Viditelné spektrum        | Ne                            | Ano                           | Ano                           |
| Funkce Alarm Hi           | Ano                           | Ano                           | Ano                           |
| Displej                   | 2,4"                          | 3,2"                          | 3,5"                          |
| Doba provozu              | 8 hod                         | 6 hod                         | 4 hod                         |
| Hmotnost (včetně baterie) | 335 g                         | 380 g                         | 686 g                         |
| Rozměry                   | 196x117x59 mm                 | 222x124x74 mm                 | 244x104x100 mm                |

## 5.2 Vizuální kontrola

Nejdříve byla na zkoumaných panelech provedena vizuální kontrola. Ačkoliv jsou panely už celé desetiletí v provozu, nebyl na nich pomocí vizuální kontroly nalezen závažnější defekt popisovaný v kapitole 2.4. Vlivem dopadajícího záření se na pár místech objevilo zažloutnutí Eva fólie nebo jiných materiálů, které se používají k zapouzdření článků.

## 5.3 Referenční kontaktní teploměr

Pro ověření naměřené teploty pomocí termokamer byl použit kontaktní teploměr TMD50 s teplotním čidlem TYP101.



Obrázek 5-5 Kontaktní teploměr TMD50 s čidlem TYP101

## 5.4 Kontrola pomocí termokamer

Použití termokamer odhalilo další defekty na zkoumaných modulech. Jednalo se o několik hotspotů, které jsou jasně patrné z obrázku 5-6. Měření bylo provedeno z přední i zadní strany modulů pro porovnání možné chybovosti, zejména co se týče naměřených hodnot.

Hotspoty jsou místa s vyšší teplotou a vznikají z důvodu nehomogenity hustoty proudu v daných článcích. Tedy v místě s vyšší hustotou proudu vzniká oblast s vyšší teplotou. Pokud je tato teplota příliš vysoká, dochází ve většině případů k nevratnému poškození článku, jako například přetavení galvanických spojů, poškození ochranného skla nebo v nejhorším případě prasknutí.

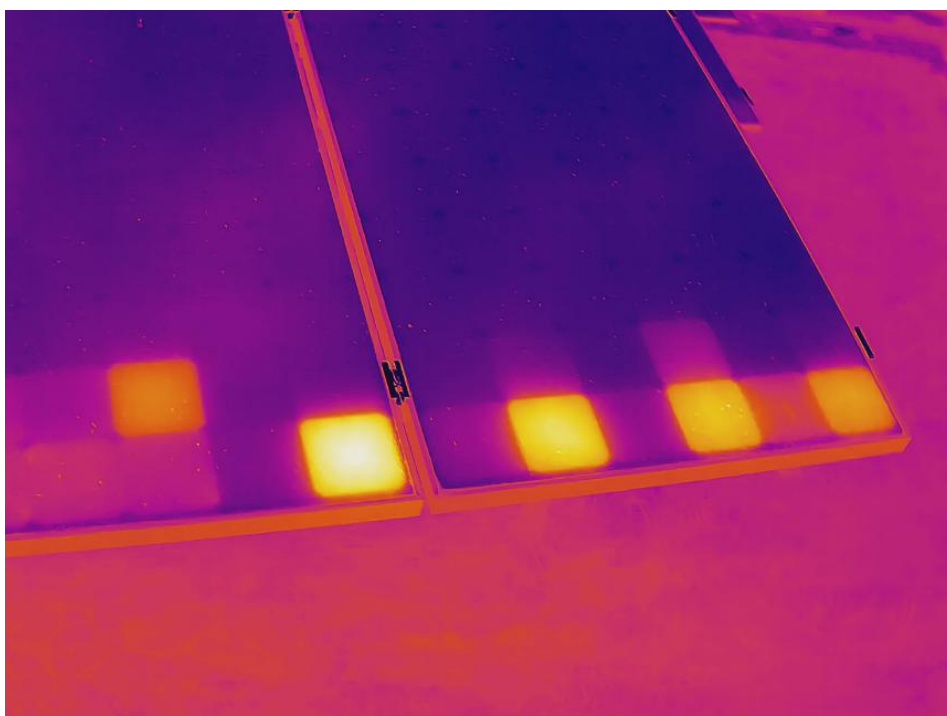
Články jsou zapojené do série a produkují tak stejnou hodnotu proudu, z čehož vyplývá, že má daný řetězec rozložení teploty lineární. Pokud se tam nachází vadný článek dochází v něm k disperzi energie ze zdravých článků, což má za následek úbytek výkonu a lokální přehřátí.

Tyto moduly se nachází v blízkosti živého plotu, který je již celkem vysoký. Z toho důvodu je možné uvažovat, že se jedná o hotspots, které jsou způsobené vlivem zastínění spodní řady článků v modulech.

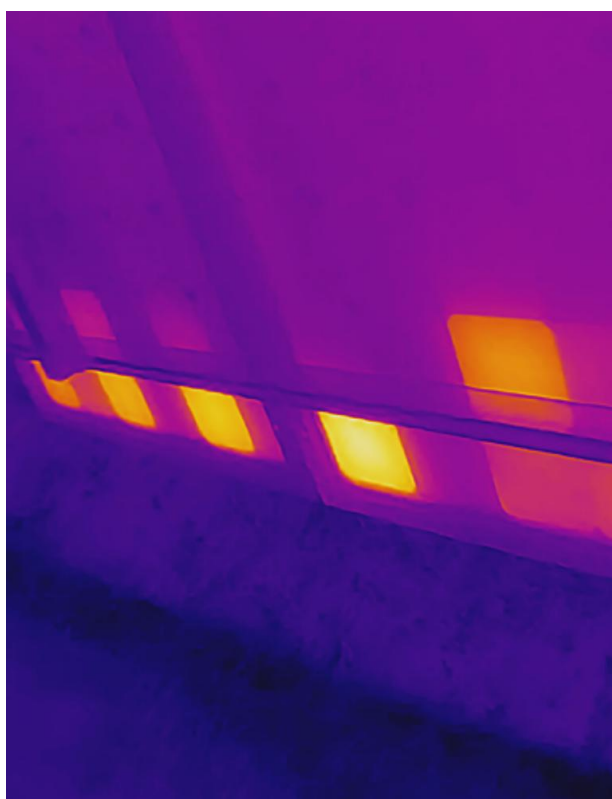
Na snímcích níže jsou patrné rozdíly mezi jednotlivými modely termokamer. Jednak je to zorné pole, které udává co vidíme na snímcích pořízených danou termokamerou. Ale hlavně je tento rozdíl patrný v rozlišení daných modelů. Odpovídá tedy daným parametrům, že model M60 je mnohem přesnější a lze vidět i detaily, za to model Eco nemá již kvalitu snímků příliš dobrou. Nicméně stručný přehled míst, kde se nachází hotspots (ačkoli u modelu Eco méně kvalitní) bylo získáno ze všech vybraných modelů termokamer.



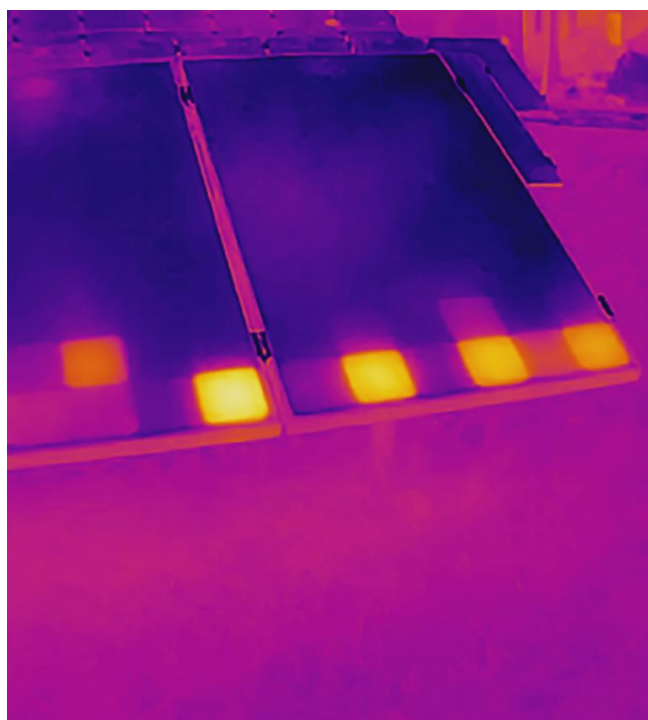
Obrázek 5-6 Detekování hotspotů termokamerou Hikmicro M60 ze zadní strany



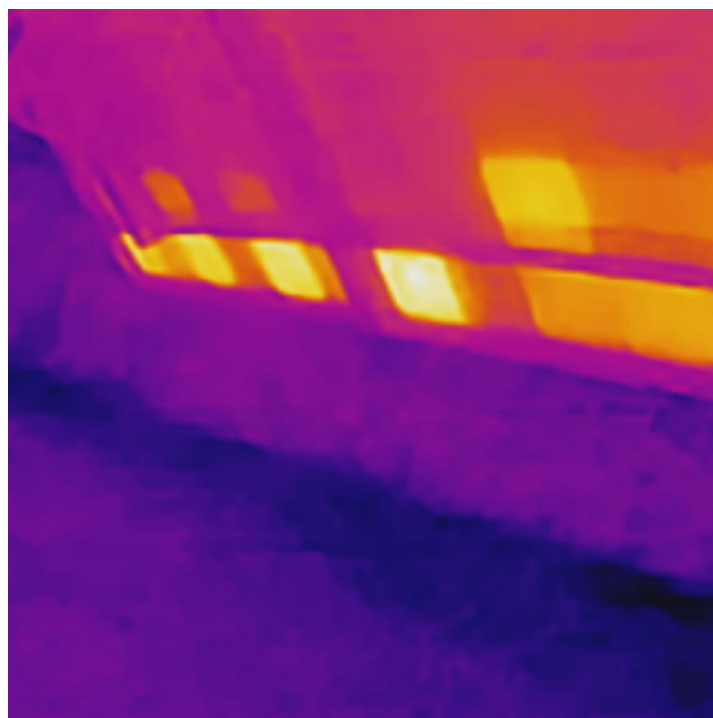
Obrázek 5-7 Detekování hotspotů termokamerou Hikmicro M60 z přední strany



Obrázek 5-8 Detekování hotspotů termokamerou Hikmicro B20 ze zadní strany



Obrázek 5-9 Detekování hotspotů termokamerou Hikmicro B20 z přední strany



Obrázek 5-10 Detekování hotspotů termokamerou Hikmicro Eco ze zadní strany

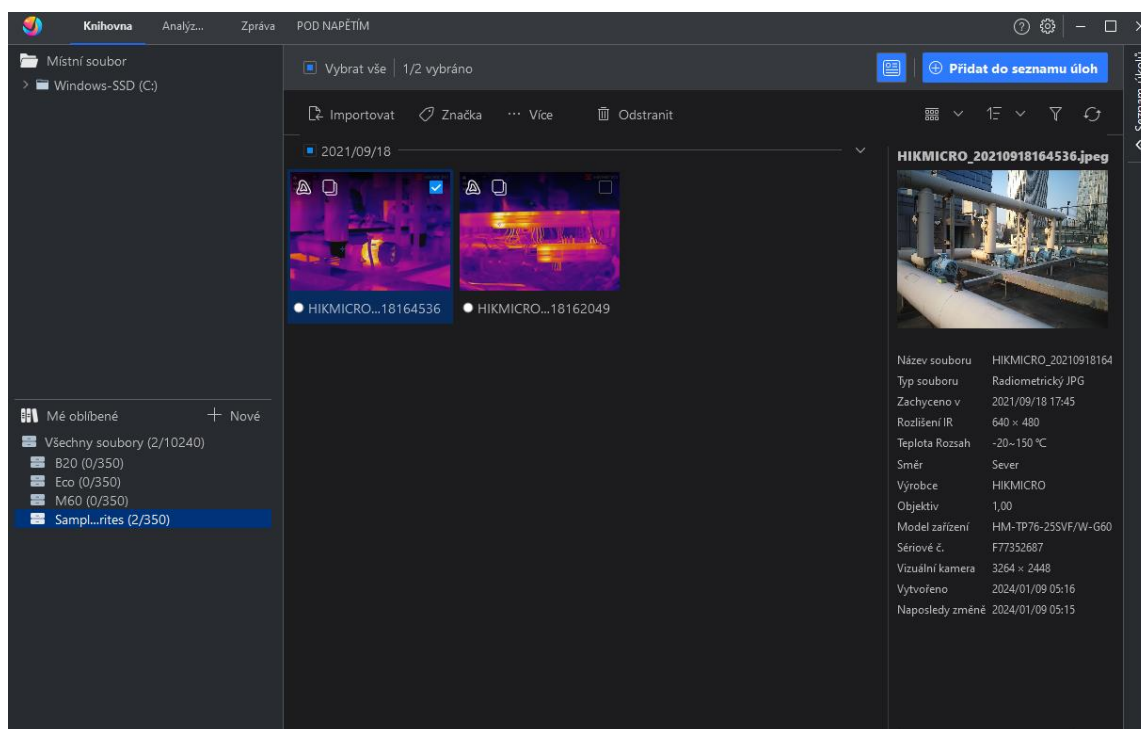


Obrázek 5-11 Detekování hotspotů termokamerou Hikmicro Eco z přední strany

## 5.5 Hikmicro Analyzer

V následující části se zaměříme na vyhodnocení pořízených termogramů pomocí programu Hikmicro Analyzer, který je volně dostupný na stránkách výrobce, právě za účelem analýzy snímků pořízených termokamerou.

Prostředí programu funguje na jednoduchém principu, kdy ve stromové struktuře v levé části nalezneme příslušnou složku s uloženými snímky z termokamery. Vpravo se ukazují podrobnosti o daném snímku, například kdy byl pořízen, hodnota rozlišení nebo kterým modelem byl snímek pořízen.



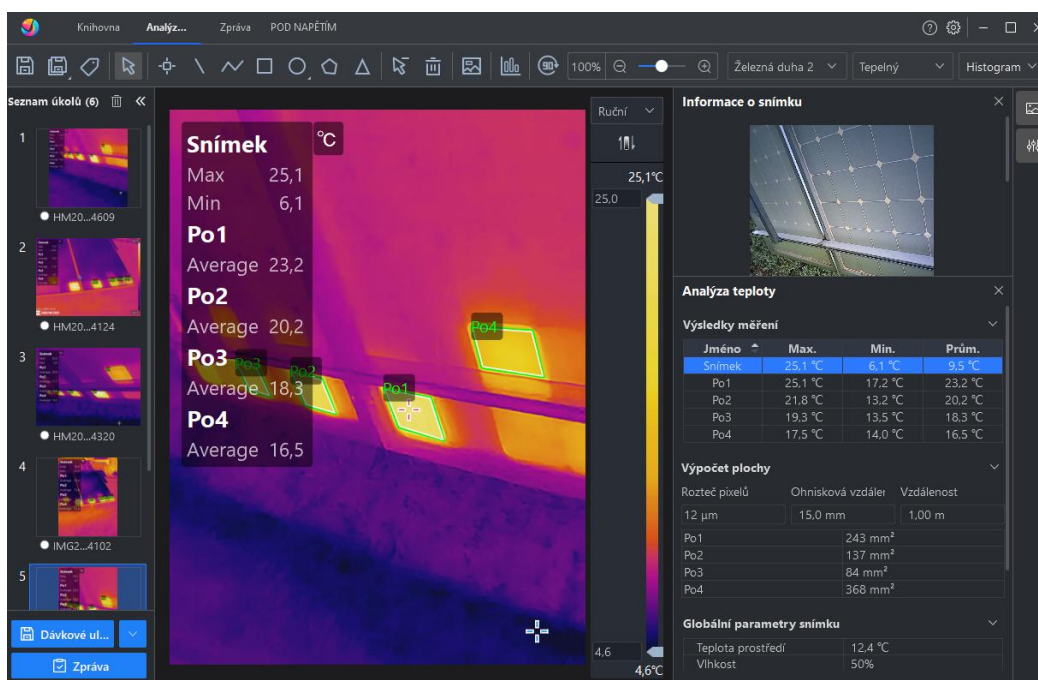
Obrázek 5-12 Hikmicro Analyzer – úvodní zobrazení

Po vybrání snímku (nebo snímků) následuje přesun na druhou záložku Analýza. Zde je možné upravovat u snímků různé parametry jako například emisivitu. To je možné využít, když je potřeba určit dodatečně právě emisivitu podle hodnot z termokamery a naměřené dotykové teploty.

Jelikož jsou snímky radiometrické jsou tak získány hodnoty teploty v jednotlivých bodech, které lze uživatelsky definovat. Pro získání dat se dá i využít obrazců jako kruh, obdélník, polygon nebo elipsa.

V levém sloupci je možné zobrazit informace o minimální a maximální, případně průměrné teplotě na snímku nebo u zvoleného vloženého objektu.

Jak je vidět z obrázku 5-13 na levé straně se zobrazuje k infračervenému snímku také snímek viditelný. Je zde na výběr z různých palet, které lze použít, aby bylo dosaženo dostatečné čitelnosti snímků. Případně změnit režim zobrazení na prolínání či obraz v obraze.



Obrázek 5-13 Hikmicro Analyzer – prostředí pro analýzu

## 5.6 Analýza a vyhodnocení termogramů

Pro vyhodnocení se využijí snímky ze zadní strany panelů, které nejsou zatížené takovou chybou vlivem odrazivosti. Další z faktorů je úhel snímání a emisivita.

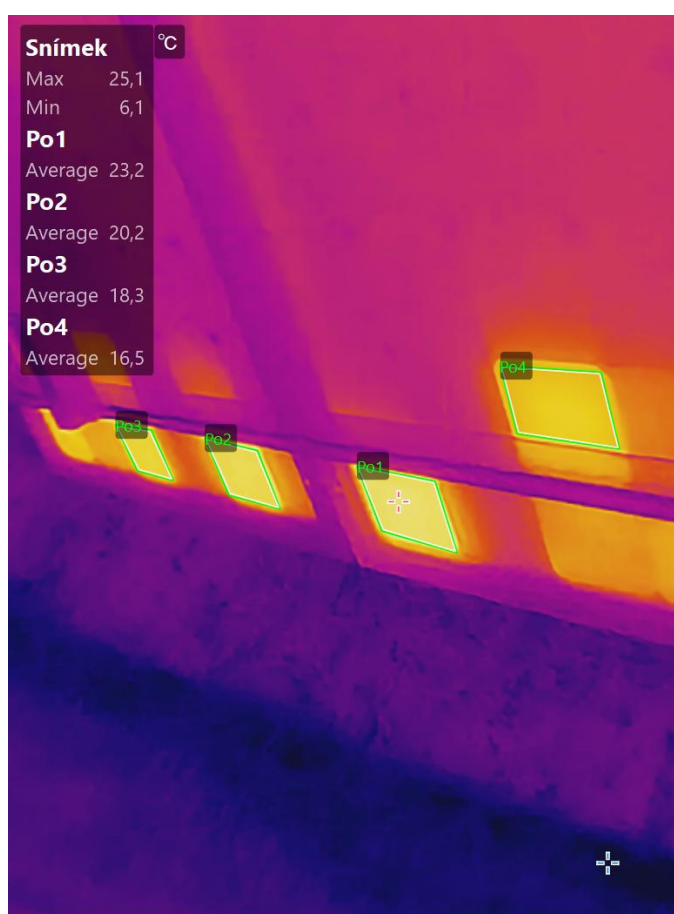


Obrázek 5-14 Analýza snímku z termokamery Hikmicro M60

Maximální teplota je na snímcích ze všech modelů termokamer přibližně ve stejném bodě (jedná se o stejný článek, který se zahřívá nejvíce). Tato maximální teplota je uvedena u modelu B20, který udává 25,1°C. Minimální hodnota je určena mimo oblast fotovoltaických panelů (stín pod živým plotem).

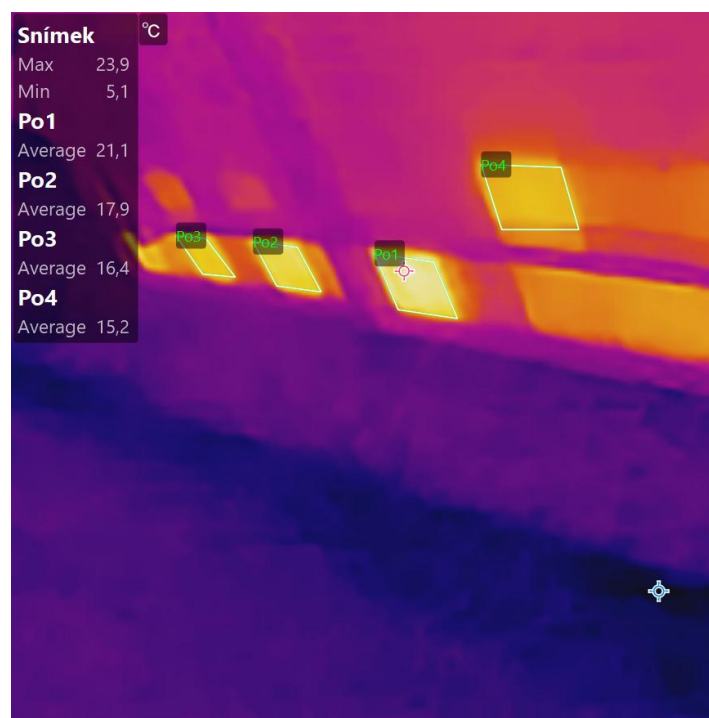
Co se týká ohraničených ploch na snímcích, tak největší rozdíl zaznamenaných teplot je mezi modelem M60 a B20. Ovšem maximální rozdíl je zde 2,7°C což mohla způsobit chyba termokamery nebo měření, například trochu odlišný úhel snímání.

Jelikož probíhalo měření v ranních/dopoledních hodinách byla průměrná teplota panelů kolem 10,5°C. Rozdíl mezi nejteplejším místem a průměrnou teplotou tak dosahuje 11-13°C.



Obrázek 5-15 Analýza snímku z termokamery Hikmicro B20

Prozatím to není tak závažný rozdíl, ale v budoucnu by mohl způsobit určité problémy. I kdyby nedošlo k poškození článku, vystavení vysokým teplotám zapříčiní zrychlení degradace materiálu modulu, v němž je článek zapouzdřen. To může dojít až k destrukci celého modulu.



Obrázek 5-16 Analýza snímku z termokamery Hikmicro Eco

Na všech snímcích pod oblastí Po4 je rozpoznatelný odraz na konstrukci na které jsou umístěné fotovoltaické panely. Je důležité si na takovéto odrazy dát pozor při vyhodnocování, abychom se vyvarovali chybným závěrům.

## 5.7 Zhodnocení

Měření bylo provedeno při intenzitě slunečního záření kolem  $700 \text{ W/m}^2$  a na obloze byla mírná oblačnost. Pomocí termokamer bylo nalezeno 5 hotspotů na modulech umístěných vedle sebe (2 na jednom a 3 na druhém). Výskyt těchto hotspotů zapříčinilo částečné zastínění modulů z blízkého živého plotu.

Maximální odchylka mezi termokamerami byla  $2,7^\circ\text{C}$ , což mohlo být způsobeno mírně odlišným úhlem snímání nebo chybou termokamery.

Nejkvalitnější snímek byl pořízen modelem M60, který má možnost manuálního ostření a tak v případě potřeby bylo tohoto doostření použito. Na termogramech z tohoto modelu jsou díky vysokému rozlišení patrné i detaily na jednotlivých modulech.

Největší teplotní rozdíly jsou mezi modelem M60 a B20. To může být způsobeno chybou termokamery. Nicméně pro účely detekce hotspotů na fotovoltaických modulech je tato odchylka zanedbatelná.

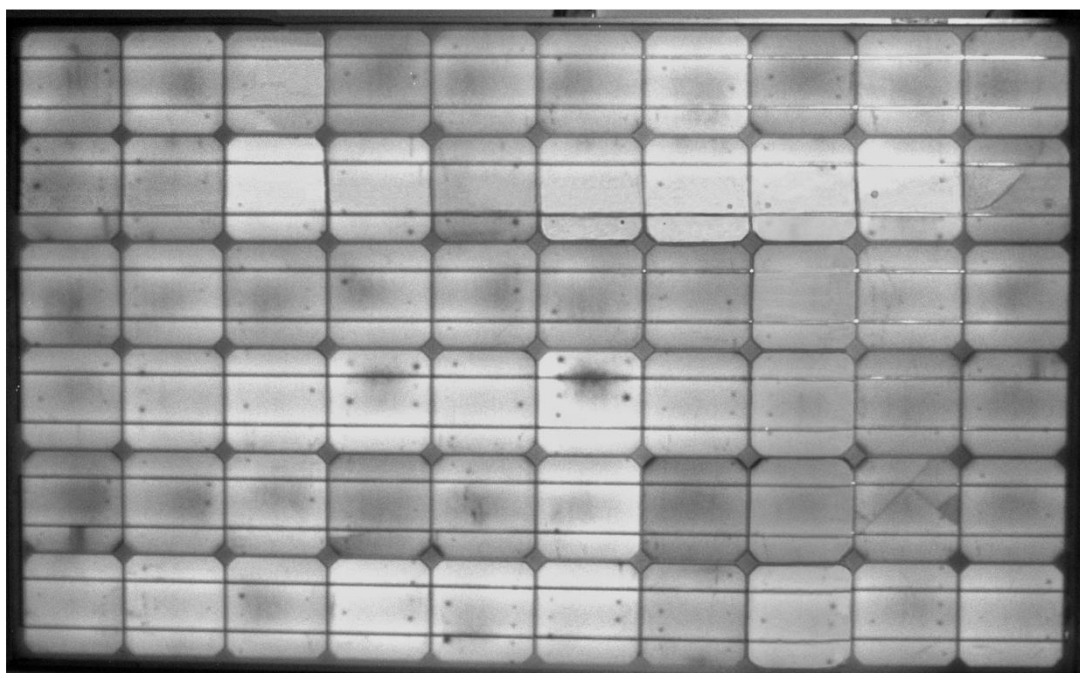
Ačkoliv model Eco má nejnižší kvalitu pořízených termogramů, ve výsledných teplotách se s ostatními modely shodoval. Nelze tedy říci, že by některá z použitých termokamer Hikmicro nedosáhla očekávaných výsledků.

## 6. METODA ELEKTROLUMINISCENCE

V temné místnosti bylo provedeno testování fotovoltaických panelů SST240-60M pomocí metody elektroluminiscence. Jak bylo představeno již v předchozí kapitole, kde je zmíněná jako jedna z diagnostických metod právě elektroluminiscence, tak defekty projevující se jako tmavá místa emitující malou nebo žádnou proudovou hustotu. Výsledky tohoto doplňkového měření jsou představeny v této kapitole.

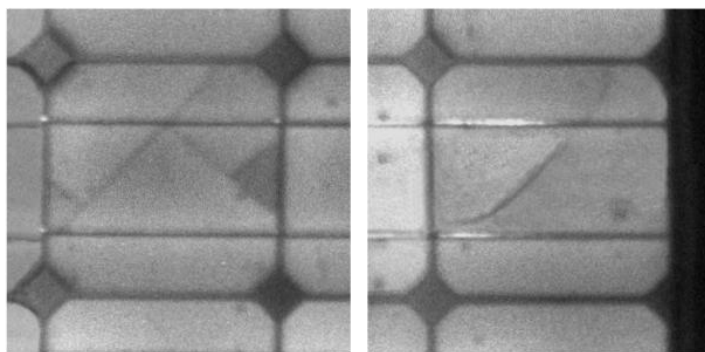
### 6.1 První panel

První zkoumaný panel pomocí metody elektroluminiscence je vidět na snímku níže (Obrázek 6-1). Vyskytuje se zde mnoho různých poruch, které mají vliv na výkon tohoto panelu. Na přehledovém snímku celého panelu jsou vidět tmavá místa, která emitují nižší proudovou hustotu než místa světlejší. Také je zde možné zaznamenat mnoho černých teček, které představují bodové poruchy. Tyto poruchy mohou mít velmi mnoho příčin v celém výrobním procesu solárních článků.



Obrázek 6-1 Snímek prvního panelu pomocí elektroluminiscenční metody

Na článku v páté řadě prvního sloupce je ve spodní části článku vidět tmavé zabarvení. Zde se jedná o nedokonalé kontaktování k němuž může dojít při výrobě, nebo vlivem klimatických podmínek mohlo dojít k uvolnění kontaktní pásky. Tuto vadu je možné zpozorovat také na dalších místech – článku ve čtvrté řadě posledního sloupce nebo druhé řadě prvního sloupce. Dále se v pravé části nalézají poškozené články. Detailnější pohled je zobrazen na Obrázku 6-2 níže.

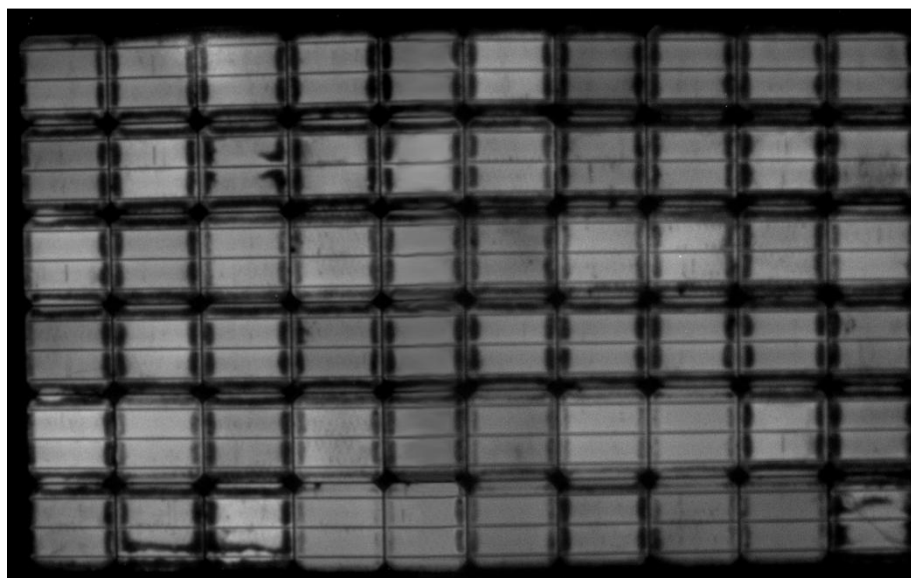


Obrázek 6-2 Snímek prasklin na některých člancích prvního panelu

První zobrazená prasklina, která je větší, má ve svém okolí vyšší počet článků vyznačujících se tmavším zbarvením než ostatní. U obou těchto prasklin můžeme předpokládat, že nejsou přes celou tloušťku článku. Kdyby tomu tak bylo, tyto články by nevykazovaly elektroluminiscenční záření a tím pádem by byly velmi tmavé až přímo černé. Těmito články by průchod proudu byl tím pádem velmi omezený.

## 6.2 Druhý panel

Druhý zkoumaný panel (Obrázek 6-3) má také značné rozdíly v zbarvení jednotlivých článků. V levém spodním rohu je patrná prasklina, vedoucí diagonálně přes celý článek z pravého dolního rohu do levého horního rohu.



Obrázek 6-3 Snímek druhého panelu pomocí elektroluminiscenční metody

Je možné na tomto panelu také zaznamenat viditelné rýhy na jednotlivých člancích. Tento defekt se řadí mezi procesní a může k němu dojít například neopatrnou

manipulací při přepravě. Pokud by se jednalo o vážné poškození, bylo by toto poškození patrné při bližším prozkoumání i pouhým okem. Pro minimalizaci těchto defektů je potřebné dodržovat bezpečnostní opatření během manipulace se solárními články i celými panely. Stejně jako u prvního zkoumaného panelu i zde se vyskytují černé tečky představující bodové poruchy, ke kterým dochází již v procesu výroby článku.

U tohoto panelu jsou velmi výrazné tmavé části jednotlivých článků, kterými prochází velmi malý až žádný proud. Tento jev pozorujeme z velké většiny na okrajích postižených článků. Důvodem tohoto defektu může být vlhkost. Panely se zapouzdřují do EVA fólie, která je používána pro mechanickou podporu, elektrickou izolaci a ochranu proti pronikání vlhkosti k solárním článkům. Pokud je panel dlouhodobě vystavován vnějším vlivům může dojít k delaminaci EVA fólie a do modulu může vniknout vlhkost. Jakmile se tak stane a vlhkost začne pronikat dovnitř, může dojít ke kondenzaci a zkratu. To může vést k degradaci panelu a snížení jeho výkonu. Ovšem tyto vady vznikají uvnitř modulů a nejsou viditelné.

### **6.3 Zhodnocení výsledků elektroluminiscence**

Měření fotovoltaických panelů SST240-60M bylo provedeno v temné místnosti pomocí elektroluminiscenční metody. Tyto panely pocházely z fotovoltaické elektrárny, která byla dříve termograficky prozkoumána pomocí různých modelů termokamer značky Hikmicro.

U obou zkoumaných fotovoltaických panelů byly identifikovány různé druhy závad. U prvního panelu se jednalo o defekty vzniklé při výrobě nebo následné manipulaci. Konkrétně se jednalo o bodové poruchy, nedokonalé kontaktování a prasklé články. K těmto prasklinám ovšem mohlo dojít až při demontáži a manipulaci s panelem. Za předpokladu, že k poškození došlo až v této fázi, můžeme říci, že je tento fotovoltaický panel i přes výše zmíněné výrobní vady v relativně dobré kondici a nedošlo k výraznému snížení výkonu.

Na druhém testovaném fotovoltaickém panelu byly také nalezeny defekty vzniklé při procesu výroby. V pravém dolním rohu je identifikovatelná prasklina článku, ke které ovšem mohlo dojít při demontáži a následné manipulaci s panelem. Stejně tak defekt v podobě rýhy na článku mohl vzniknout díky nesprávné manipulaci a nedodržení bezpečnostních opatření. Nicméně podstatnější je zde velká míra tmavých až černých míst kolem jednotlivých článků. To je pravděpodobně způsobeno delaminací EVA fólie a pronikání vlhkosti do modulu. V porovnání s prvním fotovoltaickým panelem vykazuje tento vyšší míru poškození a je u něj pravděpodobný větší pokles výkonu.

## 7. VÝKONOVÁ A EKONOMICKÁ ANALÝZA FVE

Tato kapitola je zaměřena na výkonovou a ekonomickou analýzu fotovoltaické elektrárny. Zabývá se výkonem zkoumané fotovoltaické elektrárny v průběhu let, predikcí budoucího vývoje a ekonomickou analýzou. Následuje část, kde jsou vytvořené modely vyhodnocující míru poškození fotovoltaických panelů a její dopad na výkonové ztráty fotovoltaické elektrárny a jejich finanční dopad.

### 7.1 Stávající fotovoltaická elektrárna

Existující fotovoltaická elektrárna je umístěna na pozemku v Jihomoravském kraji. Instalace fotovoltaických panelů je realizována kombinovaně na střeše budovy a na volné ploše daného pozemku. Tato kombinace byla zvolena kvůli maximálnímu využití dostupné plochy. Na obrázku 7-1 je zobrazena zkoumaná FVE. Na tomto snímku lze spatřit i část další FVE jež se na pozemku nachází, která ale nebyla předmětem zkoumání.



Obrázek 7-1 Pohled na fotovoltaickou elektrárnu

Fotovoltaická elektrárna o výkonu 21,6 kWp byla uvedena do provozu v roce 2010 a byla připojena k energetické síti s měřením prostřednictvím společnosti E.ON Energie, a.s. na tzv. zelený bonus. Celkem bylo instalováno 90 ks fotovoltaických panelů CEEG SST240-60M, rozdělených do tří sestav, které jsou zapojeny do tří měničů SMA SMC 7000HV.

### 7.2 Naměřený výkon a výnos z FVE

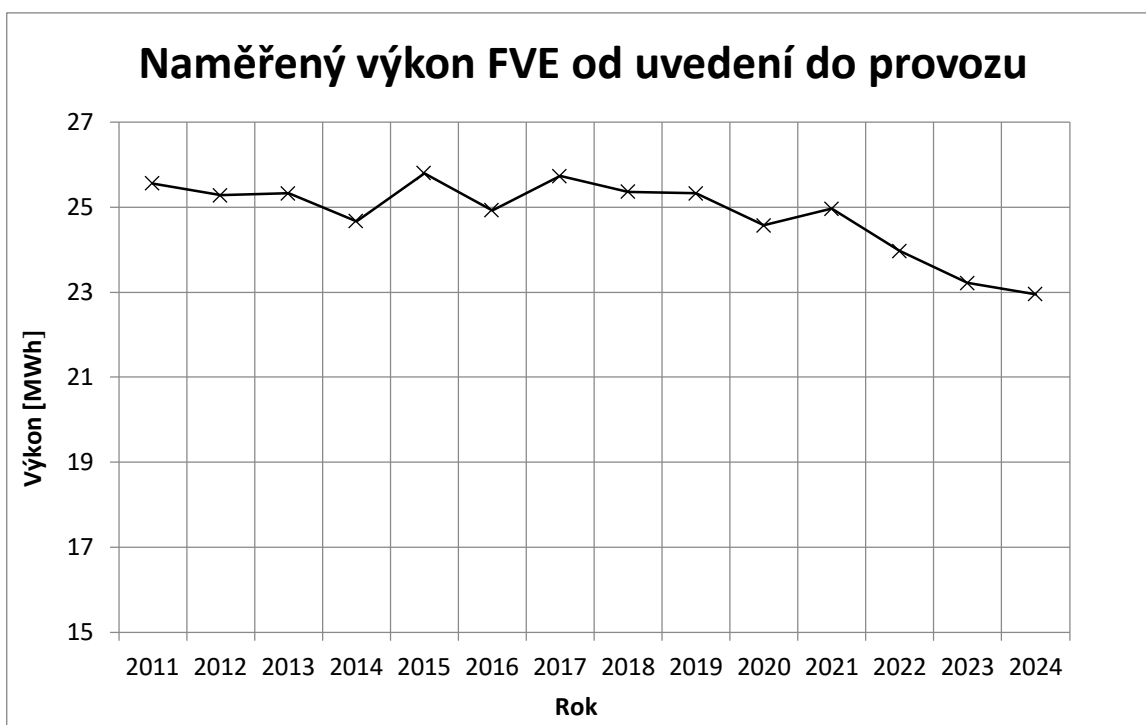
V této části jsou uvedena naměřená data od počátku uvedení fotovoltaické elektrárny do provozu v červnu 2010. Z příložené tabulky (Tabulka 7-1) je patrný pokles výkonu fotovoltaické elektrárny za poslední roky. Tento jev je možné přičítat degradaci a poškození solárních panelů. Pro jednotlivé roky a měsíce je výkon standardní. V zimních měsících, kdy mohou být solární panely pokryté sněhem byl výkon fotovoltaické elektrárny snížený. Výkyvy ve výrobě jsou ve většině případů způsobeny počtem slunečních dnů v daném měsíci.

Tabulka 7-1 Naměřený výkon FVE za jednotlivé měsíce v MWh od uvedení do provozu

| Měsíc    | Rok    |        |        |        |        |        |        |        |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|          | 2010   | 2011   | 2012   | 2013   | 2014   | 2015   | 2016   | 2017   |
| leden    | -      | 0,309  | 0,335  | 0,280  | 0,441  | 0,337  | 0,574  | 0,669  |
| únor     | -      | 0,935  | 0,993  | 0,666  | 1,434  | 1,204  | 1,041  | 1,050  |
| březen   | -      | 2,153  | 2,209  | 2,047  | 2,483  | 2,258  | 1,818  | 2,463  |
| duben    | -      | 3,200  | 3,239  | 2,883  | 3,672  | 3,517  | 2,851  | 2,756  |
| květen   | -      | 3,188  | 3,088  | 3,317  | 2,661  | 3,058  | 3,775  | 4,004  |
| červen   | 3,478  | 3,594  | 3,536  | 3,106  | 3,850  | 4,082  | 3,963  | 4,246  |
| červenec | 4,207  | 4,000  | 4,103  | 4,406  | 4,007  | 3,594  | 3,266  | 3,251  |
| srpen    | 2,949  | 3,450  | 3,200  | 3,693  | 2,205  | 3,207  | 3,076  | 3,233  |
| září     | 2,285  | 2,217  | 2,251  | 2,197  | 2,372  | 2,237  | 2,559  | 1,697  |
| říjen    | 1,355  | 1,388  | 1,371  | 1,650  | 1,060  | 1,125  | 0,919  | 1,324  |
| listopad | 0,409  | 0,741  | 0,575  | 0,655  | 0,162  | 0,826  | 0,668  | 0,632  |
| prosinec | 0,373  | 0,389  | 0,381  | 0,422  | 0,323  | 0,355  | 0,412  | 0,407  |
| suma     | 15,054 | 25,561 | 25,279 | 25,322 | 24,670 | 25,800 | 24,922 | 25,732 |

| Měsíc    | Rok    |        |        |        |        |        |        |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|          | 2018   | 2019   | 2020   | 2021   | 2022   | 2023   | 2024   |
| leden    | 0,456  | 0,622  | 0,603  | 0,649  | 0,440  | 0,570  | 0,548  |
| únor     | 1,123  | 1,046  | 1,014  | 1,019  | 1,107  | 0,958  | 0,936  |
| březen   | 2,038  | 2,141  | 2,076  | 2,389  | 2,023  | 1,962  | 1,940  |
| duben    | 3,184  | 2,804  | 2,719  | 2,673  | 3,169  | 2,570  | 2,548  |
| květen   | 3,417  | 3,890  | 3,773  | 3,884  | 3,401  | 3,565  | 3,543  |
| červen   | 4,023  | 4,105  | 3,981  | 4,119  | 4,007  | 3,762  | 3,740  |
| červenec | 3,430  | 3,259  | 3,161  | 3,153  | 3,415  | 2,987  | 2,965  |
| srpen    | 3,142  | 3,155  | 3,060  | 3,136  | 2,618  | 2,892  | 2,870  |
| září     | 2,398  | 2,128  | 2,064  | 1,646  | 1,998  | 1,951  | 1,929  |
| říjen    | 1,022  | 1,122  | 1,088  | 1,284  | 0,852  | 1,028  | 1,006  |
| listopad | 0,747  | 0,650  | 0,631  | 0,613  | 0,623  | 0,596  | 0,574  |
| prosinec | 0,384  | 0,410  | 0,397  | 0,395  | 0,320  | 0,375  | 0,353  |
| suma     | 25,361 | 25,327 | 24,567 | 24,960 | 23,971 | 23,216 | 22,952 |

Pro lepší vizualizaci je dále tato tabulka zobrazena na obrázku 7-2, kde se neuvažuje první rok, kdy byla fotovoltaická elektrárna uvedena do provozu. Zde je již bezpochyby patrný pokles výkonu FVE zaznamenaný v posledních letech.



Obrázek 7-2 Výkon FVE v MWh v závislosti na čase

Jelikož tato fotovoltaická elektrárna čerpá podporu formou zeleného bonusu má pokles výkonu negativní vliv na výnos z FVE. Zelený bonus je vyplácen regionálním provozovatelem distribuční soustavy a jedná se o jistou prémii za vyrobení elektrické energie z obnovitelného zdroje. Výše zeleného bonusu je garantována po dobu jednoho roku. Výhodou je, že výrobce může být zároveň i odběratelem a vyrobenou elektrickou energií sám spotřebovat.

Jednotlivé výnosy z fotovoltaické elektrárny jsou uvedené v následující tabulce (Tabulka 7-2). Na žádost majitele zde není zveřejněna skutečná výše zeleného bonusu a výnos z fotovoltaické elektrárny. Z toho důvodu byly tyto hodnoty přepočítány koeficientem  $k$ .

Pro výpočet výnosu byl použit následující vzorec

$$\text{Výnos} = (\text{Vyrobená energie} - \text{Vlastní spotřeba}) \cdot \text{Výše zeleného bonusu}, \quad (7.1)$$

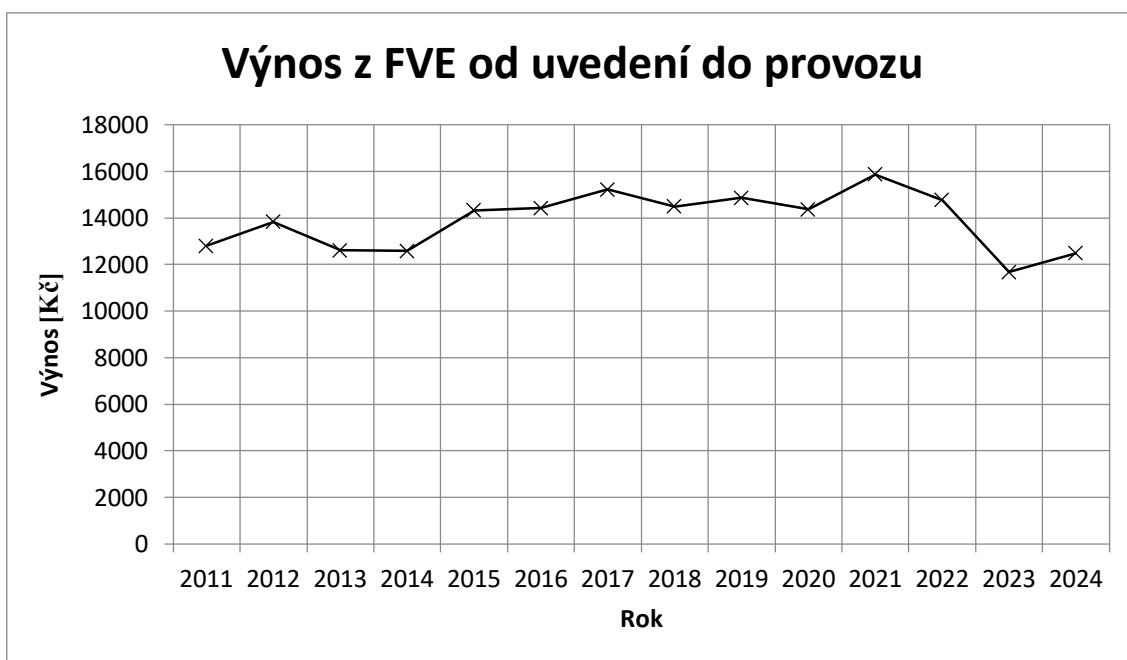
Ve výnosu z jednotlivých měsíců a let jsou značné odchylky. Ty jsou způsobené odečtem vlastní spotřeby, která se v průběhu času měnila. Samozřejmě zde působí i vliv stanoveného tarifu pro daný rok. Vzhledem k tomu, že je zde čerpána podpora formou zeleného bonusu, byla doba návratnosti investice do fotovoltaické elektrárny zkrácena. Díky tomu je tato FVE již několik let výdělečná.

Tabulka 7-2 Výnos z FVE za jednotlivé měsíce v Kč od uvedení do provozu

| Měsíc    | Rok  |       |       |       |       |       |       |       |
|----------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|          | 2010 | 2011  | 2012  | 2013  | 2014  | 2015  | 2016  | 2017  |
| leden    | -    | 69    | 43    | 9     | 148   | 103   | 273   | 362   |
| únor     | -    | 97    | 451   | 51    | 869   | 133   | 572   | 570   |
| březen   | -    | 949   | 1100  | 367   | 943   | 1159  | 992   | 990   |
| duben    | -    | 1694  | 1593  | 1318  | 1125  | 2183  | 1437  | 1478  |
| květen   | -    | 1618  | 1622  | 1836  | 1679  | 1695  | 2312  | 2296  |
| červen   | 1830 | 1971  | 2239  | 1936  | 2657  | 2647  | 2576  | 2735  |
| červenec | 2498 | 2287  | 2612  | 3073  | 1309  | 2195  | 2043  | 2196  |
| srpen    | 1554 | 1965  | 2017  | 2412  | 1874  | 1982  | 1925  | 2344  |
| září     | 1007 | 1125  | 1268  | 1049  | 1225  | 1278  | 1424  | 1203  |
| říjen    | 728  | 682   | 636   | 495   | 487   | 527   | 447   | 685   |
| listopad | 32   | 242   | 160   | 34    | 190   | 348   | 276   | 237   |
| prosinec | 99   | 103   | 91    | 25    | 83    | 86    | 152   | 129   |
| suma     | 7748 | 12802 | 13831 | 12606 | 12589 | 14336 | 14429 | 15225 |

| Měsíc    | Rok   |       |       |       |       |       |       |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|          | 2018  | 2019  | 2020  | 2021  | 2022  | 2023  | 2024  |
| leden    | 176   | 13    | 364   | 338   | 123   | 216   | 212   |
| únor     | 488   | 411   | 491   | 567   | 631   | 423   | 423   |
| březen   | 390   | 680   | 1058  | 1622  | 1125  | 996   | 959   |
| duben    | 1717  | 1320  | 1557  | 1843  | 2241  | 1452  | 1490  |
| květen   | 2089  | 2720  | 2489  | 2600  | 2050  | 1905  | 2005  |
| červen   | 2971  | 3063  | 2686  | 2935  | 2828  | 2153  | 2313  |
| červenec | 2414  | 1497  | 1887  | 2084  | 2206  | 1566  | 1534  |
| srpen    | 2097  | 2886  | 1934  | 2129  | 1851  | 1573  | 1934  |
| září     | 1330  | 1273  | 1161  | 605   | 1263  | 760   | 1074  |
| říjen    | 591   | 575   | 492   | 820   | 223   | 392   | 348   |
| listopad | 124   | 258   | 149   | 211   | 208   | 162   | 147   |
| prosinec | 112   | 170   | 98    | 113   | 16    | 78    | 45    |
| suma     | 14499 | 14863 | 14367 | 15865 | 14764 | 11678 | 12484 |

Přehlednější vývoj ročního výnosu z fotovoltaické elektrárny je zobrazen na obrázku 7-3. Při porovnání křivky výkonu a výnosu z FVE je zřejmé, že jsou zde rozdíly. Ty ve většině případů plynou z rozdílné vlastní spotřeby elektrické energie, jelikož nebyly významné výkyvy ve stanoveném ročním tarifu pro zelený bonus. Rozdíl je však patrný v letech 2022 a 2023. Výkon fotovoltaické elektrárny byl v těchto letech rozdílný o necelou 1 MWh. Spotřeba objektů byla stejná, avšak výnos vykazuje mnohem větší odskok. Tato odchylka je způsobena právě rozdílným výkupním tarifem pro daný rok. V rámci porovnání za poslední roky je ztráta výnosu okolo 14 %.



Obrázek 7-3 Výnos z FVE v Kč v závislosti na čase

## 7.3 Modelová analýza

Na základě získaných dat bude predikován vývoj výkonu fotovoltaické elektrárny a její finanční výnos. V modelové analýze bude představeno, jak velký vliv má pokles výkonu FV elektrárny a jak se tím mění její výnosnost. Modelován bude stav bez poškození solárních panelů a poklesu výkonu a následně budou představeny modely s odlišnou mírou poškození.

Jako výchozí byl určen rok 2021, kdy ještě nedošlo k poklesu výkonu solární elektrárny. Jelikož zde není bateriové úložiště je část elektrické energie odebírána ze sítě. Pro modely bude využita průměrná roční spotřeba, která je stanovena na 15 MWh. Tato hodnota je vyšší, jelikož se nejedná pouze o spotřebu domácnosti, ale i přilehlých budov, kde se nachází kancelářské prostory a dílny. Vývoj poklesu výkonu bude simulován až do roku 2035. Aby zde nefigurovaly skutečné hodnoty výnosu z fotovoltaické elektrárny, tak jsou přepočítány koeficientem  $k$ .

### 7.3.1 Model 1

V prvním modelu je vytvořena predikce pro stav kdy nedošlo k poškození solárních panelů, ale ani jejich výměně či doplnění FVE například o bateriové úložiště. Pro tento model byly použity hodnoty od roku 2021. V tabulce níže (Tabulka 7-3) je znázorněn předpokládaný výkon fotovoltaické elektrárny, který mírně klesá, ale nejedná se o zásadní změnu. Stejný průběh je zaznamenán i u výše výnosu.

Tabulka 7-3 Predikce bez poškození fotovoltaických panelů a poklesu výkonu

| Rok             | 2021   | 2022   | 2023   | 2024   | 2025   | 2026   | 2027   | 2028   |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Výkon FVE (MWh) | 24,960 | 25,015 | 24,982 | 24,950 | 24,917 | 24,884 | 24,852 | 24,819 |
| Výnos (Kč)      | 10000  | 10006  | 8371   | 9143   | 9324   | 9293   | 9262   | 9232   |

| Rok             | 2029   | 2030   | 2031   | 2032   | 2033   | 2034   | 2035   |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Výkon FVE (MWh) | 24,787 | 24,754 | 24,721 | 24,689 | 24,656 | 24,624 | 24,591 |
| Výnos (Kč)      | 9201   | 9170   | 9140   | 9109   | 9078   | 9048   | 9017   |

V celkovém součtu výnosů za analyzované období se v tomto modelu dosahuje částky 138 394 Kč.

### 7.3.2 Model 2

U modelu 2 je uvažováno, že se průměrná roční výroba z fotovoltaické elektrárny sníží do roku 2035 o deset procent. Jak je patrné z tabulky níže, výkon v roce 2035 činil 22,464 MWh. Jedná se zde již o znatelnější pokles výkonu a dopad to má i na finanční výnos. Jelikož zde není bateriové úložiště a spotřeba objektů žádným způsobem rapidně neklesla, kopíruje se zde trend z předchozích let, kdy je část výkonu využita pro vlastní spotřebu a zbytek je dodáván do sítě. To znamená, že do sítě je dodáváno méně MWh, podle kterých je dán výsledný výnos z fotovoltaické elektrárny. Procentuálně u tohoto modelu v roce 2035 výnos klesl přibližně na 70 % od počátku modelovaného období.

Tabulka 7-4 Predikce s poškozením fotovoltaických panelů a poklesu výkonu o 10 %

| Rok             | 2021   | 2022   | 2023   | 2024   | 2025   | 2026   | 2027   | 2028   |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Výkon FVE (MWh) | 24,960 | 24,782 | 24,603 | 24,425 | 24,247 | 24,069 | 23,890 | 23,712 |
| Výnos (Kč)      | 10000  | 9773   | 8053   | 8661   | 8694   | 8526   | 8358   | 8191   |

| Rok             | 2029   | 2030   | 2031   | 2032   | 2033   | 2034   | 2035   |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Výkon FVE (MWh) | 23,534 | 23,355 | 23,177 | 22,999 | 22,821 | 22,642 | 22,464 |
| Výnos (Kč)      | 8023   | 7856   | 7688   | 7520   | 7353   | 7185   | 7017   |

Pro tento model hodnota výnosů za analyzované období dosahuje částky 122 898 Kč. V porovnání s prvním modelem, kde se nevyskytuje poškození panelů, dochází k poklesu výnosů za celé toto období o necelých 12 %.

### 7.3.3 Model 3

V této variantě je již pokles roční průměrné výroby fotovoltaické elektrárny o 20 % za analyzované období. Počáteční stav je stejný jako u předchozích modelů. Samozřejmě to, že se celkový pokles za sledované období zvýší, se výrazně projeví na finančním výnosu. Za analyzované období se výkon fotovoltaické elektrárny snížil přibližně o 5 MWh. Vlastní spotřeba je beze změny a tím jsou dodávky do sítě sníženy. V posledním roce pak finanční výnos klesl přibližně o 50 % oproti počátku modelovaného období.

Tabulka 7-5 Predikce s poškozením fotovoltaických panelů a poklesu výkonu o 20 %

| Rok             | 2021   | 2022   | 2023   | 2024   | 2025   | 2026   | 2027   | 2028   |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Výkon FVE (MWh) | 24,960 | 24,603 | 24,247 | 23,890 | 23,534 | 23,177 | 22,821 | 22,464 |
| Výnos (Kč)      | 10000  | 9595   | 7754   | 8170   | 8023   | 7688   | 7353   | 7017   |

| Rok             | 2029   | 2030   | 2031   | 2032   | 2033   | 2034   | 2035   |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Výkon FVE (MWh) | 22,107 | 21,751 | 21,394 | 21,038 | 20,681 | 20,325 | 19,968 |
| Výnos (Kč)      | 6682   | 6347   | 6012   | 5676   | 5341   | 5006   | 4671   |

Suma výnosů za sledované období je v tomto modelu 105 336 Kč. Při porovnání s Modelem 1 dochází k finanční ztrátě 33 058 Kč. Což činí necelých 24 % z možného výnosu.

#### 7.3.4 Model 4

Pro poslední model byl stanoven pokles průměrného ročního výkonu fotovoltaické elektrárny do roku 2035 o 30 %. Jako u předchozích modelů se vychází ze stejné výchozí situace. Akorát v tomto případě dochází již k většímu poškození panelů což zapříčiňuje jejich snížený výkon. Trend tohoto modelu je daleko více strmější než tomu bylo u předchozích. Díky sníženému výkonu je v tomto modelu nejmarkantnější pokles výnosu z fotovoltaické elektrárny a to v posledním roce přibližně o 77 % oproti roku počátečnímu.

Tabulka 7-6 Predikce s poškozením fotovoltaických panelů a poklesu výkonu o 30 %

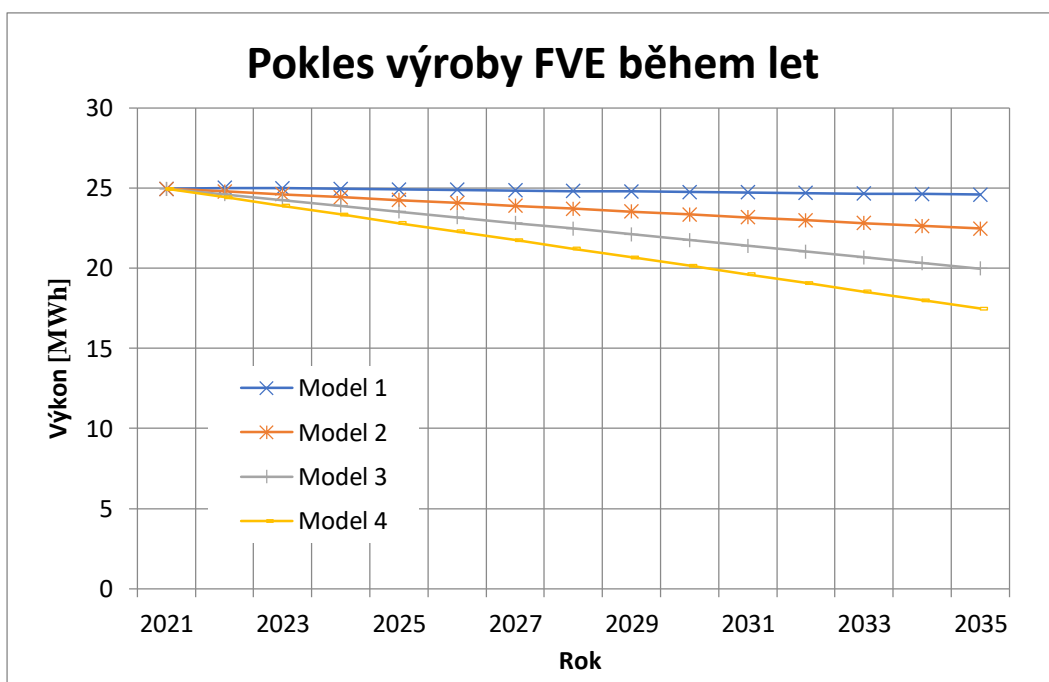
| Rok             | 2021   | 2022   | 2023   | 2024   | 2025   | 2026   | 2027   | 2028   |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Výkon FVE (MWh) | 24,960 | 24,425 | 23,890 | 23,355 | 22,821 | 22,286 | 21,751 | 21,216 |
| Výnos (Kč)      | 10000  | 9417   | 7455   | 7678   | 7353   | 6850   | 6347   | 5844   |

| Rok             | 2029   | 2030   | 2031   | 2032   | 2033   | 2034   | 2035   |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Výkon FVE (MWh) | 20,681 | 20,146 | 19,611 | 19,077 | 18,542 | 18,007 | 17,472 |
| Výnos (Kč)      | 5341   | 4838   | 4336   | 3833   | 3330   | 2827   | 2324   |

V rámci tohoto modelu došlo k poklesu celkového výnosu z analyzovaného období až na částku 87 773 Kč. Při porovnání s prvním bezporuchovým modelem došlo k finanční ztrátě v hodnotě 50 621 Kč. V přepočtu na procenta se jedná přibližně o ztrátu 36,5 % z celkového možného výnosu.

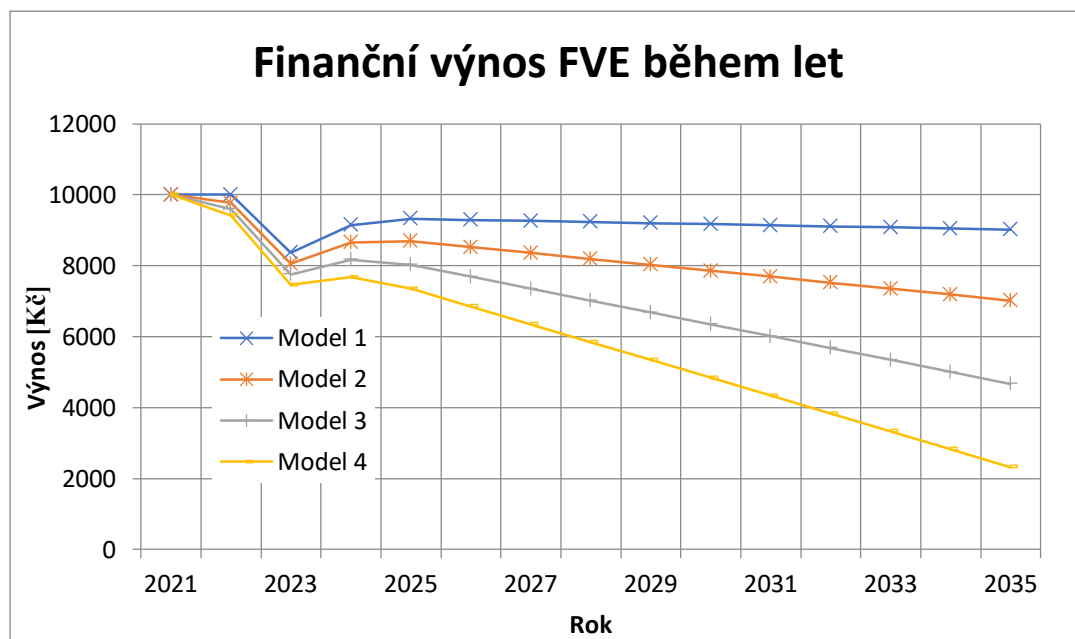
#### 7.3.5 Grafické porovnání

Pro lepší představu vývoje v jednotlivých letech jsou níže znázorněny závislosti výkonu a finančního výnosu na čase. Jako první příklad je zde obrázek 7-4, jež znázorňuje roční výkony všech modelů během simulovaného období. Jak je z grafu patrné, rozdíl v posledním roce (2035) mezi Modelem 1 a Modelem 4 je nejvýraznější a to okolo 7 MWh.

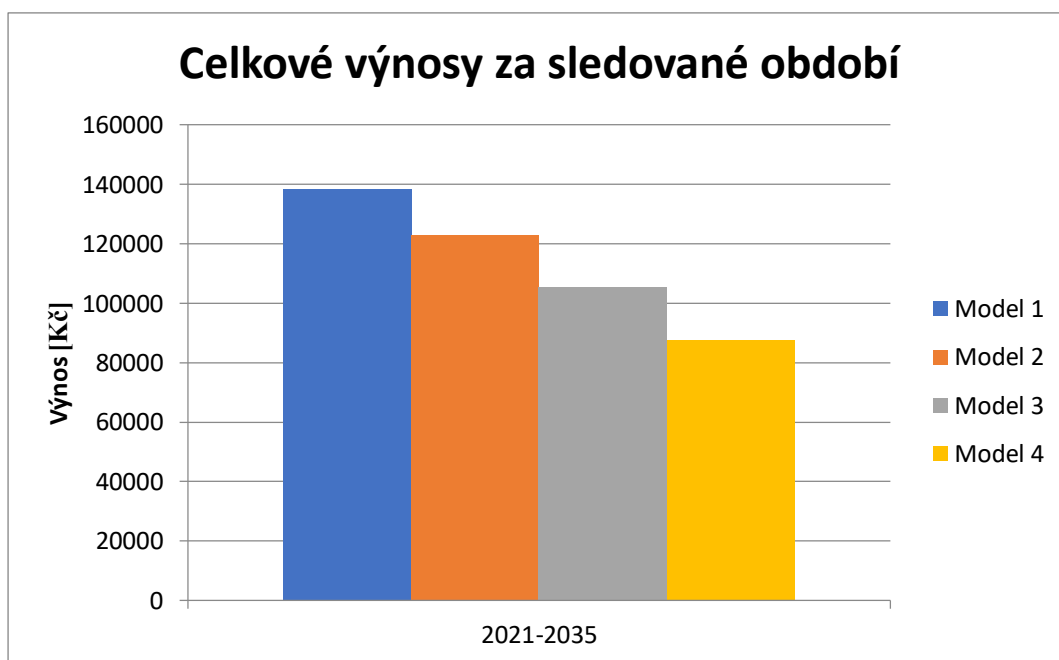


Obrázek 7-4 Pokles výroby FVE v závislosti na čase

Vývoj výnosů je zobrazen na obrázku 7-5, který představuje závislost výnosů na čase až do roku 2035. U křivek je patrný pokles na začátku sledovaného období. To je z důvodu, že při modelování byla použita výše zeleného bonusu tak, jak ji pro tyto roky ustanovil Energetický regulační úřad. Pro predikce následujících let byly tyto hodnoty zprůměrovány.



Obrázek 7-5 Finanční výnos FVE v závislosti na čase



Obrázek 7-6 Celkový finanční výnos FVE za analyzované období

V posledním obrázku 7-6 je znázorněný celkový pokles výnosů z fotovoltaické elektrárny za simulované období pro jednotlivé modely. Největší pokles vychází mezi Modelem 1, u kterého nedošlo k poškození solárních panelů, a Modelem 4, který představuje největší míru poškození panelů a tím pádem i největší pokles finančního výnosu.

## 7.4 Shrnutí

V této části byl zhodnocen výkon fotovoltaické elektrárny u které byly nalezeny fotovoltaické panely s teplejšími místy tzv. hotspoty. Zde je patrná postupně klesající křivka roční výroby elektrické energie z této FVE. Jelikož tato fotovoltaická elektrárna čerpá podporu formou zeleného bonusu, má snížený výkon vliv na výši energie dodané do sítě a z toho plynoucí finanční výnos.

Další část je modelová analýza ve které jsou představeny čtyři modely u kterých je uvažován rozdílný pokles průměrné roční výroby elektrické energie s predikcí do roku 2035. Dle předpokladů je průběh u poslední varianty, kde je pokles o 30 % v průběhu simulovaného období, nejmarkantnější. Není ovšem pravděpodobné, že by majitel takovéto FV elektrárny nezasáhl dříve, pokud by její výkon začal takto klesat.

## 8. ZÁVĚR

Ze začátku se diplomová práce zabývá energií ze Slunce. Následně v kapitole 2 se věnuje fotovoltaickým článkům a modulům. Nejdříve jednotlivým typům článků a pak možným defektům. Následuje kapitola používaných metod pro odhalení defektů ve fotovoltaických článcích a modulech.

Kapitola o termokamerách se zaměřuje na parametry, které jsou důležité při výběru vhodného modelu. Pro část diagnostiky byly vybrány tři modely termokamer Hikmicro, aby byl patrný rozdíl mezi nimi. Následně byla provedena diagnostika fotovoltaických modulů pomocí těchto termokamer. U zkoumaných modulů byly nalezeny hotspoty, které byly jednotlivými modely zaznamenány. Dále bylo provedeno vyhodnocení pořízených snímků a jejich vzájemné porovnání. Vzhledem k parametrům udávaných výrobcem byl teoretický předpoklad, že všechny modely bude možné použít pro odhalení právě hotspotů. Zásadním rozdílem tak dle parametrů i výsledů měření zůstává jejich rozlišení a zorné pole – tedy co prostorově vidím na pořízeném termogramu.

Doplňkově bylo provedeno testování vybraných fotovoltaických panelů pomocí metody elektroluminiscence. Podařilo se odhalit konkrétní defekty, které jsou v této kapitole zpracovány. Na fotovoltaických článcích jsem našla defekty způsobené při výrobě, ale hlavně byly odhaleny defekty, které dopomohly k degradaci solárních panelů a poklesu výkonu.

Následuje energetická a finanční analýza, která představuje jak velké finanční ztráty způsobí majiteli fotovoltaické elektrárny pokles výkonu. Tato FVE čerpá podporu formou zeleného bonusu a tedy při snížení dodávek do sítě se sníží její finanční výnos. Vytvořila jsem modely predikující vývoj výkonu a finančního výnosu z FVE do roku 2035. Jelikož si majitel nepřál zveřejnit skutečné hodnoty zeleného bonusu a vyšší finanční výnosnosti fotovoltaické elektrárny, byly tyto hodnoty přepočítány koeficientem  $k$ , aby bylo dosaženo znázornění reálného průběhu i když s použitím fiktivních hodnot.

V rámci prvního modelu je simulována situace, kdy nedošlo k poškození fotovoltaických panelů a poklesu výkonu. S tímto modelem ideální situace jsou pak porovnávány zbylé simulace, kde jsou poškozené panely zastoupené v různé míře.

Druhý model simuluje pokles výkonu do roku 2035 o deset procent. Za celé sledované období zde dochází k poklesu celkového výnosu přibližně o 12 % oproti ideálnímu stavu.

U Modelu 3 s poklesem výkonu o dvacet procent do roku 2035 je již zastoupení poškozených panelů vyšší. To má vliv nejen na výkon, ale i na vyšší finančního výnosu v průběhu let. Za celé analyzované období došlo k poklesu výnosů o necelých 24 % oproti Modelu 1, který představuje ideální průběh.

Poslední Model 4 vytváří nejméně příznivý průběh v následujících letech a to pokles výkonu o 30 %. V porovnání se situací v prvním modelu, zde dochází ke značným ztrátám a to až o třetinu celkového výnosu za simulované období.

V rámci této fotovoltaické elektrárny bych vzhledem k již zaznamenanému poklesu a finanční ztrátě doporučila výměnu solárních panelů. Dále bych doporučila pořízení bateriového úložiště, čímž se zvýší soběstačnost, sníží se odběry ze sítě a dojde tak k finanční úspoře. Při dodržení výkonu elektrárny nepovedou tyto změny ke ztrátě zeleného bonusu.

## LITERATURA

- [1] *Energie ze Slunce*. Online. Pozorování Slunce. Dostupné z: <https://pozorovanislunce.eu/slunce/energie-ze-slunce.html>. [cit. 2023-10-25].
- [2] *O Slunci a záření*. Online. Svět energie. 2020. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/obnovitelne-zdroje-energie-pro-deti/slunecni-energie-pro-deti/o-slunci-a-zareni/slunce>. [cit. 2023-10-25].
- [3] MASTNÝ, Petr; DRÁPELA, Jiří; MIŠÁK, Stanislav; MACHÁČEK, Jan; PTÁČEK, Michal et al. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Online. Praha, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/cvut-2-oze.pdf>. [cit. 2023-10-25].
- [4] *Teorie fotovoltaiky*. Online. ISOF ENERGY. C2009. Dostupné z: <http://www.isofenenergy.cz/fotovoltaika.aspx>. [cit. 2023-10-29].
- [5] *Fotovoltaika v podmínkách České republiky*. Online. ISOF ENERGY. C2009. Dostupné z: <http://www.isofenenergy.cz/Slunecni-zareni-v-CR.aspx>. [cit. 2023-11-01].
- [6] *Fotovoltaické systémy pro výrobu elektřiny*. Online. CNE. C2023. Dostupné z: <https://www.cne.cz/fotovoltaicke-systemy/uvod-do-fv-systemu/>. [cit. 2023-11-01].
- [7] *Solární energie*. Online. KUSALA, Jaroslav. ČEZ. 2006. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/solar.htm>. [cit. 2023-11-01].
- [8] *Fotovoltaika a fotovoltaický jev*. Online. Solární liga. 2015. Dostupné z: <http://www.solarniliga.cz/fotovoltaika-a-fotovoltaicky-jev/>. [cit. 2023-11-11].
- [9] FINSTERLE, Tomáš. *Diagnostika degradace fotovoltaických článků a modulů*. Online, Disertační práce, vedoucí prof. Ing. Vítězslav Benda, CSc. Praha: ČVUT, 2021. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/93944/F3-D-2021-Finsterle-Tomas-Disertace%20Finsterle-1.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. [cit. 2023-11-11].
- [10] PALLOVÁ, Ivana. *Inovace fotovoltaické elektrárny o bateriové úložiště*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/142738>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Jiří Vaněk
- [11] *Konstrukce a výroba fotovoltaických článků a panelů*. Online. Dostupné z: <https://publi.cz/books/91/03.html#3-1>. [cit. 2023-11-11].
- [12] *CIGS Solar Cell Technology*. Online. DS New Energy. 2019. Dostupné z: <https://www.dsnerg.com/info/cigs-solar-cell-technology-32692187.html>. [cit. 2023-11-19].
- [13] ZIMMERMANN, Martin. *Komplexní diagnostika fotovoltaických systémů*. Online, Bakalářská práce, vedoucí Ing. Tomáš Finsterle. Praha: ČVUT, 2015. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/61942/F3-BP-2015-Zimmermann-Martin->

- Komplexni\_diagnostika\_fotovoltaickych\_systemu.pdf?sequence=2&isAllowed=y . [cit. 2023-11-19].
- [14] *Vědci zdokonalili perovskité články*. Online. Solární novinky. 2023. Dostupné z: <https://www.solarninovinky.cz/vedci-zdokonalili-perovskitove-clanky/>. [cit. 2023-11-19].
- [15] *Fotovoltaické články a panely jako prostředek k využití solární energie*. Online. AGROjournal. 2016. Dostupné z: <https://www.agrojournal.cz/clanky/fotovoltaicke-clanky-a-panely-jako-prostredk-k-vyuziti-solarni-energie-169>. [cit. 2023-11-20].
- [16] KLADIVA, Roman *Dlouhodobé sledování parametrů fotovoltaických panelů*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav Elektrotechnologie, 2013. 98 s. Vedoucí práce byl Ing. Roman Gvritishvili [cit. 2023-11-20].
- [17] MALÝ, M. *Charakteristické vlastnosti luminiscenčního záření solárních článků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 37s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Radek Stojan. [cit. 2023-11-20].
- [18] *Solar PV Module Faults And Failings*. Online. DS New Energy. 2019. Dostupné z: <https://www.dsnerg.com/info/solar-pv-module-faults-and-failings-41440985.html>. [cit. 2023-11-25].
- [19] *Mechanismus vzniku a šíření vady fotovoltaických modulů známé jako šnečí cestičky*. Online. ASB. 2019. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/technicka-zarizeni-budov/fotovoltaika/mechanismus-vzniku-a-sireni-vady-fotovoltaickych-modulu-zname-jako-sneci-cesticky>. [cit. 2023-11-25].
- [20] *Detekce vad fotovoltaických panelů*. Online. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/18366-detekce-vad-u-fotovoltaickych-panelu>. [cit. 2023-11-25].
- [21] KLEČKA, Tomáš. *Metody identifikace vad FV panelů*. Online, Bakalářská práce. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2013. Dostupné z: [https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/7254/1/BP\\_KLECKA\\_2013.pdf](https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/7254/1/BP_KLECKA_2013.pdf). [cit. 2023-11-25].
- [22] BOTEK, Martin. *Měření emisivity povrchů*. Online, Bakalářská práce. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2012. Dostupné z: <http://digilib.k.utb.cz/handle/10563/22203>. [cit. 2023-12-08].
- [23] JURSA, Dominik. *Emisivita materiálů v závislosti na vlnové délce záření*. Online, Bakalářská práce. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2019. Dostupné z: [https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/136000/JUR0289\\_FBI\\_B3908\\_3908R005\\_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/136000/JUR0289_FBI_B3908_3908R005_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y). [cit. 2023-12-08].
- [24] *Emissivity values of common materials*. PDF. Fluke Corporation, 2013. [cit. 2023-12-08].

- [25] SOVA, Jan a KOVÁŘ, Jan. Termokamery a pyrometry. Online. *Automa*. 2014, roč. 2014, č. 2, s. 16-22. Dostupné z: [https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf\\_articles/52891.pdf](https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/52891.pdf). [cit. 2023-12-08].
- [26] *Princip a funkce*. Online. Termokamera. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/>. [cit. 2023-12-15].
- [27] *Spot Size Calculator*. Online. HANGZHOU MICROIMAGE SOFTWARE CO. Hikmicrotech. C2023. Dostupné z: <https://tool.hikmicrotech.com/product-params>. [cit. 2023-12-15].
- [28] *GHV Trading*. Online. C1991-2023. Dostupné z: <https://www.ghvtrading.cz/>. [cit. 2023-11-28].

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

|          |                                   |
|----------|-----------------------------------|
| EVA      | etylvinylacetát                   |
| PFV      | polyvinylidenfluorid              |
| PET      | polyetyléntereftalá               |
| $U_{0c}$ | napětí naprázdno                  |
| $I_{sc}$ | proud nakrátko                    |
| $U_{mp}$ | napětí pro maximální výkon článku |
| $I_{mp}$ | proud pro maximální výkon článku  |
| MPP      | bod maximálního výkonu            |
| FF       | činitel plnění                    |
| $\eta$   | účinnost                          |
| STC      | standardní testovací teplota      |
| AM       | Air Mass                          |
| NETD     | Teplotní citlivost                |