

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Kontrolní měření malé fotovoltaické elektrárny**

## ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2019/2020

### ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	<b>Bc. Stanislav RANDA</b>
Osobní číslo:	<b>E18N0060P</b>
Studijní program:	<b>N2612 Elektrotechnika a informatika</b>
Studijní obor:	<b>Elektroenergetika</b>
Téma práce:	<b>Kontrolní měření malé fotovoltaické elektrárny</b>
Zadávací katedra:	<b>Katedra elektroenergetiky a ekologie</b>

#### Zásady pro vypracování

1. Popište parametry a jednotlivé komponenty analyzovaného FV systému.
2. Porovnejte softwareovou simulaci výroby s reálnými hodnotami.
3. Proveďte kontrolu FV systému pomocí termovize a analyzátoru V-A charakteristik.
4. Zhodnoťte výsledky měření a navrhněte doporučení k odstranění případných problémů.


Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**  
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**


Seznam doporučené literatury:

1. přednášky KEE/SOES

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Milan Bělik, Ph.D.**  
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **4. října 2019**  
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2020**

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

  
LS.

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

V Praze dne 4. října 2019

Dodatek k zadání Diplomové práce Fakulty elektrotechnické v akademickém roce 2019/2020.

V návaznosti na mimořádné opatření Ministerstva zdravotnictví České republiky vydané v souvislosti s onemocněním COVID-19, týkajícího se mimo jiné zákazu osobní přítomnosti studentů v prostorách vysoké školy, která zahrnuje veškerou výuku (prováděnou např. formou přednášek, seminářů nebo konzultací), tak konání zkoušek pro studenty bakalářského a navazujícího magisterského studia, vedoucí Diplomové / Bakalářské práce, především s ohledem na nutnost využití infrastruktury FEL při vypracování kvalifikační práce v období mimořádného opatření a v plné míře s přihlédnutím k realizovatelnosti práce po dobu trvání mimořádného opatření, upravuje body zadání práce takto:

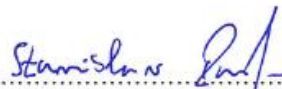
1. Proved'te kontrolu FV systému pomocí termovize a analyzátoru V-A charakteristik na **Proved'te kontrolu stavu dlouhodobě provozovaného FV systému**

V Plzni dne 4.5.2020



.....  
Vedoucí práce: Ing. Milan Bělík, Ph.D

Beru na vědomí a souhlasím v Plzni dne 4.5.2020



.....  
Student: Stanislav Randa E18N0060P

prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D. Digitálně podepsal prof.  
Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.  
Datum: 2020.05.05 11:04:50  
+02'00'

.....  
prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.

děkan Fakulty elektrotechnické  
Západočeské univerzity v Plzni

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na kontrolní měření malé fotovoltaické elektrárny, konkrétně elektrárny o výkonu 20 kWp. V práci jsou popsány parametry elektrárny, dále je provedena softwarová simulace a porovnání výsledků s reálnými hodnotami. V další části je popsáno měření za pomoci termokamery. Pomocí zhodnocení měřící části je určeno, které konkrétní panely jsou poškozené či vadné. Poslední část práce je zaměřena na zhodnocení výsledků a návrhu odstranění nedostatků.

## **Klíčová slova**

Fotovoltaická elektrárna, fotovoltaický článek, termokamera, termovizní měření, fotovoltaický modul, intenzita slunečního záření, V-A charakteristika, výkonová charakteristika, dioda, střídač, teplota

## **Abstract**

The diploma thesis is focused on control measurement of small photovoltaic power plant, specifically power plant with 20 kWp. In the thesis are described the parameters of the power plant, then the software simulation and comparing the results of the simulation with real values. The next section describes the measurement with a thermal camera. The evaluation of the measuring part determines which concrete panels are damaged or defective. The last part of the work is focused on the evaluation of the results and the proposal to eliminate the problems.

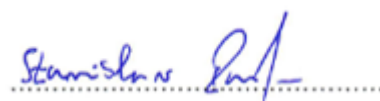
### Key words

Photovoltaic power plant, photovoltaic cell, thermocamera, thermovision measurement, photovoltaic module, solar radiation intensity, V-A characteristic, power characteristic, diode, inverter, temperature

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.



Podpis

V Plzni dne 02.06.2020

Bc. Stanislav Randa

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Milanu Bělíkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.



# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>9</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>11</b>
<b>1 POPIS PARAMETRŮ FV SYSTÉMU</b> .....	<b>12</b>
1.1 FV MODULY.....	13
1.1.1 <i>Technické parametry FV modulů</i> .....	14
1.2 STŘÍDAČE FVE.....	15
1.2.1 <i>Použité střídače</i> .....	16
1.3 PŘIPOJOVACÍ SKŘÍŇ FV GENERÁTORŮ.....	17
1.4 ROZVADĚČ FVE.....	18
1.5 KABELY A VEDENÍ FVE.....	19
1.6 MĚŘENÍ A REGULACE.....	20
1.6.1 <i>Měření</i> .....	20
1.6.2 <i>Regulace</i> .....	21
1.7 GEOGRAFICKÉ UMÍSTĚNÍ A VOLBA INSTALACE.....	22
<b>2 SOFTWAREVÁ SIMULACE A POROVNÁNÍ S REÁLNÝMI HODNOTAMI</b> .....	<b>25</b>
2.1 ODHAD VÝNOSU A SIMULACE.....	26
2.2 SIMULACE V PROGRAMU PVSYSYST.....	28
2.3 VÝSLEDKY SIMULACE.....	31
2.4 DIAGRAM ZTRÁT.....	32
2.5 REÁLNÁ VÝROBA.....	33
2.6 POROVNÁNÍ REÁLNÉ VÝROBY A SIMULACE.....	34
<b>3 KONTROLA STAVU DLOUHODOBĚ POUŽÍVANÉHO FV SYSTÉMU</b> .....	<b>35</b>
3.1 ZÁKLADNÍ KONTROLA FOTOVOLTAICKÉHO SYSTÉMU POMOCÍ TERMOKAMERY.....	36
3.2 FOTOVOLTAICKÝ ČLÁNEK.....	36
3.3 V-A CHARAKTERISTIKY FV ČLÁNKU.....	39
3.3.1 <i>Základní parametry FV článku</i> .....	40
3.4 VLIV POČASÍ NA FV ČLÁNKY.....	41
3.5 TERMOKAMERA FLIR T335.....	43
3.6 TERMOVIZNÍ MĚŘENÍ.....	44
3.7 SPRÁVNÝ POSTUP MĚŘENÍ A VLASTNÍ MĚŘENÍ.....	45
3.8 DIAGNOSTIKA VAD SYSTÉMU.....	47
3.9 VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	48
<b>4 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ A NÁVRH DOPORUČENÍ K ODSTRANĚNÍ PŘÍPADNÝCH PROBLÉMŮ</b> .....	<b>55</b>
4.1 MĚŘENÍ TERMOKAMEROU.....	56
4.2 SIMULACE A POROVNÁNÍ HODNOT SE SKUTEČNOU VÝROBOU.....	57
4.3 DOPORUČENÍ K ODSTRANĚNÍ NEDOSTATKŮ.....	59
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>60</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>62</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>64</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>64</b>
<b>SEZNAM GRAFŮ</b> .....	<b>64</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>65</b>

## Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na kontrolní měření malé fotovoltaické elektrárny. Mnou zvolená elektrárna se nachází na střeše budovy Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Jedná se o elektrárnu s výkonem 20 kWp.

Práce je rozdělena do čtyř hlavních částí. První a druhá část jsou z větší části teoretické, naopak části tři a čtyři více praktické. V první části své práce se budu věnovat podrobnému popisu komponent dané fotovoltaické elektrárny a jejímu umístění. Ve druhé části je mým úkolem provést softwarovou simulaci a porovnat její výsledky s reálnými hodnotami. Třetí část práce je hlavně měřicí, přičemž budu provádět kontrolu fotovoltaické elektrárny pomocí termovize. V závěru práce se budu věnovat zhodnocení účinnosti elektrárny, stupni degradace a návrhu doporučení k odstranění případných nedostatků.

Využívání obnovitelných zdrojů je v současné době na vzestupu, ať už kvůli jejich dostupnosti a jednoduchosti, či s přihlédnutím k nařízením o výrobě elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Konkrétně fotovoltaické elektrárny jsou oblíbené pro svoji jednoduchost a možnost umístění téměř kdekoliv. Solární elektrárny přeměňují sluneční energii za pomoci FV panelů na elektrickou energii. Dalším plusem je neustálý vývoj fotovoltaických panelů a tím jejich vyšší efektivita a při značné výrobě i nižší cena. Z tohoto důvodu můžeme vidět FV panely na stále větším počtu polí, ale i střeš domácností.

FVE má velkou výhodu v tom, že je takřka bezúdržbová. Není potřeba žádná pravidelná speciální kontrola, obsluha a manipulace. Jedna z mála věcí, na které se musí dát pozor je instalace na správné místo a udržování panelů čistých. Důležitá je kontrola v určitém časovém horizontu pro případnou detekci chyb jako prasklé panely a nefunkční diody. Je více různých druhů měření pro zjišťování funkčnosti elektrárny. Pro základní kontrolu fotovoltaického systému poslouží hlavně měření pomocí termovize, které je velmi snadné a časově nenáročné. Termovizní měření nám pomůže odhalit skryté vady fotovoltaických modulů.

## Seznam symbolů a zkratk

- FVE..... Fotovoltaická elektrárna
- FV..... Fotovoltaický
- STC..... Standardní zkušební podmínky
- VOC..... Napětí naprázdno
- ISC..... Zkratový proud
- VMAX .....Maximální systémové napětí
- MPP .....Bod maximálního výkonu
- V-A (I-V)..... Voltampérová
- nn .....Nízké napětí
- PMPP (P<sub>MAX</sub>) ..Jmenovitý maximální výkon
- VMPP .....Napětí při maximálním výkonu
- IMPP .....Proud při maximálním výkonu
- $\eta$ STC .....Jmenovitá účinnost solárního panelu
- UV ..... Ultrafialové záření
- E<sub>real</sub>.....Skutečný energetický výnos
- e ..... Intenzita slunečního záření
- E<sub>ideal</sub>.....Teoreticky očekávaný energetický výnos
- GlobHor..... Globální horizontální záření
- DiffHor ..... Difúzní horizontální záření
- E<sub>Array</sub> ..... Energie na výstupu ze solárního generátoru
- E<sub>Grid</sub> ..... Energie dodaná do sítě
- T<sub>Amb</sub>..... Okolní teplota
- PID..... Potenciální induktivní degradace

# 1 Popis parametrů FV systému

Měřený fotovoltaický systém se nalézá na střeše budovy Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity a dosahuje výkonu 20 kWp. Výstavba započala v roce 2003 a byla dokončena v roce 2004. V době spuštění se jednalo o jednu z největších fotovoltaických instalací v České republice. Jednotlivé panely jsou přichyceny ke kovové konstrukci. Konstrukce na střeše je tvořena ocelovými rámy, které jsou uchycené do stávající konstrukce střechy. Nosné rámy jsou provedeny z uzavřených profilů a součástí stavby je i příčné zavětrování. Základní parametry fotovoltaického systému jsou fotovoltaické moduly, střídače FVE, přípojovací skříň FV generátoru, rozvaděče FVE, kabely a vedení FVE, měřicí přístroje a v neposlední řadě geografické umístění.



Obrázek 1 Fakulta elektrotechnická [17]

## 1.1 FV moduly

Fotovoltaický systém je tvořen 192 panely o celkovém výkonu 20 kWp rozdělenými do 8 samostatných polí. Každé z těchto polí je připojeno ke svému střídači, který bude vyrobenou energii dodávat do sítě nn v budově. V každém fotovoltaickém panelu je použito 72 monokrystalických článků z křemíku pro svoji vysokou účinnost a dlouhou životnost. Články jsou tmavě modré, což zajišťuje nejvyšší účinnost při nejpriznivější ceně. V každém jednotlivém poli je 24 FV modulů, které jsou dále rozděleny na 3 větve po 8 modulech a jsou zapojeny sérioparalelně. FV panely jsou umístěny na jižní straně střechy vždy po 6 panelech nad sebou. Panely jsou připevněné pod úhlem  $45^\circ$  na šikmé kovové konstrukci. Celková instalovaná plocha je  $164 \text{ m}^2$ . Všechny panely jsou dodané od firmy Isofotón s.r.o. ze Španělska s typovým označením I-110/24. Díky způsobu uložení panelů, jsou snadno dostupné jak z přední, tak i ze zadní části, což je velice výhodné vzhledem k výukovým možnostem či měření.



Obrázek 2 Umístění FV modulů [18]

### 1.1.1 Technické parametry FV modulů

Každý výrobce fotovoltaických modulů udává jednotlivé technické parametry daného výrobku. Konkrétní parametry systému jsou uvedeny v technické dokumentaci, nebo na štítku, který je připevněn k zadní části panelu. Tyto hodnoty jsou zjištěny experimentálně v laboratoři za pevně daných světelných a tepelných podmínek. Měření veličin v laboratoři má tu výhodu, že můžeme porovnávat účinnosti různých FV systémů nezávisle na roční době, či geografickém umístění. Pokud chceme porovnávat měřené elektrické parametry, je důležité použít čidlo teploty a referenční článek k měření slunečního svitu. Z těchto dvou parametrů je analyzátor schopen přepočítat změřené napětí a proud na standartní zkušební podmínky (STC) a můžeme námi změřené hodnoty porovnat s informacemi od výrobce.

<b><i>Elektrické charakteristiky</i></b>	
STC jmenovitý výkon PMPP (W)	110
Napětí naprázdno VOC (V)	43,2
Zkratový proud ISC (A)	3,38
Napětí při maximálním výkonu VMPP (V)	34,8
Proud při maximálním výkonu IMPP (A)	3,16
Jmenovitá účinnost panelu $\eta_{STC}$ (%)	12,9
Faktor plnění FF (%)	75,3
Tolerance výkonu	-
Maximální systémové napětí VMAX (V)	760
<b><i>Teplotní koeficienty</i></b>	
Teplotní koeficient ISC	
Teplotní koeficient VOC (%/°C)	-0,37
Teplotní koeficient PMPP	
<b><i>Mechanická charakteristiky</i></b>	
Typ článků	monokrystalické
Velikost buněk	
Počet buněk	72

Tabulka 1 Parametry FV modulu I-110/24



## 1.2 Střídače FVE

Fotovoltaické systémy pracují se stejnosměrným proudem. Jedná se o přímou přeměnu slunečního záření na elektrickou energii prostřednictvím takzvaného fotoelektrického jevu. V zásadě jde o vzájemné působení dopadajícího slunečního záření a dotovaných polovodičů, kdy dochází k uvolňování a následnému odvodu elektrických nosičů nábojů za pomoci kovových kontaktů. Takto vyrobená elektrická energie se dá využívat jako stejnosměrný zdroj, nebo častěji za pomoci invertorů jako střídavý zdroj. Střídače mají za úkol přeměnit stejnosměrné napětí na napětí požadované v síti, u nás v ČR se jedná o hladinu 230/400 V a frekvence 50 Hz. Účinnost střídačů bývá velmi vysoká, a to hlavně díky jejich provedení, protože většina z nich pracuje s výkonovou elektronikou. Účinnost střídačů však závisí na jejich zatížení a nejlepších výsledků dosahují při maximálním výkonu fotovoltaického systému. Z hlediska poruchovosti se jedná o nejméně ohroženou část celého systému. Z dlouhodobé praxe a měření vyplynula statistika, že střídač vydrží v bezporuchovém stavu přibližně 8 let. Z tohoto důvodu je vhodné střídače častěji kontrolovat, opravovat nebo v krajním případě i vyměnit. Udávaná životnost FV systému se pohybuje od 15 do 20 let, a tudíž je střídač součástí s kratší životností. Nejčastější typy poruch jsou výpadky pojistek, poruchy v síti nebo bouřky. Důležité je mít střídač správně dimenzovaný, aby nedocházelo k přetěžování. Jedná se o součástku, která se sice může přetěžovat, ale jen krátkodobě. [1], [3]



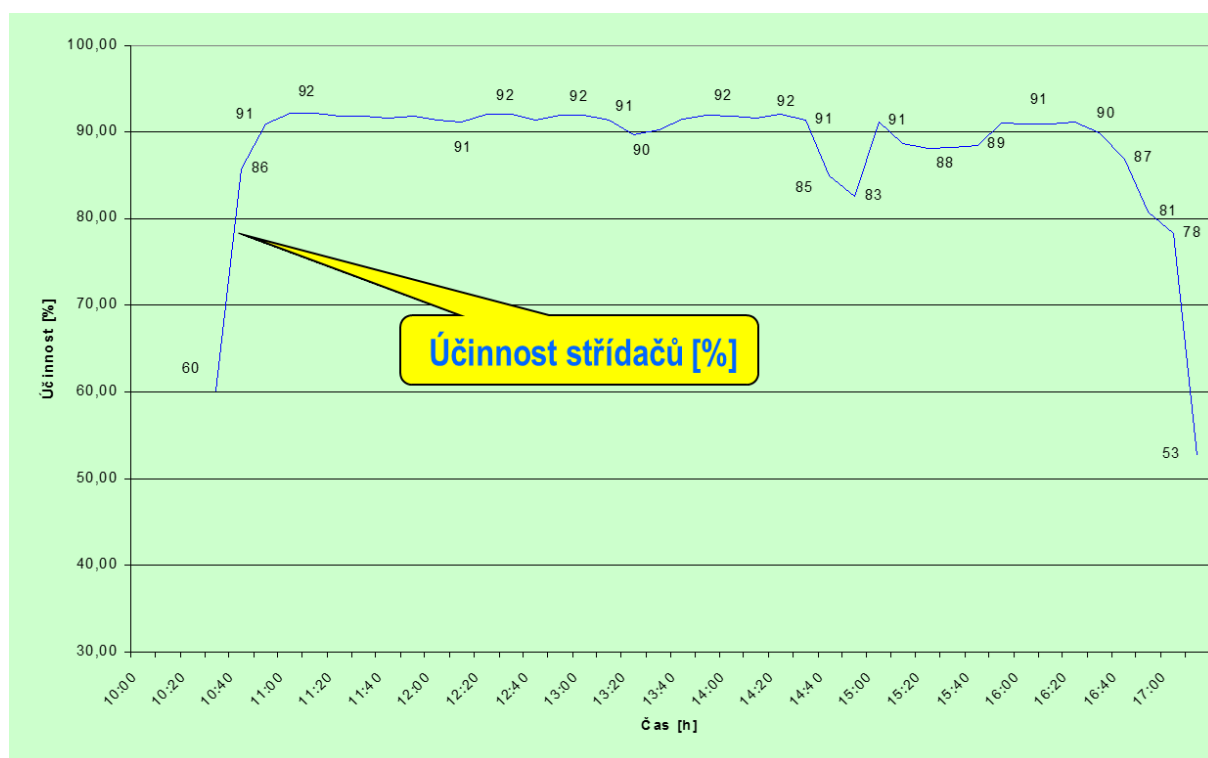
Obrázek 3 Střídače FVE [19]

### 1.2.1 Použité střídače

Střídače, které jsou použity ve zvoleném fotovoltaickém systému zajišťují přímou dodávku vyrobené solární elektřiny náfázováním na místní síť 230 V, 50 Hz. Jedná se o střídače typu SunProfi typ SP 2500-450. Je zde použito celkem 8 střídačů, pro každé pole jeden. Střídače jsou dále vybaveny bezpečnostní ochranou, která automaticky odpojí FV panely od sítě při poklesu napětí v síti a mají datový výstup pro komunikaci s řídicím PC a sběr dat.

Jmenovitý výkon (25 °C)	3100 W
Vstupní napětí (MPP min)	196 Vdc min
Vstupní napětí (Voc max)	450 Vdc max
Rozvodná síť	230 Vac / 50 Hz
Proud	11 Aac max
Teplota (Ta)	0 - 40 °C

Tabulka 2 Štítkové hodnoty střídače



Obrázek 4 Účinnost střídačů [2]



### 1.3 Připojovací skříň FV generátorů

Jestliže se FV systém skládá z více větví, je zapotřebí použít připojovací skříň. Mnou měřená fotovoltaická elektrárna se skládá ze 192 panelů, rozdělených do 8 poli E1-E8, v každém poli je 24 panelů, které jsou rozděleny na tři větve po 8 modulech a jsou zapojeny sérioparalelně. Z tohoto důvodu je tedy zřejmé, že je v dané elektrárně potřebné použití připojovacích skříní FV generátorů.

V připojovací skříni jsou připojovací svorky a oddělovací místa, popřípadě pojistky a diody. Připojovací skříň FV generátoru by měla být provedena v ochranné třídě II a mít jasně oddělené kladné a záporné strany uvnitř skříně. Pokud je připojovací skříň umístěna venku, měla by být zajištěna krytím IP 54 a odolností vůči UV záření.

Pojistky větví chrání vedení před přetížením v případě poruchy. Musí být vhodné jak pro stejnosměrný provoz, tak pro speciálně se měnící provoz vzhledem k zatížení. Pojistky nejsou nezbytné, pokud se jedná o zařízení v ochranné třídě II. [3]



Obrázek 5 Připojovací skříň FVE [20]

## 1.4 Rozvaděč FVE

Rozvodná skříň je umístěna ve stejné místnosti jako střídače. Rozvaděč obsahuje elektrické přístroje sloužící k jištění, měření, ovládání elektroinstalace a elektroměr. Z rozvaděče mohou rovněž vystupovat další kabelové přípojky k jiným zařízením, ať už podružným rozvaděčům, či například zásuvkám. Jsou vyrobeny z plastu nebo ocelového plechu, s průhlednými či neprůhlednými dveřmi. Rozvodné skříně jsou vyráběny nejčastěji se stupněm krytí IP20, v případě venkovních, či vlhkých prostor IP67.

Hlavním úkolem rozvodné skříně, ať už u fotovoltaiky, nebo u jiného systému, je propojení zařízení s místní sítí, v případě tohoto konkrétního rozvaděče FVE se sítí nn. Do rozvodné skříně jsou zavedeny kabely z fotovoltaického systému. Elektrické propojení, realizované přes rozvodnou skříň musí splňovat všechny technické a připojovací podmínky na síť a platné normy.



Obrázek 6 Rozvaděč FVE [21]

## 1.5 Kabely a vedení FVE

Elektrická propojovací vedení mezi jednotlivými solárními moduly a vedení k připojovací skříni nebo ke střídači musí být položena tak, aby bylo zamezeno případným vzájemným zkratům a zkratům se zemí. Vedení by neměla ležet na povrchu střechy, ale na konstrukci systému a ideálně uložena ve stíněném prostoru. Ve venkovním prostoru je vhodné používat kabely s vysokou odolností, ať už vůči teplotám, či UV záření. Důležité je taktéž vyhnout se kontaktu kabelů a vedení s ostrými hranami, které by případně mohly poškodit izolaci a způsobovat poruchy v celém systému.

Celkové provedení kabelových rozvodů musí odpovídat platné normě, stejně tak jako jejich barevné značení. Jednotlivé kabely musí být na obou koncích viditelně označeny štítky, zejména pro případ zjišťování poruchy, či manipulace. Kabelové prostupy mezi jednotlivými požárními úseky je nutné utěsnit protipožární hmotou s požadovanou protipožární odolností.

Dalším důležitým krokem je snaha co nejvíce minimalizovat délku vedení. Jde o logický krok ze strany provozovatele elektrárny, ať už z pohledu ceny kabelů a vedení nebo z pohledu ztrát na vedení a bezpečnosti. Kabely by měly být dimenzovány tak, aby jejich ztráta dosahovala při jmenovitém zatížení méně než 1 %. V případě dlouhých vedení se tolerují maximální ztráty do 2 %. Je povinností provozovatele dodržovat napěťovou pevnost a proudovou zatížitelnost dle platné normy. [3]

Připojovací vedení střídavého proudu propojuje střídač přes elektroměr a ochranná zařízení se sítí nn. Připojení na nízkonapěťovou síť se provádí třípólovým vedením u jednofázového střídače a pětipólovým vedením u třífázového vedení.

Ve zkoumaném systému jsou pro silnoproudé připojení užívány Cu kabely typu CYKY, pro slaboproudé a datové připojení kabely FTP typu 4x2x0,5. Venkovní kabely jsou vedeny na kovové upevňovací konstrukci FV panelů a uloženy v oceloplechových kabelových žlabech typu MARS. Ve vnitřních prostorech jsou kabely uloženy v mezistropěch, pod omítkou nebo na povrchu v PVC lištách. Je nutné udržovat odstup silnoproudého a slaboproudého vedení. Kabelové rozvody musí být provedeny tak, aby neztěžovaly nebo neznemožňovaly údržbu. Dále musí být uloženy tak, aby bylo možné poškozené části opravit či vyměnit.

## 1.6 Měření a regulace

### 1.6.1 Měření

Měření celého fotovoltaického systému zajišťuje osobní počítač s nepřetržitým provozem. Úkolem měřicího systému je sběr základních veličin fotovoltaického systému ze střídačů – výkon, vyrobená energie za den i celková, napětí v síti. Dále probíhá měření a sběr veličin z nezávislých čidel – intenzita záření, teplota vzduchu, teplota fotovoltaických modulů. Čidla poskytují analogové údaje měřicí ústředně, kde je signál po datové lince poslán do počítače a následně zpracován. Při měření probíhá automatický export všech dat do souborů v jednotném formátu zpracovatelném pro aktuální zobrazení na zařízeních vnitřní sítě Západočeské univerzity v Plzni.

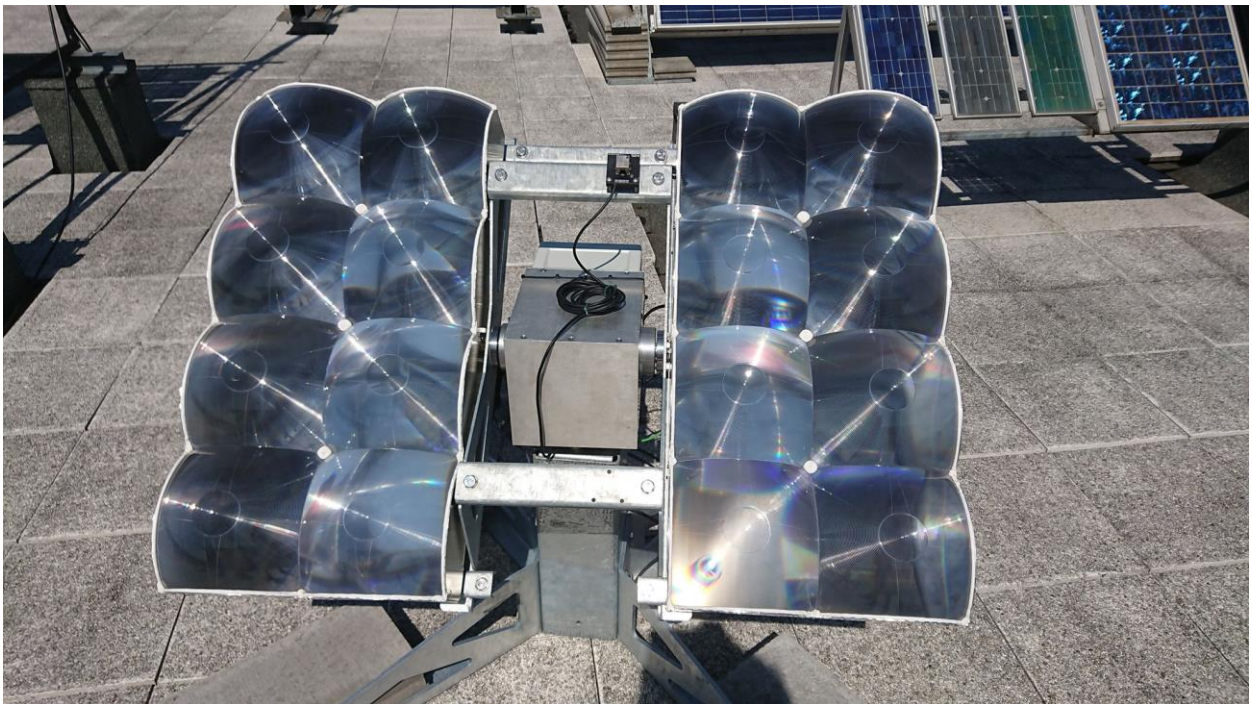
Celkově systém měření umožňuje snímat následující veličiny

- 1) Intenzitu osvětlení fotovoltaického pole [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
- 2) Teplotu čidel intenzity osvětlení FV pole [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- 3) Intenzitu globálního slunečního osvětlení [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
- 4) Teplotu panelů [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- 5) Hodnotu stejnosměrného proudu [A]
- 6) Hodnotu stejnosměrného napětí [V]
- 7) Venkovní teplotu [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- 8) Výkon fotovoltaického pole [W]
- 9) Celková vyrobená energie [kWh]

První výstupní rozhraní je použito pro připojení k počítači. Druhé výstupní rozhraní je připojeno přímo k zobrazovací jednotce, ve které je změřená energie vynásobena počtem fotovoltaických polí (8x) a použita k zobrazení veličin – okamžitý výkon, dodaná energie za den, snížení emisí CO<sub>2</sub>.

### 1.6.2 Regulace

Regulace není u mnou měřeného konkrétní systému možná, přesto se jedná o součást celého systému. Přes program spuštěný na počítači, je možné ovládat polohu trackeru a zobrazovat okamžité hodnoty veličin z připojeného trackeru. V závislosti na volbě obsluhy je možné měnit náklon panelu a tím zkoumat vliv natočení na výkon daného systému. Regulace je proveditelná u experimentální části fotovoltaického systému, který byl dodán společně s klasickou solární elektrárnou.



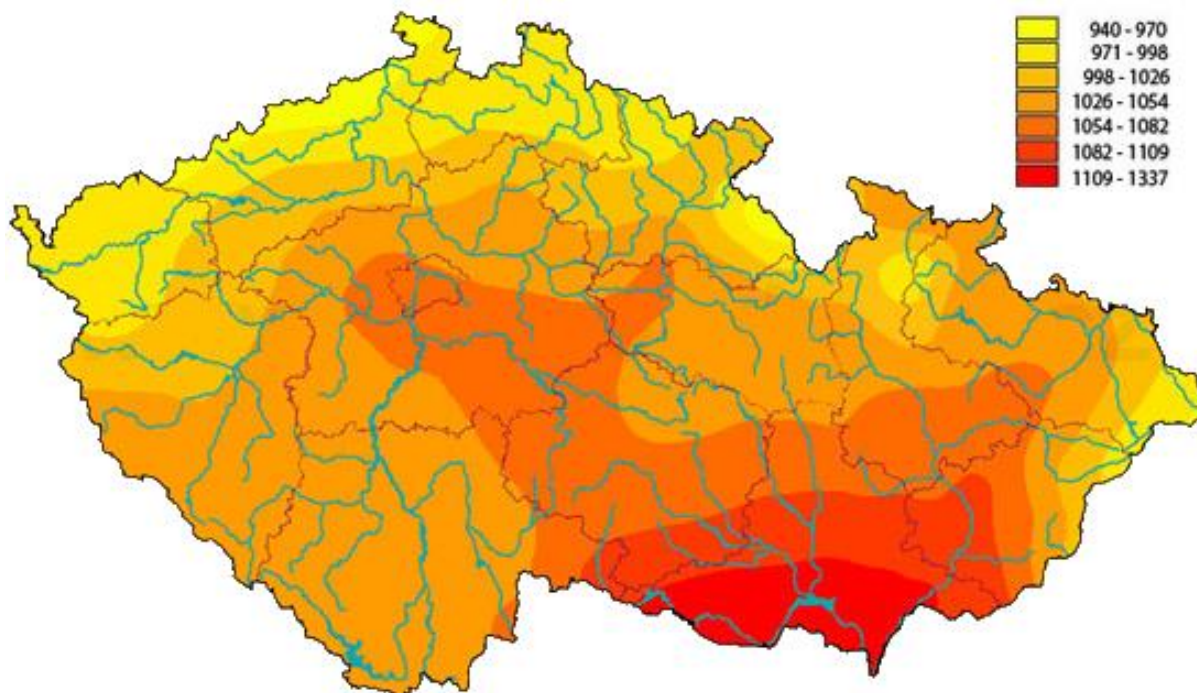
Obrázek 7 Experimentální část FVE



## 1.7 Geografické umístění a volba instalace

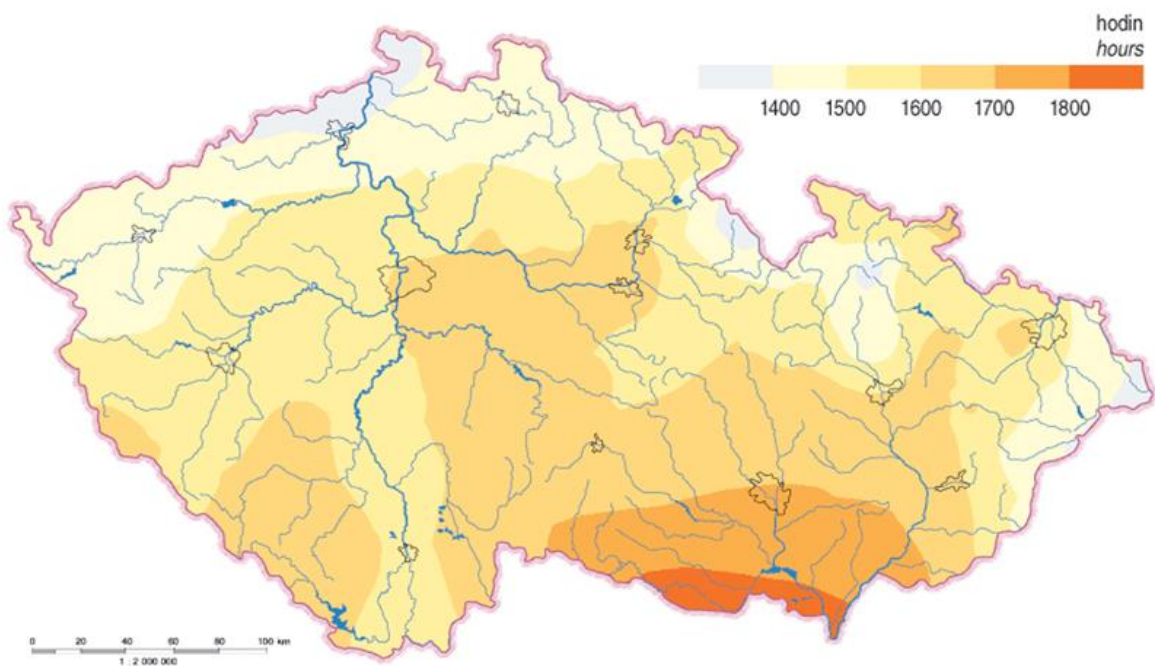
Zkoumaná fotovoltaická elektrárna se nachází na střeše budovy Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Město Plzeň se nachází na západě Čech na řece Berounce. Pro volbu stanoviště fotovoltaického systému je důležitá orientace ke Slunci a pokud možno co nejméně zastíněná plocha. Nejvíce výhodnou z hlediska možnosti namontování fotovoltaických panelů je rovná střecha, na kterou je možno pomocí konstrukce umístit panely pod nejlepším úhlem a se správným natočením ke Slunci.

Sluneční záření dopadající na plochu fotovoltaický panelů se skládá z přímého a difuzního záření (rozptýlené). Za jasných dnů je převládající přímé záření, naopak v případě, že je zataženo se jedná hlavně o difuzní záření. Složení a intenzita záření jsou ovlivňovány počasím, roční dobou a geografickou polohou. Intenzita slunečního záření dopadajícího svisle na atmosférický obal země dosahuje průměrně  $1360 \text{ W/m}^2$ , avšak vlivem průchodu zemskou atmosférou a různými odrazy, rozptyly či pohlcením dopadá na povrch země kolem  $1000 \text{ W/m}^2$ . Pro hrubou orientaci lze použít pravidlo, že při instalovaném výkonu  $1 \text{ kW}$  získáme ročně cca  $1000 \text{ kWh}$  elektrické energie. Na obrázku číslo 8 můžeme vidět průměrnou intenzitu slunečního záření v České republice. [1], [3]



Obrázek 8 Intenzita slunečního záření [4]

Dalším důležitým ukazatelem pro využití sluneční energie je celková doba slunečního svitu na daném území. Podmínky pro využití v České republice jsou poměrně dobré. Na obrázku číslo 9 můžeme vidět dobu trvání slunečního svitu. V oblasti Plzně je to cca 1500 hodin za rok.



Obrázek 9 Doba slunečního svitu [4]

Velmi důležitým parametrem pro maximální využití solární energie je optimální orientace a sklon panelu. Optimální orientace plochy kolektorů je z hlediska dopadající sluneční energie jižní. Maximální ozáření dosáhneme se sklonem asi  $30^\circ$ . Pro srovnání, zisk z ozáření je se sklonem  $30^\circ$  větší asi o 10 % oproti vodorovné ploše. Náklon panelu je výhodný i z hlediska zamezení usazování prachu a nečistot. U ploch se sklonem vyšším než  $12^\circ$  je přítomen takzvaný jev samočištění deštěm, a tudíž není nutné panely omývat ručně. S rostoucím náklonem se jev samočištění zesiluje. Roční ztráty v závislosti na znečištění mohou dosahovat od 1 do 5 procent. [3]





## 2 Softwarová simulace a porovnání s reálnými hodnotami

Softwarová simulace je jedna z nejdůležitějších věcí, které se musí provést před samotnou instalací fotovoltaické elektrárny. Jelikož téměř každý majitel fotovoltaického systému chce mít přirozeně co nejvyšší výnosy, je vhodné na základě meteorologických dat zvolit co nejvhodnější umístění a sklon FV modulů tak, aby bylo dosaženo maximální efektivity.

Výjimku tvoří poměrně nově připojované systémy, kde cílem nemusí být dosažení maximální možné výroby za rok, ale nastavit systém tak, aby poskytoval celoroční zálohu. Takové systémy jsou většinou velmi předimenzované a co se týče celkové výroby elektrické energie za rok také značně neefektivní.

Při projektování fotovoltaiky musíme mít na paměti, že ne vždy je možné umístit systém tak, aby dosahoval maximální efektivity.

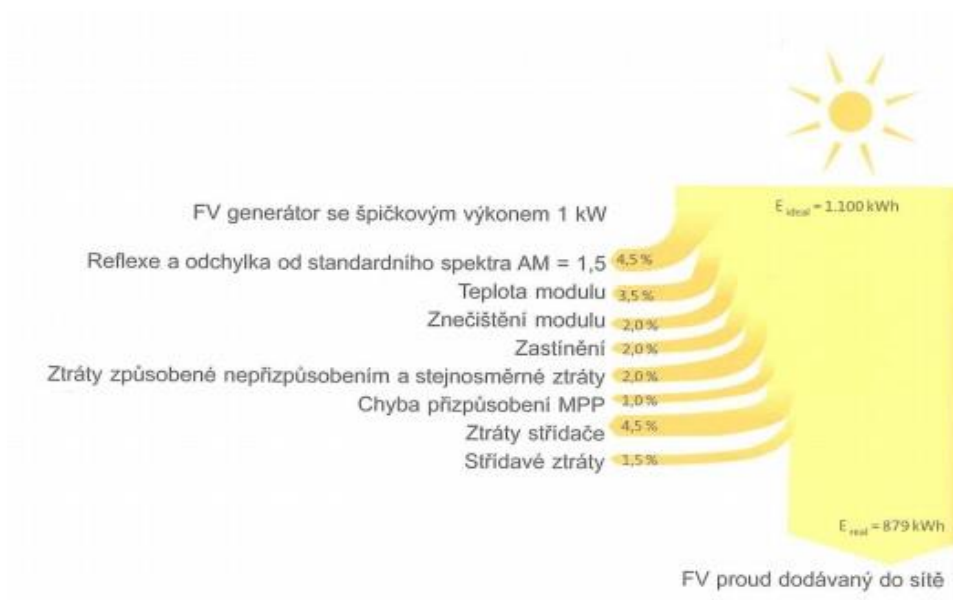
V případě existujících staveb bývá fotovoltaický systém instalován na budovu v době rekonstrukce či sanace. Právě při instalaci na již existující budovy je možné, že se nám nepodaří nainstalovat fotovoltaický systém tak, aby dosahoval maximálního energetického a tím i ekonomického zisku.

Odlišná situace vzniká u nových projektů a staveb. Pokud se s instalací fotovoltaického systému počítá již při návrhu budovy, je nasnadě kontaktovat architekta projektu a s jeho pomocí optimalizovat umístění systému, tak aby bylo možné jej správně využít. Při pozdějším zásahu do již hotových projektů vzniká nedokonalé řešení a tím dochází k navýšení provozních nákladů a ke snížení očekávaných výnosů.

Při projektování nových staveb s fotovoltaickým systémem je velmi důležitá spolupráce architekta a projektanta. Každý odpovídá za jinou část, avšak pouze spoluprací se může dosáhnout optimálních výsledků. Architekt odpovídá za polohu a orientaci budovy, orientaci a sklon střechy. Projektant je oproti tomu zodpovědný za uspořádání modulů, polohu a zapojení větví, umístění vedení, střídače a dále za optimalizaci transportu energie. [3]

## 2.1 Odhad výnosu a simulace

Pro správnou prognózu výnosu musíme brát v potaz kvalitu stanoviště (ozáření sluncem) a jakost záření. Dalšími parametry, které ovlivňují výsledný výnos jsou především ztráty způsobené řadou okolností, například teplota modulu či znečištění.



Obrázek 11 Tok energie a ztráty FV zařízení připojeného do sítě [3]

Na obrázku číslo 11 můžeme vidět jaký vliv mají různé ztráty na celkovém výkonu dodávaném FV generátorem do sítě.

Ideální energetický výnos se spočte jako součin slunečního ozáření, plochy generátoru a jmenovité účinnosti solárních modulů.

$$E_{ideal} = A_{pv} * e * \eta_{tsc}$$

$A_{pv}$  – plocha generátoru [ $\text{m}^2$ ]

$e$  – sluneční ozáření [ $\text{kW}/\text{m}^2$ ]

$\eta_{tsc}$  – jmenovitá účinnost solárního modulu

K hodnocení kvality fotovoltaického zařízení se používá koeficient, který je do značné míry nezávislý na stanovišti. Jedná se o takzvaný koeficient výkonosti (Performance Ratio, PR). Koeficient výkonosti se spočítá jako poměr reálného energetického výnosu zařízení ku ideálnímu energetickému výnosu zařízení.

$$PR = \frac{E_{real}}{E_{ideal}}$$

Pro odhad výnosu bez simulačního programu můžeme použít právě ideální energetický výnos (výše spočítaný) a koeficient PR, který se v závislosti na ztrátách (viz obr – tok energie) pohybuje u střechních zařízení mezi 70 a 85 %. Jednoduchým dosazením do rovnice získáme reálný roční výnos energie FV zařízení.

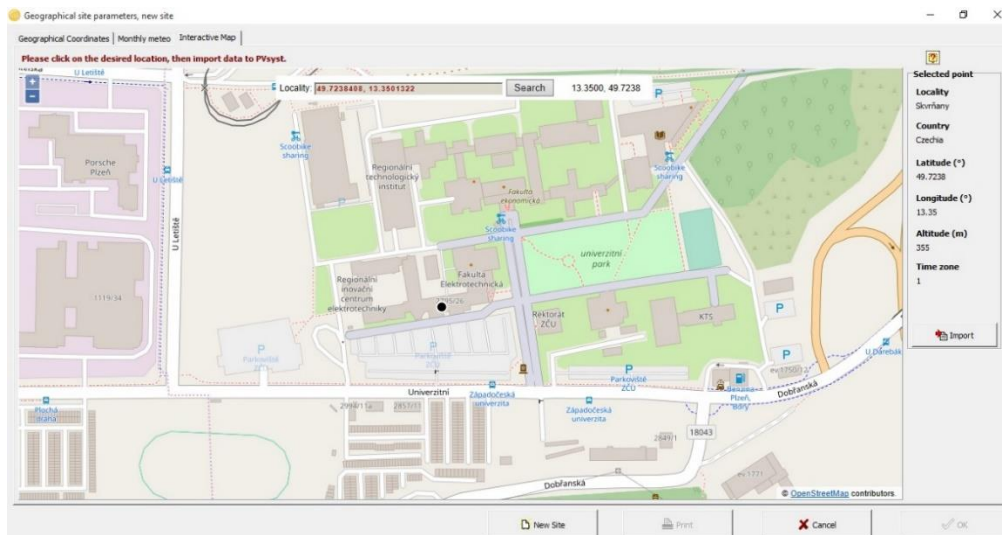
Vzhledem k poměrně vysoké počáteční investici do solárního systému, je vhodné zajištění co nejpřesnější prognózy výroby energie a tím minimalizování rizika ekonomické ztráty. Proto se před samotnou instalací doporučuje užití specializovaných programů pro simulování výroby elektrické energie. Programů pro simulování výroby elektrické energie je celá řada. Od těch nejjednodušších až po složité systémy s komplexními výsledky jako jsou údaje o hospodárnosti a omezení emisí. Řada programů umí také generovat tiskové zprávy obsahující velmi detailní popis samotného systému, včetně schématu zařízení. Využití těchto tiskových zpráv může napomoci projektantům při jednání se zákazníkem a úspěšné realizaci instalace.

Většina simulačních softwarů provádí kontrolu věrohodnosti parametrů fotovoltaické elektrárny, ale může se stát, že neodpovídají přesně. Proto je výhodné porovnání výsledků simulace s reálnými konkrétními hodnotami z praxe. [3]

Z dostupných programů na internetu jsem pro simulaci výpočtu energie měřené fotovoltaické elektrárny vybral program PVsyst ze stránek: <https://www.pvsyst.com/>. Software PVsyst je k dispozici na měsíc ve zkušební verzi zdarma, což pro naše výpočty bude plně dostačující.

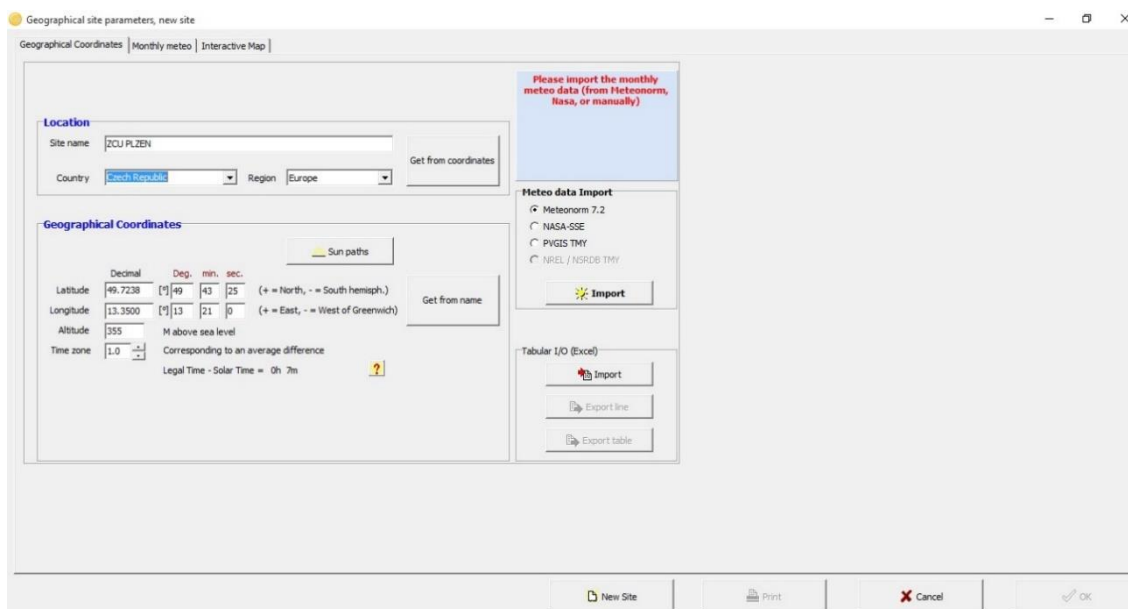
## 2.2 Simulace v programu PVSYST

Po přikročení k vlastní simulaci v programu PVsyst musíme nejprve zvolit přesnou lokaci Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity, kde se nachází měřená elektrárna.



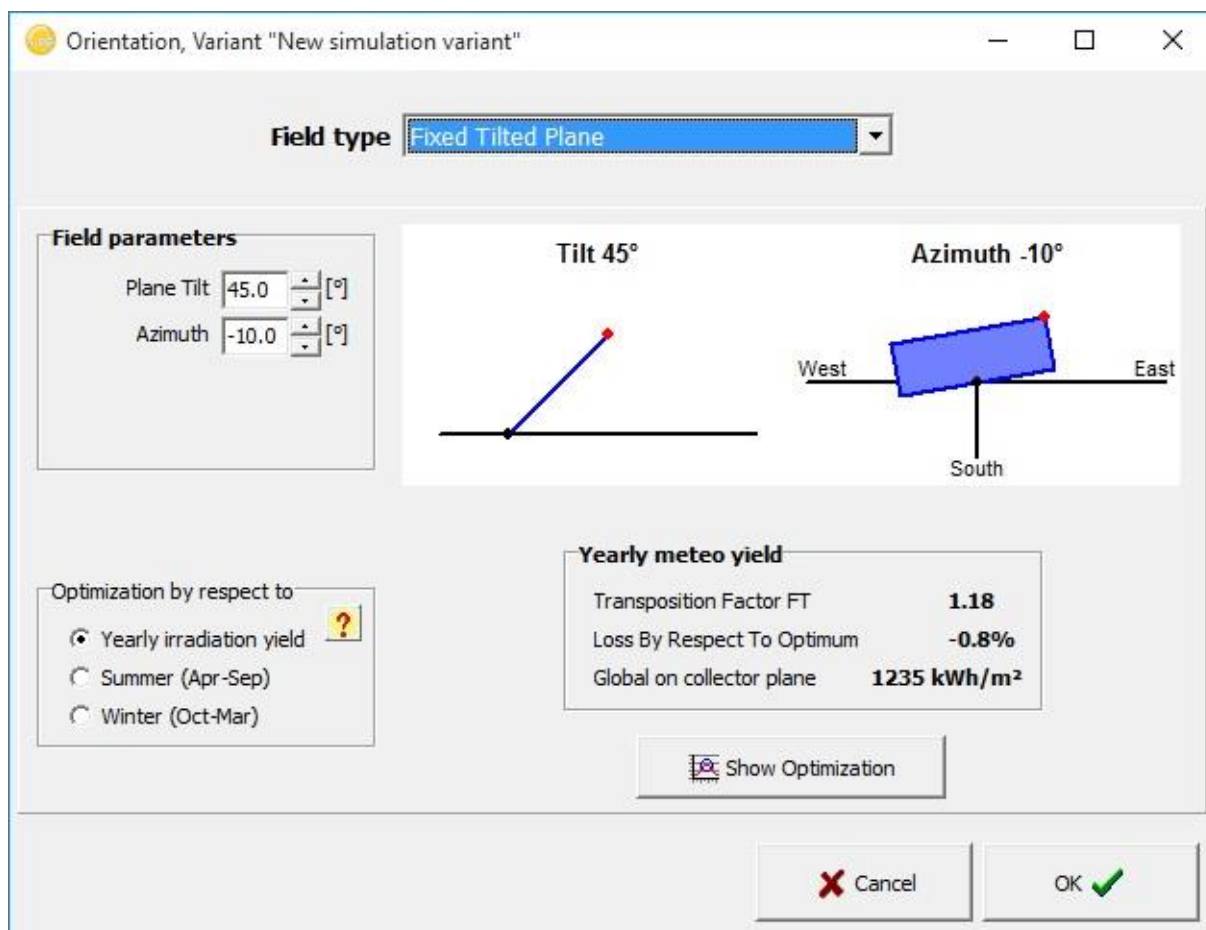
Obrázek 12 GPS poloha

Dále je zapotřebí naimportovat meteorologická data, jejichž zdrojem je Meteonorm 7.2, kde jsou k dispozici meteorologická data téměř pro všechny oblasti na světě.



Obrázek 13 Import dat

Poté co máme určenou přesnou polohu měřeného fotovoltaického systému a získána meteorologická data k dané poloze, můžeme přikročit k samotnému nastavení elektrárny. Jako první se nastavuje orientace systému, která zahrnuje uchycení, naklonění a azimut. Jednotlivé fotovoltaické moduly elektrárny na střeše budovy Fakulty elektrotechnické jsou pevně uchyceny na nakloněné rovině. Moduly jsou ukotveny pod úhlem  $45^\circ$  a azimutem  $-10^\circ$ .



Obrázek 14 Sklon a orientace systému

Na obrázku číslo 14 můžeme vidět nastavení ukotvení, sklonu a azimutu systému. Dále si můžeme všimnout, že konkrétní uložení se pro lokalitu Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity odchyluje pouze o 0,8 % od ideálního stavu.

Jako další parametry se mohou nastavovat zastínění a trajektorie slunce nad obzorem. Trajektorie slunce se nastaví automaticky po zadání lokace a načtení meteorologických dat, proto ji není potřeba nějak upravovat. To samé platí v našem případě o zastínění, vzhledem k tomu, že fotovoltaický systém je nainstalován na střeše nad šestým patrem budovy, nemá žádné přirozené zastínění od stromů či okolních objektů.

Poslední krok je zadání parametrů samotné fotovoltaické elektrárny, což můžeme vidět na obrázku číslo 15. Nejprve je potřeba vybrat vhodný modul z tabulky. V našem případě jde o panel z monokrystalického křemíku od firmy Isofoton s označením I-110/24. V dalším kroku nastavíme celkovou plochu elektrárny, která činí 164 m<sup>2</sup>. Poté musíme nastavit počet a typ střídačů. Jedná se o 8 střídačů od firmy Sun Power s typovým označením SP 2500 – 450, které mohou pracovat v rozsahu od 194 do 400V. Jako poslední nastavíme počet fotovoltaických modulů v sérii a počet všech stringů.

Grid system definition, Variant "New simulation variant"

**Global System configuration**

1 Number of kinds of sub-arrays

[Simplified Schema](#)

**Global system summary**

Nb. of modules	192	Nominal PV Power	21.1 kWp
Module area	164 m <sup>2</sup>	Maximum PV Power	20.0 kWdc
Nb. of inverters	8	Nominal AC Power	20.0 kWac

---

PV Array

**Sub-array name and Orientation**

Name: PV Array

Orient: Fixed Tilted Plane

Tilt: 45°  
Azimuth: -10°

**Presizing Help**

No sizing    Enter planned power: 21.1 kWp

Resize ... or available area(modules): 164 m<sup>2</sup>

---

**Select the PV module**

All modules | Filter: All PV modules | Maximum nb. of modules: 192

Isofoton | 110 Wp 29V Si-mono I 110/24 | Until 2005 | Manufacturer

Sizing voltages: Vmpp (60°C) 29.6 V, Voc (-10°C) 48.1 V

---

**Select the inverter**

All inverters | Output voltage 230 V Mono 50Hz

Sun Power | 2.5 kW 194 - 400 V LF Tr 50 Hz SP 2500-450 | Until 1980

Nb. of inverters: 8 | Operating Voltage: 194-400 V | Global Inverter's power: 20.0 kWac

---

**Design the array**

**Number of modules and strings**

Mod. in series: 8 (between 7 and 9)

Nbre strings: 24 (between 23 and 24)

Overload loss: 0.0 %

Pnom ratio: 1.06

**Nb. modules: 192    Area: 164 m<sup>2</sup>**

**Operating conditions**

Vmpp (60°C): 237 V  
Vmpp (20°C): 284 V  
Voc (-10°C): 385 V

Plane irradiance: 1000 W/m<sup>2</sup>

Imp (STC): 76.4 A  
Isc (STC): 81.1 A  
Isc (at STC): 81.1 A

Max. operating power at 1000 W/m<sup>2</sup> and 50°C: 19.0 kW

**Array nom. Power (STC): 21.1 kWp**

Obrázek 15 Zadání parametrů do programu PVsyst

## 2.3 Výsledky simulace

ZCU FINAL  
Balances and main results

	GlobHor kWh/m <sup>2</sup>	DiffHor kWh/m <sup>2</sup>	T_Amb °C	GlobInc kWh/m <sup>2</sup>	GlobEff kWh/m <sup>2</sup>	EArray MWh	E_Grid MWh	PR
January	23.7	13.92	-0.95	45.4	44.3	0.871	0.775	0.809
February	38.3	25.09	0.80	55.6	54.2	1.063	0.957	0.814
March	73.6	46.89	3.91	89.4	86.9	1.672	1.518	0.804
April	125.7	62.41	9.27	140.9	136.6	2.539	2.333	0.784
May	149.9	72.70	14.14	144.5	139.8	2.540	2.319	0.760
June	158.4	85.63	16.77	144.6	139.6	2.536	2.319	0.759
July	159.4	80.57	18.48	150.5	145.5	2.616	2.390	0.752
August	130.2	62.32	18.44	137.7	133.5	2.375	2.167	0.745
September	93.3	51.23	13.50	113.7	110.4	2.030	1.858	0.774
October	53.5	30.76	9.05	79.1	77.1	1.441	1.301	0.779
November	27.3	16.70	3.98	48.0	46.8	0.907	0.813	0.802
December	17.1	11.85	0.05	31.4	30.6	0.607	0.531	0.799
Year	1050.4	560.08	9.00	1180.9	1145.2	21.197	19.281	0.773

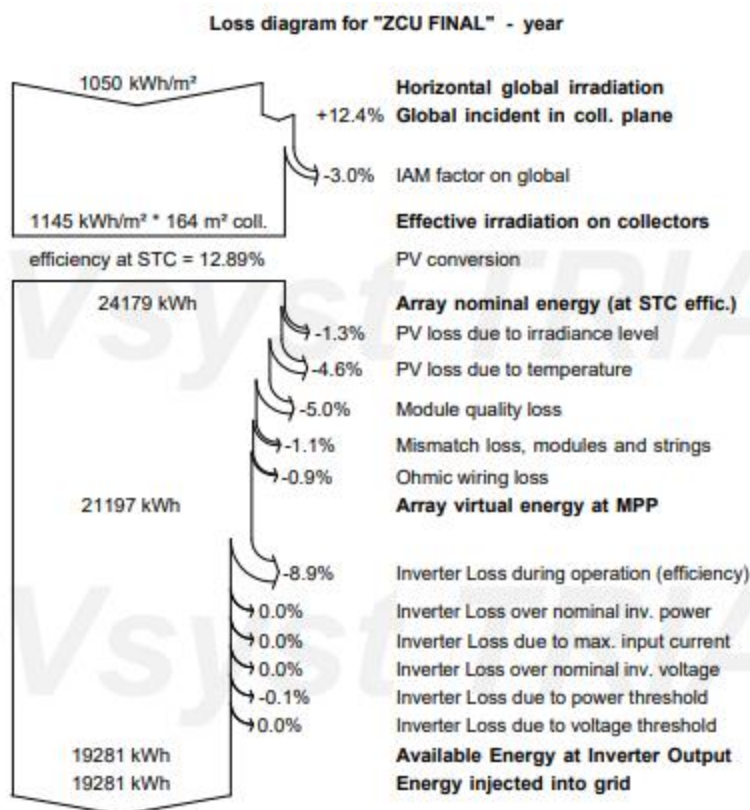
Legends: GlobHor Horizontal global irradiation  
 DiffHor Horizontal diffuse irradiation  
 T\_Amb T amb.  
 GlobInc Global incident in coll. plane  
 GlobEff Effective Global, corr. for IAM and shadings  
 EArray Effective energy at the output of the array  
 E\_Grid Energy injected into grid  
 PR Performance Ratio

Tabulka 3 Energetická bilance solárního systému

V příložené tabulce můžeme vidět bilance a hlavní hodnoty ze simulačního programu PVsyst konkrétně po jednotlivých měsících i celkovou bilanci za rok. Z výsledků lze vyčíst, že celkové horizontální roční sluneční ozáření pro stanoviště měřené FVE je 1050,4 kWh/m<sup>2</sup>, což téměř odpovídá předpokládané hodnotě intenzity záření. Hlavní veličinou, která nás zajímá je vyrobená energie dodaná do sítě, což odpovídá sloupci s názvem E\_grid. Další podstatnou informací je sloupec s označením PR (performance ratio), který udává poměr reálné ku vyrobené energii. Jak jsem již zmínil v teoretických předpokladech, PR se pohybuje mezi 70 a 85 %, čemuž měřený systém s hodnotou 77,3 % odpovídá. Velmi podstatný údaj nabízí položka GlobEff, která odpovídá globálnímu efektivnímu ozáření a jsou zde započítány již všechny podstatné informace jako faktor AM (znečištění vzduchu) a zastínění. Z hodnoty GlobEff lze vypočítat ideální energetický výnos.



## 2.4 Diagram ztrát



Obrázek 16 Diagram ztrát

Z výše uvedeného diagramu ztrát můžeme vyvodit, že celková energie vyrobená fotovoltaickým modulem je 24,179 MWh. Po odečtení ztrát, vzhledem k úrovni slunečního ozáření, závislosti na okolní teplotě, kvalitě FV modulů, nesouladu FV modulů a ohmické elektroinstalaci, je výsledná vyrobená efektivní elektrická energie na výstupu z FV generátoru 21,197 MWh. Jestliže se pak ještě odečtou všechny ztráty způsobené střídači, tak finální celková vyrobená elektrická energie FVE za rok, která je dodávaná přímo do nn sítě, má hodnotu 19,281 MWh.

Všechny výsledky zpracované simulačním programem PVsyst jsou k nahlédnutí v příloze.



## 2.5 Reálná výroba

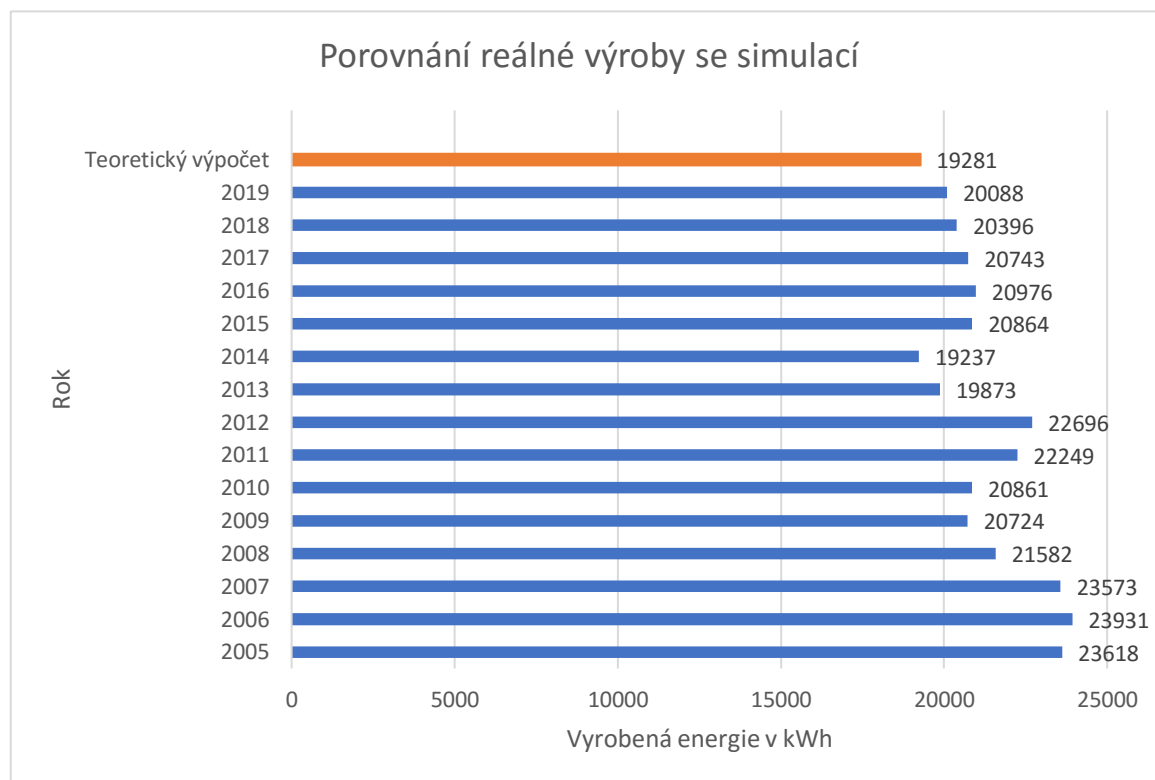
Fotovoltaická elektrárna na střeše Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity má vlastní systém měření, kdy jsou vyhodnocována a zapisována jednotlivá data v průběhu dní. Nejdůležitějším parametrem, který nás zajímá, je zajištění výroby elektrické energie. Jelikož se reálná výroba mění každým dnem, je zapotřebí sledovat delší časové období, ideálně v ročních cyklech, abychom měli možnost porovnat data. Vzhledem k tomu, že v letním období dosahuje zisk fotovoltaické elektrárny až 70 % jejich ročních výnosů, jsou na Západočeské univerzitě zpracována především data po jednotlivých ročnících. Hodnoty vyrobené elektrické energie jsou sledovány od počátku instalace systému, tedy od roku 2004 až po současnost. K zapisování dat dodávané elektrické energie do sítě nn slouží pro větší přehlednost sešit umístěný na katedře elektroenergetiky. Jak již bylo zmíněno, zde se nachází záznam o vyrobené a dodané energii v ročních cyklech.

Rok	Vyrobena elektrická energie FVE v kWh
2005	23618
2006	23931
2007	23573
2008	21582
2009	20724
2010	20861
2011	22249
2012	22696
2013	19873
2014	19237
2015	20864
2016	20976
2017	20743
2018	20396
2019	20088

Tabulka 4 Výroba elektrické energie ve sledovaných obdobích

## 2.6 Porovnání reálné výroby a simulace

Pro danou elektrárnu byl proveden simulační výpočet v programu PVsyst. Po zadání všech konkrétních údajů o daném systému vyšel odhad ročního výkonu 19,281 MWh. V následujícím grafu je srovnán teoretický výpočet výroby elektrické energie s reálnými hodnotami odečítaných za roční období.



Graf 1 Porovnání reálné výroby s teoretickou

Z výše uvedeného grafu můžeme vidět, že fotovoltaická elektrárna byla nejvíce výkonná první tři roky po svém zprovoznění. Každý solární systém jeví po určité době známky degradace, a proto nejsou roční výsledky nijak překvapivé. Zároveň je z grafu patrné, že až na rok 2014 byl skutečný výkon vyšší než odhadovaný. Nejméně elektrické energie vyrobila elektrárna v roce 2014, nejvíce v roce 2006. Odchylka z odhadované výroby činí (-0,3 až 24,1 %). Z těchto výsledků je patrné, že elektrárna pracuje velmi dobře a za sledované období vyrobila průměrně 21 427 kWh a tedy o 11,3 % více, než byl teoretický předpoklad.

### 3 Kontrola stavu dlouhodobě používaného FV systému

V následující části se budu věnovat popisu způsobu měření a samotnému měření solárního systému pomocí termokamery. Jedná se o neinvazivní měření, které je velmi rychlé a jednoduché. Pomocí této analýzy měřeného fotovoltaického systému můžeme s velkou pravděpodobností určit případné závady a učinit potřebná opatření k jejich odstranění.

Jedno z nejpoužívanějších měření vůbec, co se týče fotovoltaických systémů, je měření pomocí termokamery. Jeho užitečnost je dána jak výsledky, které dostaneme, tak bezproblémovým průběhem samotného měření. Ke správnému měření potřebujeme jen správně kalibrovanou termokameru a přístup k fotovoltaickému systému. Při měření zjistíme vady, které nám zůstávají pouhým okem skryty. Pokud je nějaký panel či jeho část vadný, ukáže se na termografickém snímku nerovnoměrné rozložení teploty.

Dalším velmi užitečným nástrojem je měření V-A charakteristik za pomoci I-V analyzátoru. Při připojení I-V analyzátoru zjišťujeme skutečné parametry fotovoltaického modulu, jako je proud, napětí a výkon. Součástí I-V analyzátoru bývá slot pro čidlo teploty a referenční články k měření slunečního svitu. Standartní součástí I-V analyzátoru také bývá vnitřní software, který pomocí změřené teploty a hodnoty slunečního osvětlení přepočítá námi měřené veličiny jako napětí, proud a výkon na standartní testovací podmínky. Tímto způsobem můžeme vyhodnocovat efektivitu solárních modulů, jelikož jsou jeho parametry nezávislé na vnějších vlivech. Při poklesu výkonu zkoumaného modulu můžeme snadno odhalit vady, které nejsou pouhým okem viditelné.



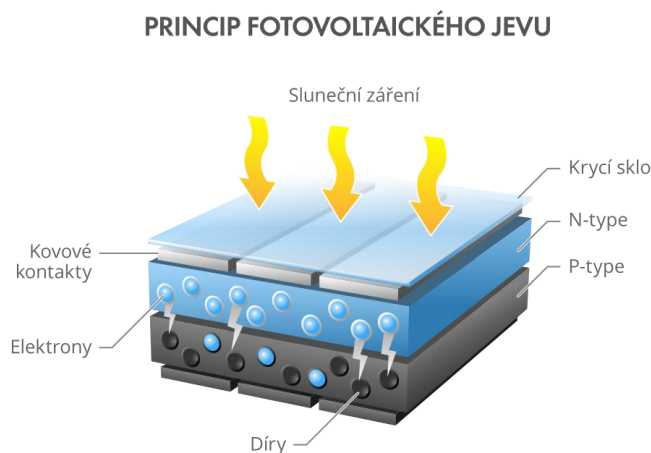
Obrázek 17 Prasklý FV modul [7]

### 3.1 Základní kontrola fotovoltaického systému pomocí termokamery

K termografickému měření se používá zařízení zvané termokamera, které snímá plochu fotovoltaických panelů v infračerveném spektru a převádí je do oblasti viditelného záření. Využívá se rozložení teploty na daném měřeném objektu. V případě, že je nějaký měřený předmět vadný, v našem případě fotovoltaický modul, ukáže se nám na termografickém snímku jasně ohraničená část s rozdílnou teplotou, než má její okolí. Jak již bylo výše zmíněno velkou výhodou je rychlost, jednoduchost měření a také možnost provádět kontrolu za provozu zařízení. Pro správné výsledky musíme dodržet vhodné podmínky pro měření jako je intenzita slunečního záření, úhel, vzdálenost a rozlišení termokamery.

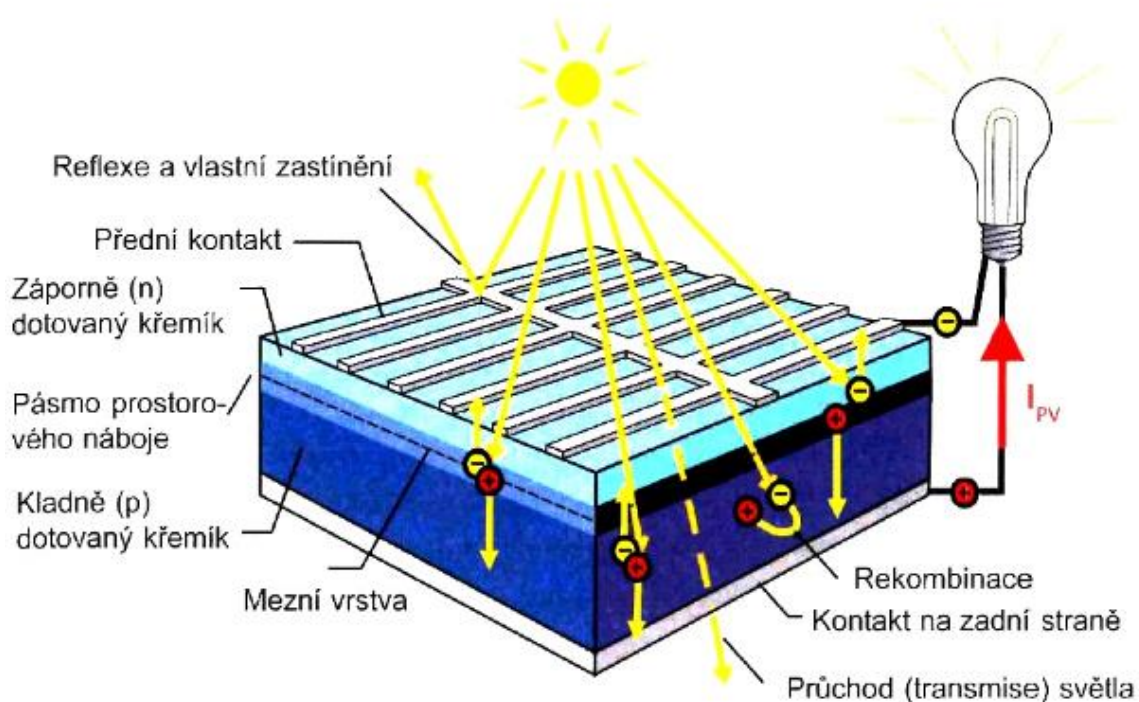
### 3.2 Fotovoltaický článek

Ve fotovoltaickém článku probíhá přeměna světla na elektrickou energii za pomoci fotovoltaického jevu. Fotovoltaický jev spočívá ve vyrazení elektronu z jeho oběžné dráhy za pomoci fotonu slunečního záření. Přeměna probíhá nehlukně, bez emisí a spotřeby látek v solárně aktivních materiálech. Fotovoltaické články jsou složeny z polovodičů, což jsou materiály s vodivostí mezi vodiči a izolanty. Nejčastěji jsou fotovoltaické články tvořeny monokrystalickým křemíkem. Vzájemným působením slunečního záření a křemíku dochází k pohlcování fotonů a uvolňování elektrické energie. Každý článek obsahuje dvě odlišně dotované a tím rozdílně vodivé polovodičové oblasti. Mezi kladně (P) a záporně (N) dotovanou oblastí vzniká elektrické pole, které je způsobeno difuzí elektronů z polovodiče N do polovodiče P v prostoru PN přechodu. V oblasti N vznikají kladné atomy, kdežto v oblasti P záporné – to napomáhá k vytvoření elektrického pole, které je orientované proti směru pohybu nosiče náboje, takže difuze elektronů nemůže pokračovat do nekonečna. [3]



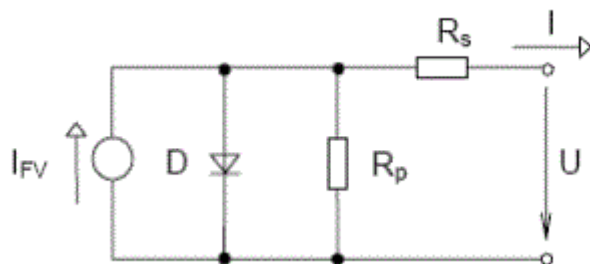
Obrázek 18 Princip fotovoltaického jevu [12]

Dopadá-li sluneční světlo na solární článek, může zářivá energie z fotonů uvolňovat elektrony z vazeb a na jejich původním místě vznikají takzvané díry. Vnitřní elektrické pole fotovoltaického článku způsobuje, že jsou elektrony i díry přitahovány do opačných směrů. Záporné náboje putují k přední části článku, kdežto kladné putují k zadní straně. V důsledku tohoto rozložení nábojů vznikají v článku místa s rozdílným potenciálem a tedy napětí. Toto napětí naprázdno leží u krystalických solárních článků v rozmezí 0,6-0,7 voltu. Uzávěře-li se elektrický obvod, teče přes spotřebič proud. Difuze nosičů náboje tedy způsobuje, že na solárním článku vzniká napětí. Některé elektrony nedosáhnou kontaktů, nýbrž rekombinují. a proto nevedou elektrický proud. [13]



Obrázek 19 Vedení proudu, rekombinace [13]

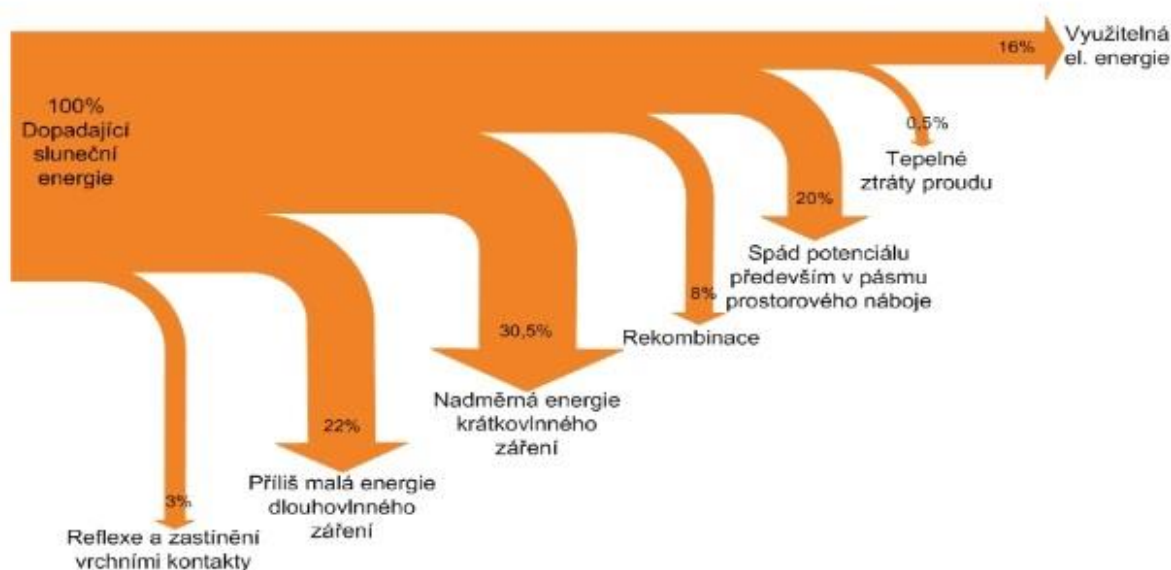
Na obrázku výše můžeme vidět princip fotovoltaického článku s uzavřeným elektrickým obvodem, což má za následek průchod proudu. Zároveň je na obrázku zobrazena rekombinace, což je v podstatě svázání volného elektronu s atomem s chybějícím vnějším elektronem. Jak již bylo výše zmíněno, tyto elektrony nenapomáhají k vedení elektrického proudu. Na přední straně fotovoltaického článku jsou použity kovové elektrody jako kontakty, jež jsou uzpůsobeny k co největší propustnosti světla. Na zadní straně článku se může použít celoplošná elektroda, protože zde nepotřebujeme vysokou propustnost slunečního záření. Jelikož by měl FV článek pohltit co nejvíce fotonů, užívá se přes kovové elektrody na přední straně antireflexní vrstva, aby se odrazilo co nejméně světla. [13]



Obrázek 20 Náhradní schéma fotovoltaického článku [13]

Z náhradního schématu fotovoltaického článku je patrné, že k dosažení maximální hodnoty výkonu je potřeba dosáhnout na maximální generovaný proud  $I_{FV}$ , co nejmenší sériový odpor  $R_S$  a co největší svodový odpor  $R_P$ . Sériový odpor je dán sklonem V-A křivky v místě napětí na krátko a paralelní odpor sklonem V-A křivky v místě proudu naprázdno.

Solární článek nedokáže využít veškeré dopadající sluneční záření. Na solárním článku dochází ke ztrátám hlavně rekombinací, odrazem a zastíněním. Nejvýznamnější z pohledu ztrát jsou však dva faktory. Jedná se o dlouhovlnné či krátkovlnné záření, které nemůže být fotovoltaickým článkem zpracováno. Dlouhovlnné záření prochází článkem volně, jedná se o takzvanou transmisi, a nepřispívá k výrobě energie. Naopak u krátkovlnné záření článek absorbuje jen část, zbytek se přemění na teplo. Další ztráty vznikají například proudovým oteplením. Je tedy zřejmé, že využitelný tok je oproti dopadajícímu toku velmi zredukován. [3]



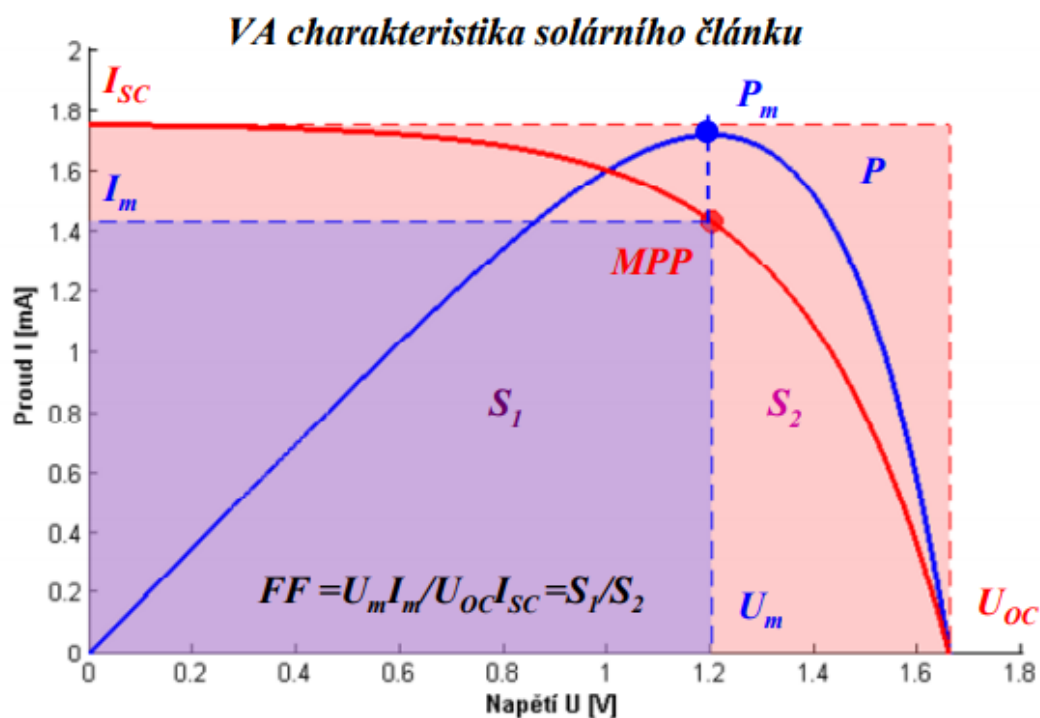
Obrázek 21 Tok energie [13]



### 3.3 V-A charakteristiky FV článku

Volt-Ampérová charakteristika je závislost mezi napětím a proudem. Průběh charakteristiky není stejný pro různé součástky. U odporu je závislost napětí a proudu lineární, kdežto u polovodičových součástek, jako jsou fotovoltaické články je závislost nelineární.

Nejvyšší možnou hodnotu proudu, který je schopen FV článek dodávat je takzvaný zkratový proud neboli proud nakrátko. Další charakteristickou veličinou je maximální napětí, které je možno dosáhnout. Jedná se o napětí naprázdno, kterého je dosaženo, když na FV článku není připojena zátěž. Pro každý konkrétní článek, v závislosti na typu a výrobci, existuje pracovní bod, který odpovídá největšímu možnému výkonu. Tento bod se označuje jako MPP (maximal power point) a má odpovídající hodnoty napětí a proudu  $U_m$  a  $I_m$ . [14]



Obrázek 22 V-A charakteristika FV článku [14]

Na obrázku číslo 22 je vidět obecná volt ampérová charakteristika fotovoltaického článku. Z charakteristiky jsou patrné všechny hlavní výkonové parametry článku. Dále je patrný grafický význam parametru FF (fill factor). FF je poměr maximální plochy obdélníku vektutého pod VA charakteristikou  $S_1$ , k ploše nejmenšího obdélníku, který obsahuje celou křivku  $S_2$ .

### 3.3.1 Základní parametry FV článku

#### Proud nakrátko – $I_{sc}$

Jedná se o maximální proud, který může fotovoltaický článek při daném osvětlení dodávat. Velikost tohoto proudu závisí na teplotě, intenzitě osvětlení, spektrální citlivosti a ploše fotovoltaických článků. [14]

#### Napětí naprázdno – $U_{oc}$

Jedná se o maximální napětí, které při dané teplotě a intenzitě záření můžeme naměřit na svorkách fotovoltaického článku bez připojené zátěže. Jeho hodnota u monokrystalických článků je přibližně 0,6 V [14]

#### Maximal power point – MPP

Jedná se o provozní bod fotovoltaického článku, kde dosahujeme nejvyšší hodnoty výkonu. V tomto bodě se nachází optimální provozní parametry článku.

$P_M$  - maximální výkon solárního článku,  $P_M = U_M \times I_M$

$U_M$  - napětí při maximálním výkonu solárního článku

$I_M$  - proud při maximálním výkonu solárního článku

$R_m$  – vnitřní odpor při maximálním výkonu solárního článku  $R_m = U_M / I_M$

#### Činitel naplnění - FF

Činitel naplnění představuje elektrickou účinnost panelu. Je závislý hlavně na kvalitě materiálu, kontaktů či odporu aktivní plochy. Jeho hodnotu vypočteme z následujícího vztahu či z poměru ploch viz obrázek číslo 22. [14]

$$FF = \frac{U_m * I_m}{U_{oc} * I_{sc}}$$

#### Účinnost přeměny zářivé energie na elektrickou

Jedná se o poměr maximálního možného získaného výkonu z fotovoltaického článku ku výkonu dopadajícího záření. [14]

$$\eta = \frac{P_m}{A * e}$$

Kde  $P_M$  - maximální výkon článku

$A$  – plocha FV článku

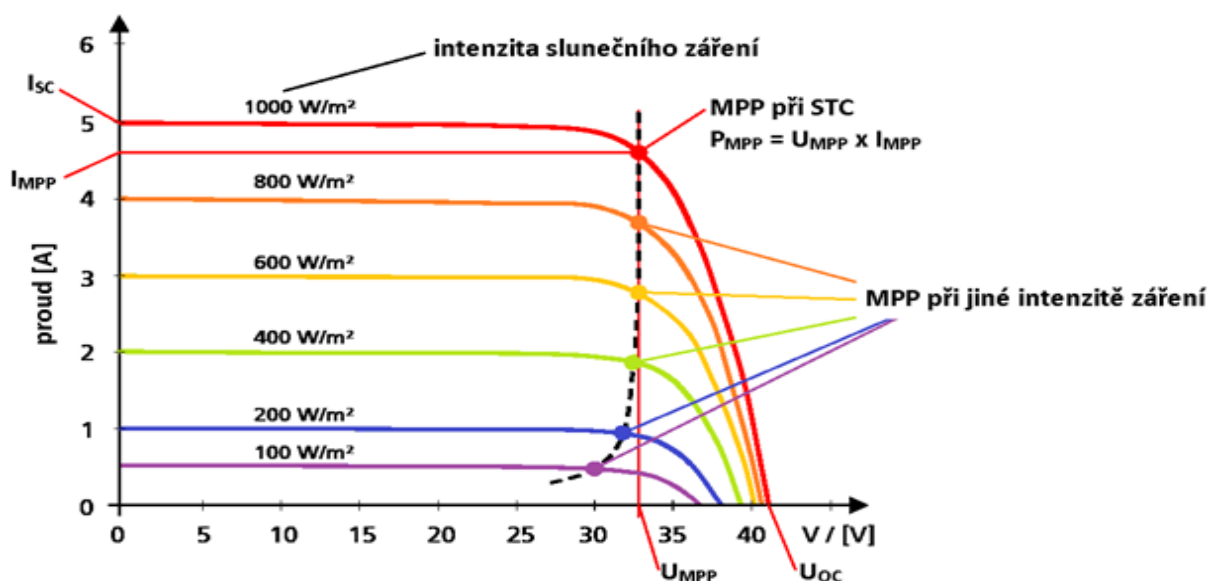
$e$  – hodnota slunečního ozáření



### 3.4 Vliv počasí na FV články

Všechny charakteristiky fotovoltaických článků se měří v laboratořích za předem definovaných světelných a tepelných podmínek. Při konkrétním solárním systému však máme proměnlivé parametry, které velmi ovlivňují jejich účinnost. Dvě hlavní veličiny, které nejvíce ovlivňují správnou funkčnost systému jsou teplota a intenzita slunečního záření. Jako všechny systémy, které jsou navrženy pro venkovní provoz, tak i solární elektrárna pracuje jen velmi málo času v optimálních podmínkách. Pro porovnání výsledků měřených parametrů musí být tedy konkrétní hodnoty přepočítány na již výše zmíněné standartní testovací podmínky z laboratoře.

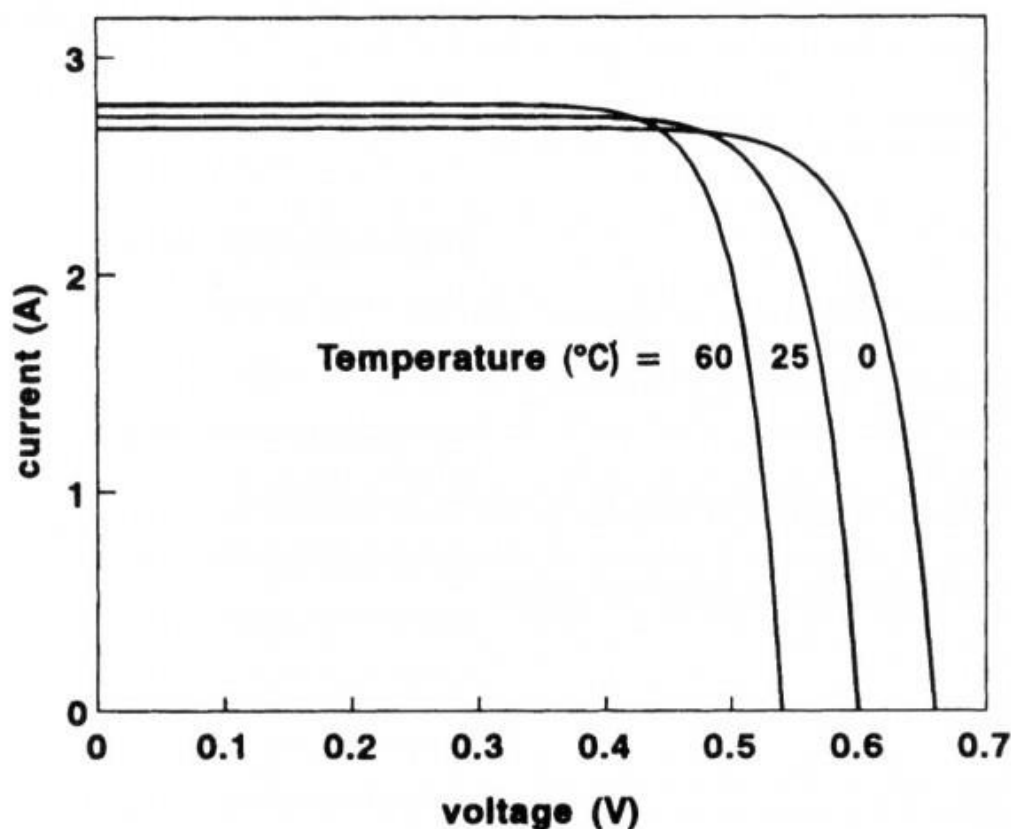
Jako první veličinu rozebereme hodnotu slunečního záření. Její hodnota se projevuje hlavně na proudu generovaného solárním modulem. Sníží-li se hodnota intenzity slunečního záření o polovinu, pak je generovaný proud také poloviční. Co se napětí týče, sluneční záření nemá příliš velký vliv na jeho hodnotu. Čím nižší je však hodnota proudu, tím logicky klesá výkon. [3]



Obrázek 23 Vliv intenzity slunečního záření na proud, napětí a výkon [15]

Z obrázku číslo 23 můžeme vypočítat již výše zmíněné skutečnosti. Mezi intenzitou slunečního záření a proudem existuje přímá úměra. To se samozřejmě odráží i na velikosti výkonu a na umístění provozního bodu. Jak bylo zmíněno, napětí je téměř nezávislé na hodnotě intenzity slunečního záření.

Druhou velmi podstatnou veličinou, na které jsou výsledné parametry závislé, je teplota. Co se teploty týče, ovlivňuje hlavně velikost napětí. U solárních systému platí, že čím vyšší teplota, tím nižší je zde výsledné napětí. V zimních měsících může napětí vlivem teploty vyšplhat až na hodnotu o 20 % vyšší, než je hodnota jmenovitého napětí. V důsledku této závislosti platí, že čím vyšší je teplota v létě, tím více klesá účinnost a výkon. V našich podmínkách se v letních měsících může vyšplhat teplota modulů až k 50 °C, přičemž platí, že na každý stupeň ztrácí modul cca 0,5 % svého jmenovitého výkonu. I přes výše zmíněnou závislost na teplotě, dodávají solární systémy většinu svého výkonu v letních měsících, a to v důsledku vysoké hodnoty intenzity slunečního záření a době po kterou trvá. [3]



Obrázek 24 Závislost proudu a napětí na teplotě [16]

Z grafu uvedeného na obrázku číslo 24 vyplývá, že proud generovaný fotovoltaickým článkem se v závislosti na teplotě téměř nemění, kdežto u napětí pozorujeme s rostoucí teplotou jeho značný úbytek.

### 3.5 Termokamera FLIR T335

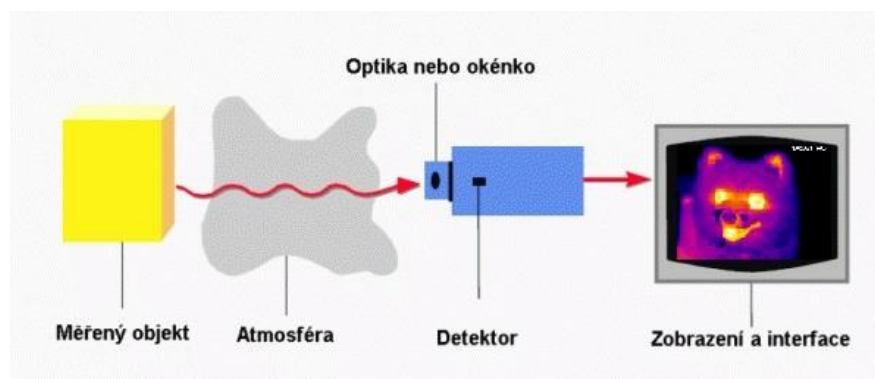
Termokamera pracuje na principu bezdotykového měření teploty. Výstupem z termovizní kamery je snímek, nazývaný termogram. Jedná se o zobrazení infračerveného spektra a převedení do oblasti viditelného záření. Termokamery obecně se rozlišují podle několika důležitých parametrů jako je rozlišení, teplotní rozsah, zorný úhel objektivů nebo zaostření. Termokamera FLIR T335 má rozlišení infračervených snímků 320x240 pixelů a digitální rozlišení 3,1 mega pixelu. Teplotní rozsah mnou používané kamery je od -20 do 650 °C. Dalším důležitým parametrem je možnost zaostření od 0,4 metru a přesnost  $\pm 2$  °C nebo  $\pm 2$  %. Zajímavou funkcí u této termokamery je jistě PiP funkce – picture in picture, která dovoluje zobrazovat jeden hlavní snímek a v rohu obrazovky další snímek v jiném spektru. Termokamera je ideální nástroj k rychlému určení takzvaných hotspotů. [8]



Obrázek 25 Termokamera FLIR T335 [6]

### 3.6 Termovizní měření

Princip termovizního měření spočívá v detekci povrchové teploty těles. Teplota z povrchu těles a z jejich okolí se šíří ve formě elektromagnetické vlny. Jedná se o bezkontaktní měření využívající vlnové pásmo infračerveného záření o délce 8 – 14  $\mu\text{m}$  a jeho následném převedení do viditelného světla.



Obrázek 26 Schéma termovizního měření [10]

Jak můžeme vidět na schématu výše, termovize probíhá tak, že za pomoci detektoru měříme vyzařovanou teplotu z měřeného objektu. Velmi důležité je uvědomit si, že termokamera neměří přímo povrchovou teplotu, ale že je dopočítávána na základě změřeného infračerveného záření a okolních podmínek zadaných jako parametrů do systému termokamery. Při měření tedy musíme do termokamery zadat konkrétní údaje týkající se teploty, vlhkosti a emisivity pro daný materiál. [10]

Emisivita je poměr vyzařené a odražené energie. Nabývá hodnot od 0 do 1 a čím je vyšší, tím můžeme přesněji změřit teplotu objektu. Hodnoty „1“ dosahuje absolutně černé těleso, které pohlcuje veškeré záření všech vlnových délek a jeho vyzařování je maximální možné. Absolutně černé těleso je pouze teoretický fyzikální model, ve skutečnosti se dostáváme maximálně na hodnotu 0,99. Pro měření solárních panelů se uvažuje emisivita skla, a to má hodnotu 0,92. [9]

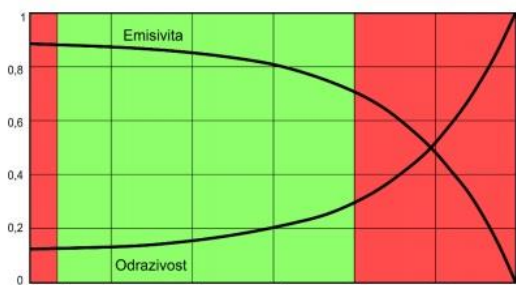
Dalším důležitým parametrem je vzdálenost a relativní vlhkost. Z těchto dvou hodnot jsme schopni určit parametry atmosféry tzv. propustnost. Při jasném a slunečném dni by při zanedbání propustnosti byla chyba velmi malá, avšak při horších podmínkách jako je déšť či mlha je měření velmi nepřesné. [10]

### 3.7 Správný postup měření a vlastní měření

Tak jako ve všech ostatních technických analýzách jsou i při termografickém měření důležité správné postupy a odpovídající vstupní nastavení. Nejdůležitější z celé řady faktorů ovlivňující správnost měření je jasná obloha. K dosažení vypovídajících a kontrastních termogramů je důležité měřit za jasného slunného dne. Převedeno do technického jazyka můžeme považovat za jasný a slunečný den takový, kdy intenzita slunečního záření dosahuje hodnot od 800 do 1000 W/m<sup>2</sup>. Pro průkazné a dostatečně vypovídající termogramy je doporučeno měřit při hodnotě intenzity slunečního záření alespoň 500 W/m<sup>2</sup>. Ideálně samozřejmě čím větší intenzita slunečního záření, tím pro konkrétní výsledky lépe.

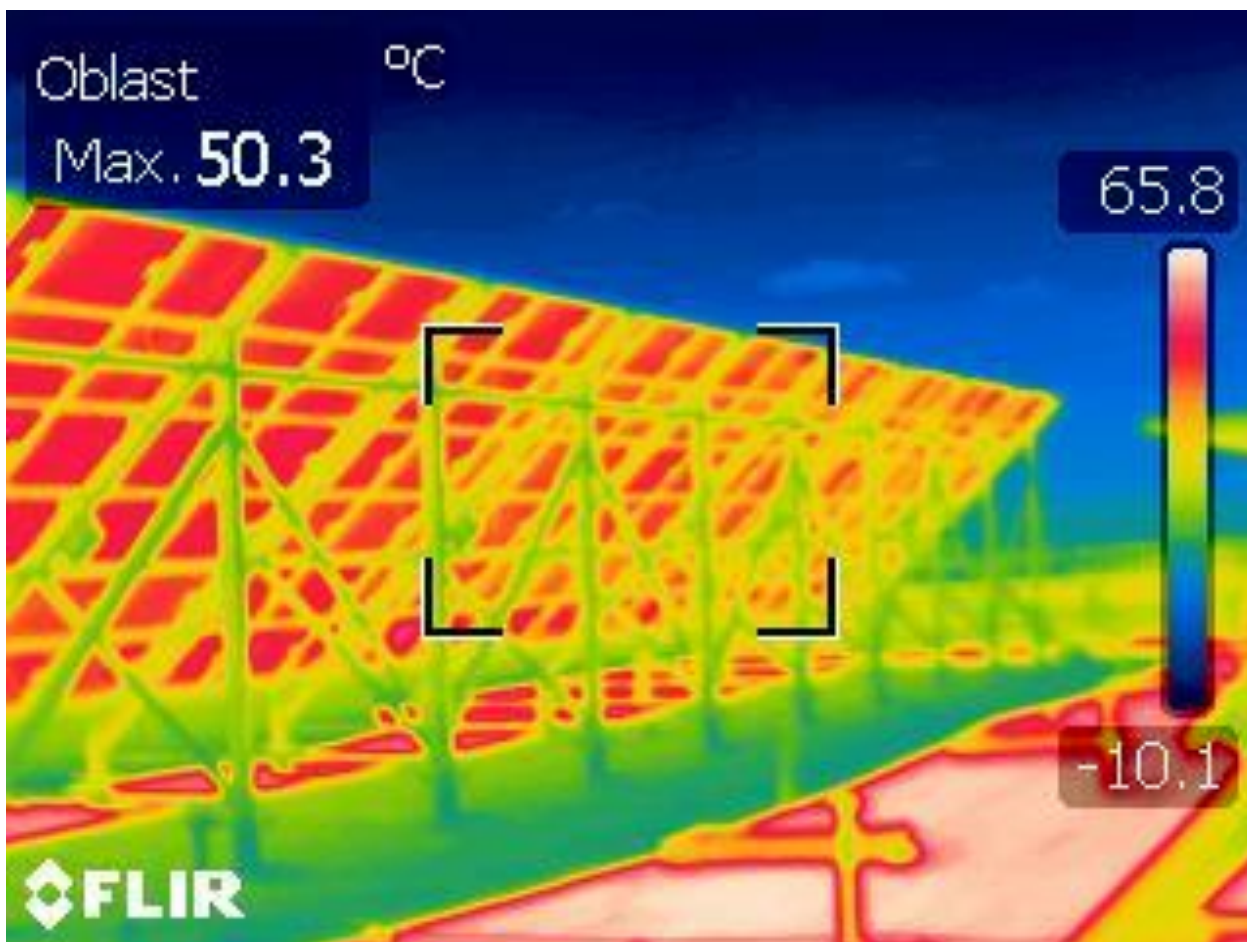
Dalším důležitým parametrem je vhodná volba měřicího přístroje, v našem případě termokamery. Pro měření fotovoltaických elektráren se často využívá měření velkých úseků a z tohoto důvodu je důležité použít termokameru s dostatečným rozlišením infračervených snímků. Spodní hranice doporučeného minimálního rozlišení je stanovena na 320x240 pixelů. Velkou výhodou může být měření systému v zimním období nebo obecně v době nižší venkovní teploty. Pro přesné výsledky by měla být teplota okolí co nejmenší, protože nejpřesnější hodnoty dostaneme při velkém rozdílu teplot měřeného objektu a okolí.

Posledním parametrem, který ovlivňuje výsledné hodnoty velmi výrazně, je správný úhel udržovaný mezi termokamerou a měřeným systémem. Pokud nedodržíme správný úhel, může se stát, že se na termogramech objeví odrazy tepelného záření okolních objektů a může dojít k nesprávnému vyhodnocení snímků. Proto je pro zamezení odrazů z obsluhy vhodné měřit panely v úhlu 5-60 stupňů a ne kolmo, kde je však nejvyšší emisivita. Další možností měření panelů, tak abychom se vyvarovali nejvíce zřetelných chyb, je jejich vyhodnocování ze zadní strany. Tím můžeme docílit optimálního úhlu měření, kde je nejvyšší emisivita a zároveň zabránit nepřesnostem kvůli odrazům.



Obrázek 27 Závislost emisivity na úhlu [11]

Vlastní měření probíhalo dne 3.7.2019 mezi 10:00 a 13:00. Měření se odehrálo za intenzity slunečního záření mezi 650 a 850 W/m<sup>2</sup> a teplotě v rozmezí 20-25°C. Co se týče intenzity slunečního záření, jedná se takřka o ideální hodnoty pro co nejlepší výsledky. Naopak teplota by při ideálním měření měla být nižší, čehož bychom docílili při měření v zimním období. Měření probíhalo tak, že jsem si nakreslil obdélníkovou síť, kam jsem zaznamenal všechny panely a postupně jsem pořídil jednotlivé snímky. Kvůli špatnému přístupu a nemožnosti realizovat bezchybné snímky z přední strany panelů jsem přikročil k pořízení termogramů ze zadní strany solárního systému. Po odměření všech panelů jsem po připojení paměťové karty k počítači zkontroloval správnost jednotlivých snímků a číselně označil dle výše zmíněné obdélníkové sítě. Jako poslední úkon při měření solárního systému jsem zaznamenal znovu některé panely, na kterých byla na první pohled vidět vada a také celkový pohled na fotovoltaickou elektrárnu jak z přední, tak ze zadní strany.



Obrázek 28 Termogram – celkový pohled na elektrárnu zezadu



### 3.8 Diagnostika vad systému

Jako u každého systému jsou vady a nedokonalosti i v solární energetice nežádoucí. Mnoho chyb vzniká při procesu výroby, ale nejčastější vady se objevují následkem manipulace s fotovoltaickými moduly a jejich postupnou časovou degradací. Některé vady jsou viditelné pouhým okem jako mechanické poškození, škrábance a různé jiné praskliny. Naopak u dalšího druhu vad je zapotřebí použít nějaké technické zařízení, které nám je pomůže odhalit. Typickým příkladem tohoto technické zařízení je již zmiňovaná termokamera, či I-V analyzátor.

Mezi jeden z nejčastějších typů defektů patří mechanické vady. Jelikož jsou fotovoltaické moduly poměrně velké a velmi křehké, snadno dochází k různým odřeninám či prasklinám. Největší materiálové zastoupení má u solárních panelů křemík či sklo, které jsou velmi křehké, a tudíž se k panelům musíme chovat velmi obezřetně. V případě mechanického poškození mohou hrát velkou roli i atmosférické vlivy. Při tvorbě prasklin mohou vznikat tzv. mrtvé plochy, které nepřeměňují sluneční energii na elektrickou a způsobují ztrátu výkonu. Pokud není s mechanickým poškozením spojena ztráta výkonu systému, nemusíme tyto vady nijak významně řešit. Mezi dalšími poruchami, které jsou viditelné na první pohled můžeme zmínit šnečí cestičky a nedokonalé galvanické propojení.

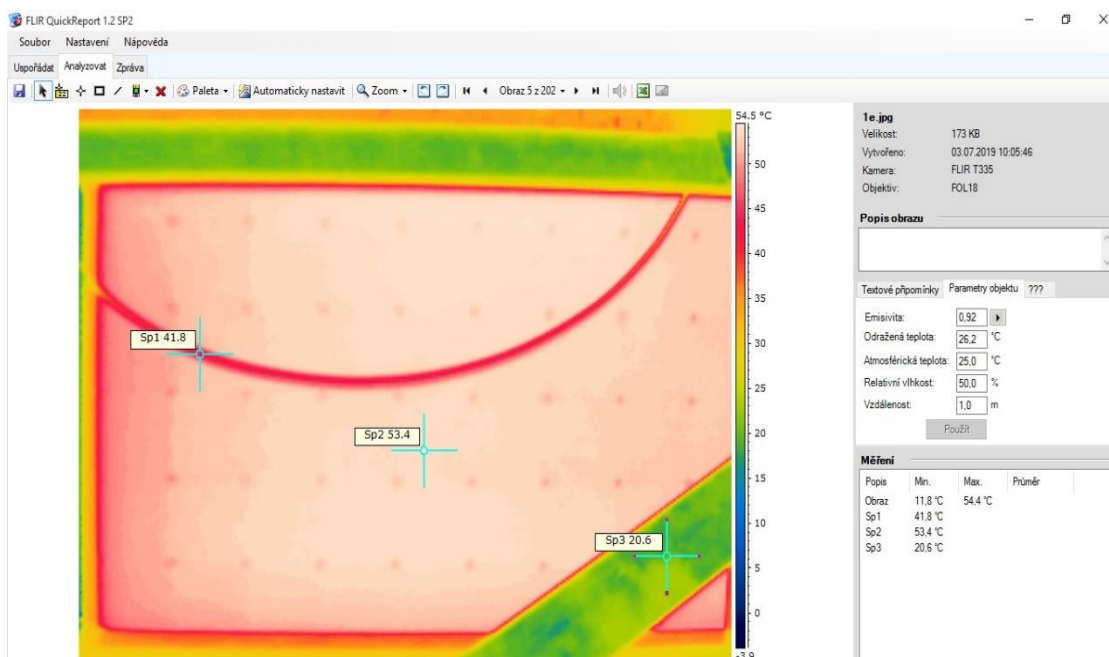
Další typ defektů jsou tzv. vnitřní defekty. Mohou být způsobeny špatnou manipulací při výrobě a znečištěním. Vzniká nehomogenita difuzní vrstvy, což je zapříčiněno nánosem prachu při tvorbě PN přechodu. Fotovoltaické články v tomto případě nevedou ideálně elektrický proud a dochází ke vzniku ztrát. Další častá vada vzniklá na solárních panelech je porucha PID. PID neboli potenciálová induktivní degradace je vyvolána rozdílem napětí v řetězci a urychlena vysokou vlhkostí a teplotou. Způsobuje úbytek výkonu v řádech desítek procent. Potenciální induktivní degradace může být buď trvalá nebo vratná. Vratnou degradaci lze opravit přivedením stejnosměrného proudu opačné polarity. PID nejčastěji vzniká mezi 2-4 rokem od zapojení fotovoltaických modulů.

Velmi podstatnou roli při účinnosti fotovoltaických modulů hrají i vady zvané HOT SPOT zkratky. Jedná se o místa s výrazně vyšší teplotou, než je teplota okolí. Vznikají nejčastěji vlivem nečistot při výrobě nebo za provozu v důsledku vysoké hodnoty závěrného proudu. HOT SPOT zkratky jsou velmi dobře detekovatelné termokamerou, kdy na termogramech vypadají jako tečky, plochy či cestičky.

### 3.9 Výsledky měření

Kontrolní měření probíhalo v létě dne 3.7.2019 mezi 10:00 a 13:00 za intenzity slunečního záření mezi 650 a 850 W/m<sup>2</sup> a teplotě v rozmezí 20-25°C. K měření byla použita výše zmíněná kamera FLIR T335. Bylo změřeno všech 192 panelů, a to ze zadní strany solárního systému. Dále byly pořízeny termogramy celé elektrárny jak z přední, tak ze zadní strany a přední strana vybraných panelů, které se při prvním pohledu na termogram zdály jako poškozené.

Po měření přišla na řadu úprava výsledných snímků v programu FLIR Quickreport, který je jak součástí příslušenství termokamery, tak lze jeho nejnovější verzi stáhnout zdarma na stránkách společnosti FLIR. Vzhledem k tomu, že termogramy obsahují metadata, je možné je velmi variabilně upravovat. V programu Quickreport můžeme nastavit příslušné hodnoty emivity, odražené teploty, atmosférické teploty, relativní vlhkosti a korigovat vzdálenost, ze které probíhalo měření. Další výhodou programu je možnost konkrétně zaměřit určité body, například ty s vyšší teplotou, čímž můžeme přesně určit teplotu takzvaných HOT SPOT zkratk.



Obrázek 29 Ukázka úpravy z programu FLIR quick report

Na obrázku číslo 29 můžeme vidět základní úpravy, které se dají nastavit v programu quickreport. Pro ukázkou je zde znázorněno zaměření tří bodů o různých teplotách a jejich přesné vyhodnocení.



Pro přehlednost, správné vyhodnocení a přiřazení termogramů ke konkrétním panelům jsem si vytvořil obdélníkovou síť, které odpovídá rozložení fotovoltaických modulů na střeše budovy Fakulty elektrotechnické.

Jižní okraj střechy budovy

1A	1B	1C	1D	1E	1F
2A	2B	2C	2D	2E	2F
3A	3B	3C	3D	3E	3F
4A	4B	4C	4D	4E	4F
5A	5B	5C	5D	5E	5F
6A	6B	6C	6D	6E	6F
7A	7B	7C	7D	7E	7F
8A	8B	8C	8D	8E	8F
9A	9B	9C	9D	9E	9F
10A	10B	10C	10D	10E	10F
11A	11B	11C	11D	11E	11F
12A	12B	12C	12D	12E	12F
13A	13B	13C	13D	13E	13F
14A	14B	14C	14D	14E	14F
15A	15B	15C	15D	15E	15F
16A	16B	16C	16D	16E	16F
17A	17B	17C	17D	17E	17F
18A	18B	18C	18D	18E	18F
19A	19B	19C	19D	19E	19F
20A	20B	20C	20D	20E	20F
21A	21B	21C	21D	21E	21F
22A	22B	22C	22D	22E	22F
23A	23B	23C	23D	23E	23F
24A	24B	24C	24D	24E	24F
25A	25B	25C	25D	25E	25F
26A	26B	26C	26D	26E	26F
27A	27B	27C	27D	27E	27F
28A	28B	28C	28D	28E	28F
29A	29B	29C	29D	29E	29F
30A	30B	30C	30D	30E	30F

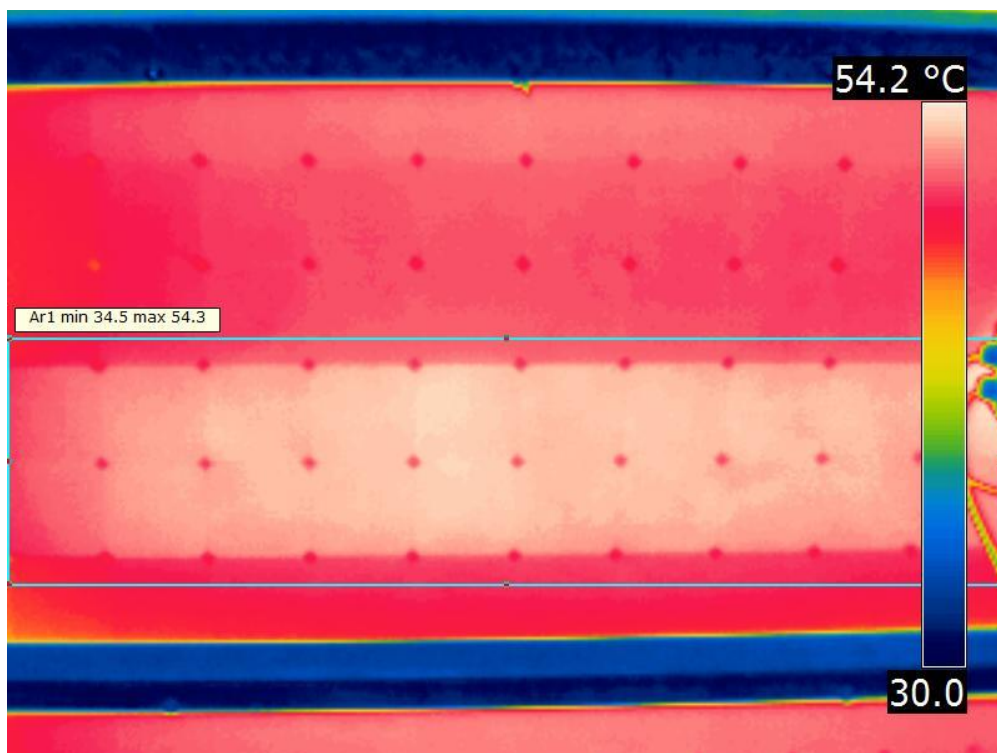
Legenda:	
	FV moduly s prasklinou
	FV moduly s vadnou diodou
	FV moduly s vadným článkem

31A	31B	31C	31D
32A	32B	32C	32D
33A	33B	33C	33D

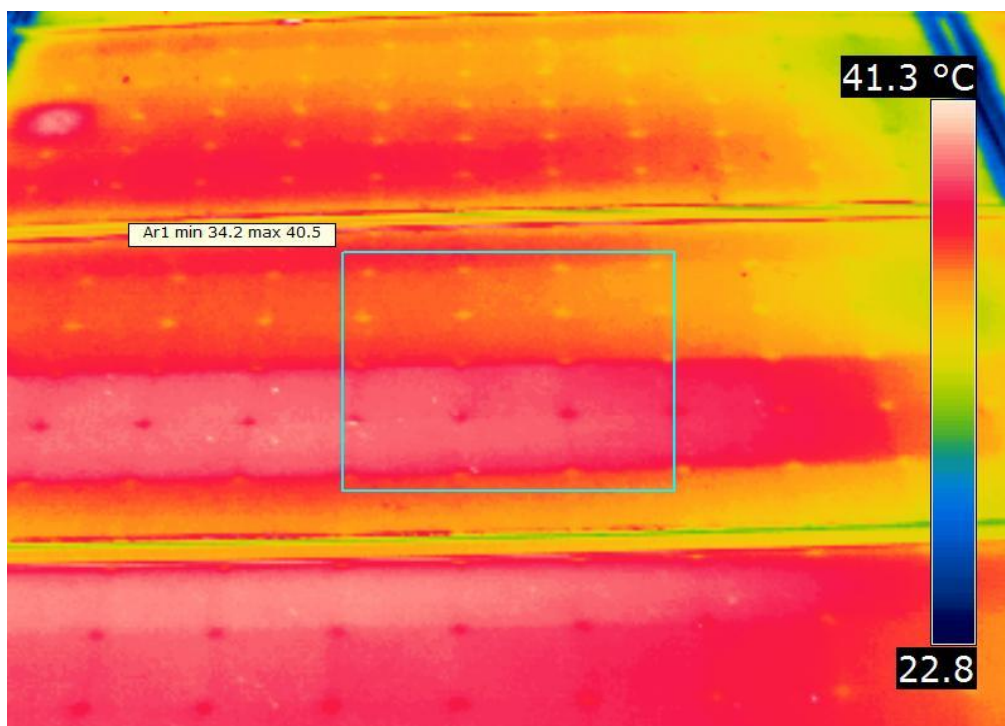
Tabulka 5 Schématické naznačení rozložení panelů

## Východní strana střechy budovy

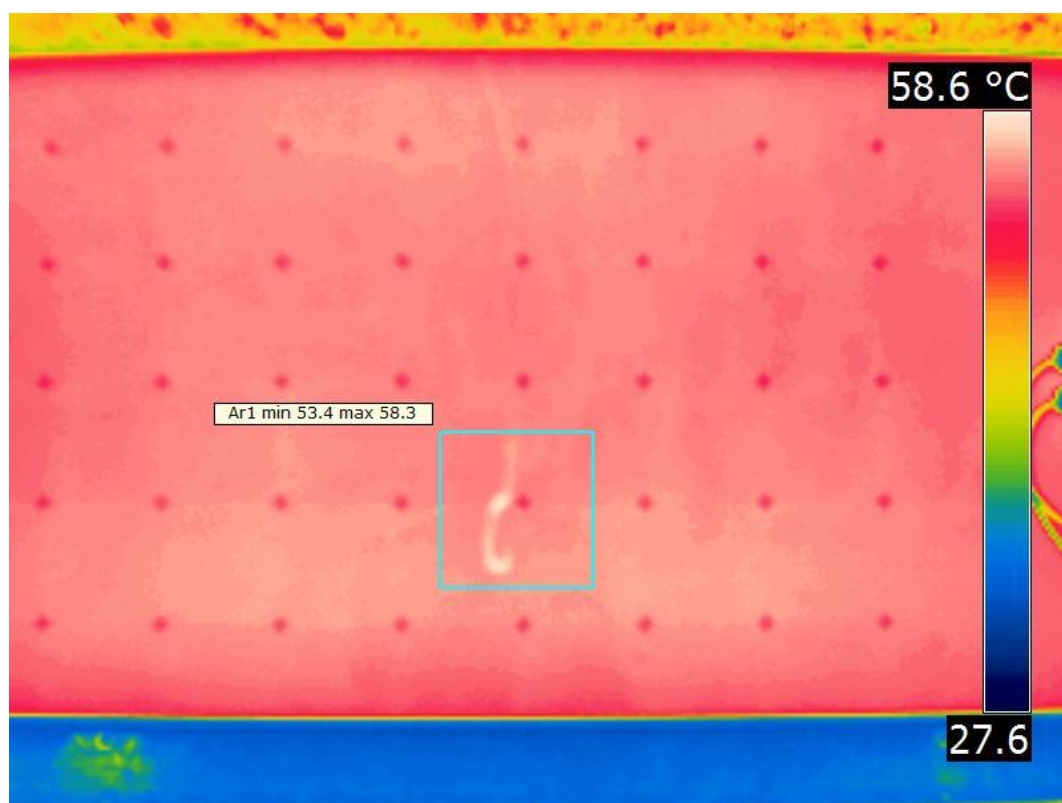
Při analýze v programu quickreport byly zjištěny závady na panelech s označením 2D, 15F, 16F, 17F, 19A, 25C. Jedná se o tři typy vad, moduly s vadnou led diodou, moduly s vadným článkem a takzvané šnečí cestičky. Níže jsou k nahlédnutí fotovoltaické moduly, na nichž byly zjištěny vady.



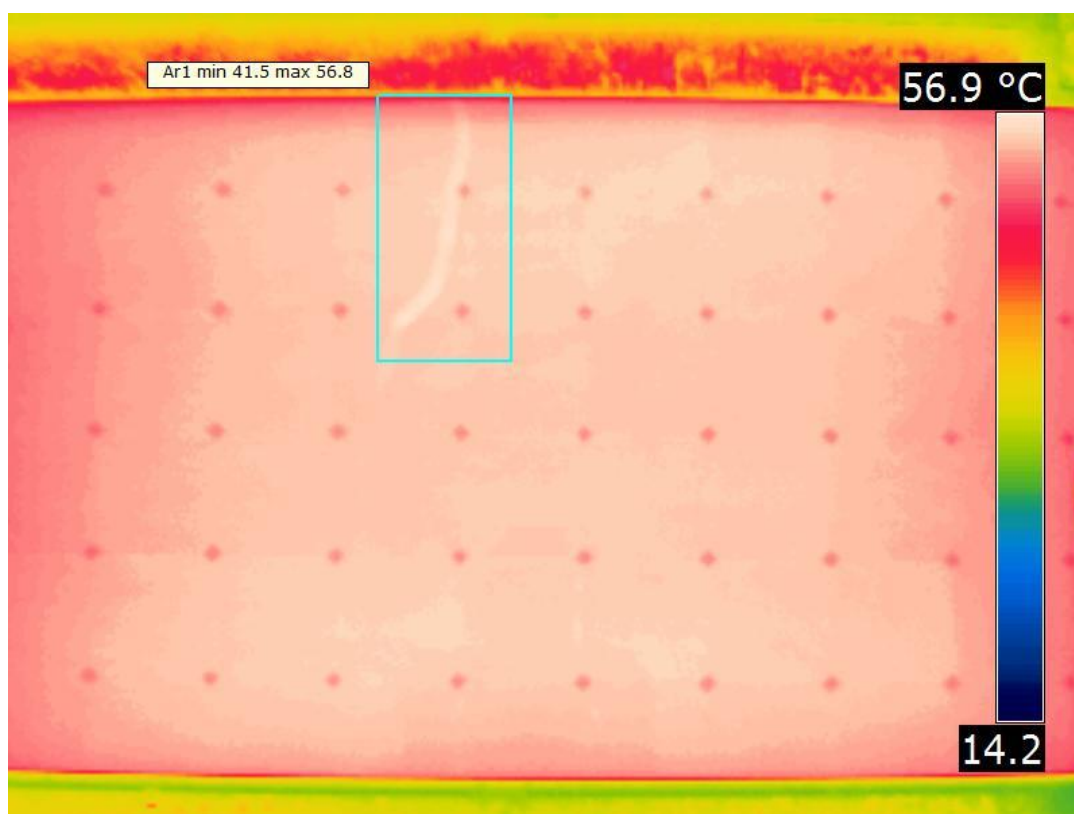
Obrázek 30 Modul s označením 2D s vadnou bypass diodou – zadní strana



Obrázek 31 Modul s označením 2D s vadnou bypass diodou – přední strana



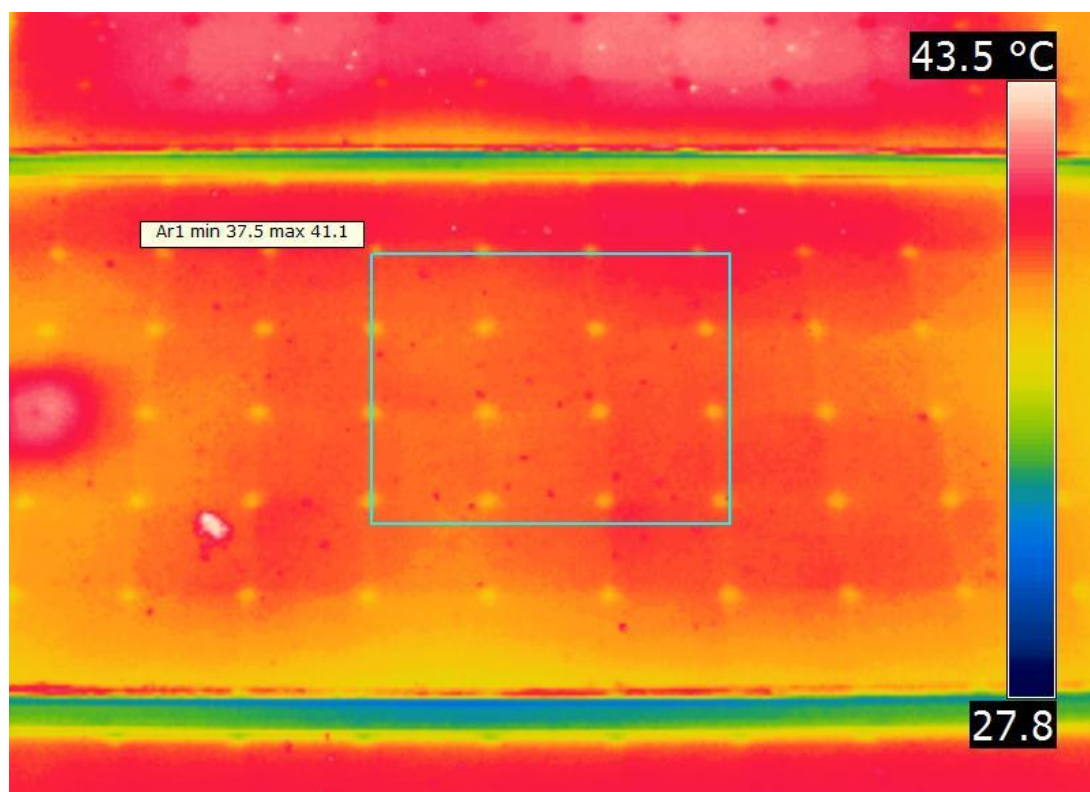
Obrázek 32 Modul s označením 15F a takzvaná šnečí cestička



Obrázek 33 Modul s označením 17F a takzvaná šnečí cestička

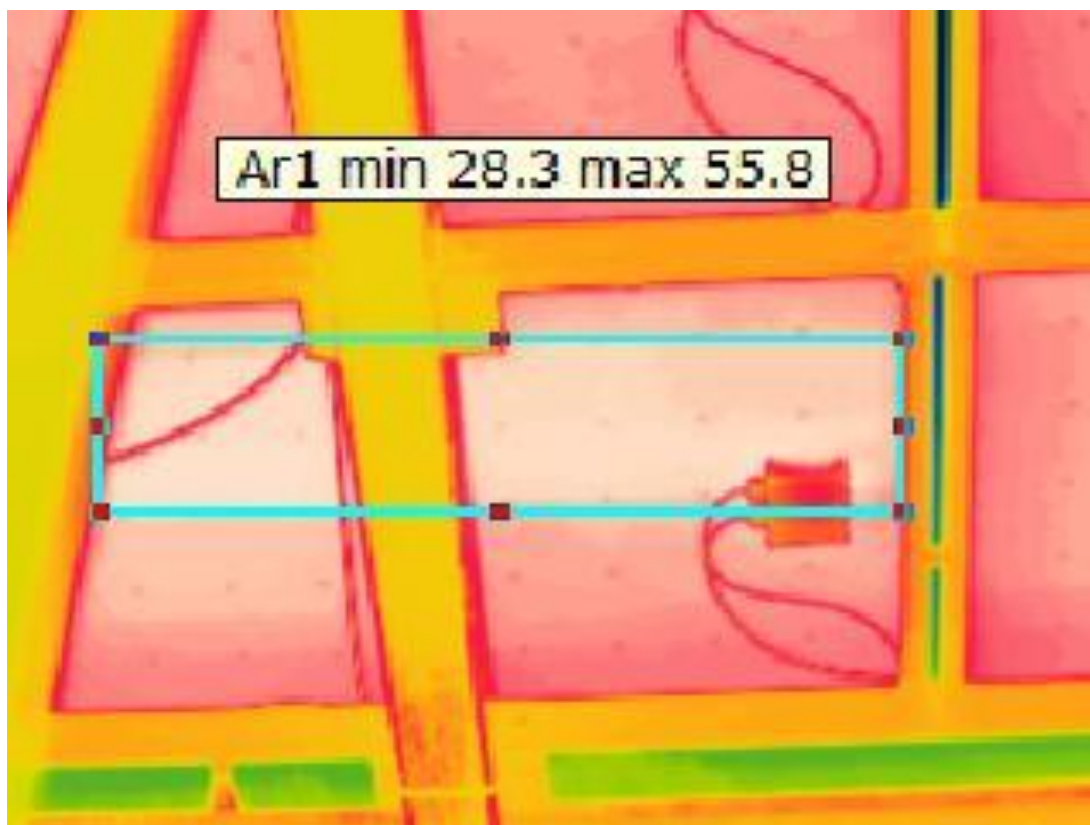


Obrázek 34 Modul s označením 16F s vadným FV článkem – zadní strana

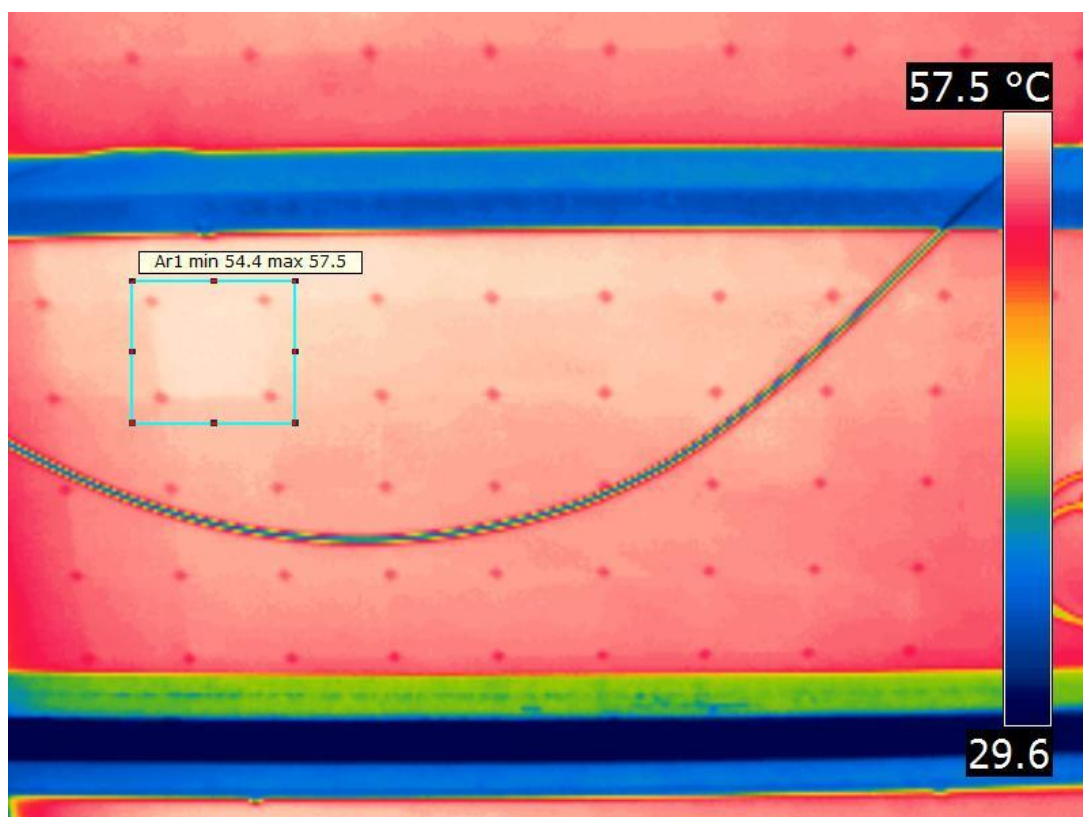


Obrázek 35 Modul s označením 16F s vadným FV článkem z přední - přední strana

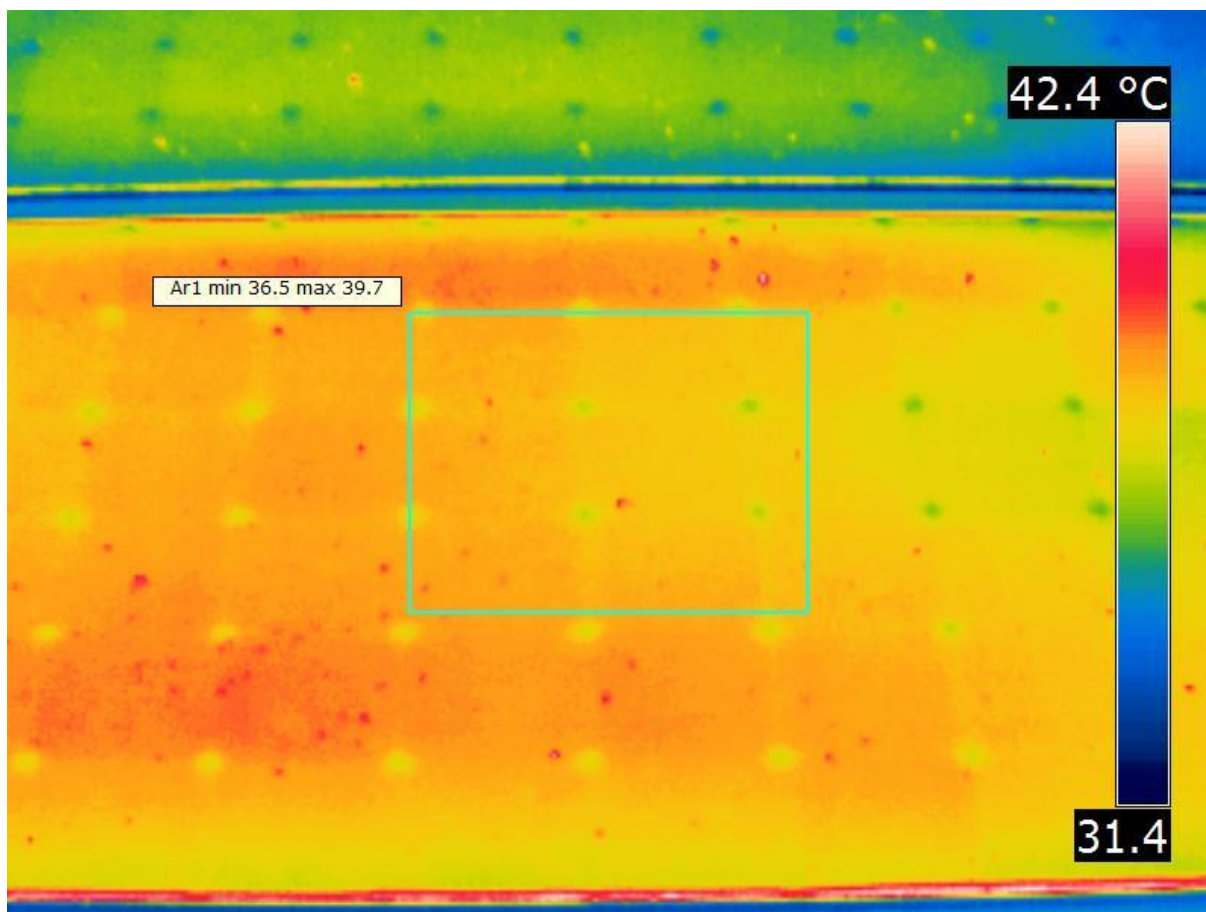




Obrázek 36 Modul s označením 19A s vadnou bypass diodou - zadní strana



Obrázek 37 Modul s označením 25C s vadným FV článkem - zadní strana



Obrázek 38 Modul s označením 13C

Po měření termokamerou vyšlo najevo, že celkem 6 modulů z fotovoltaické elektrárny na střeše Západočeské univerzity Fakulty elektrotechnické je poškozených. Ve dvou případech se jedná o vadný FV článek, ve dvou případech je závada pravděpodobně způsobena bypass diodou a je tak snížen výkon daných panelů zhruba o jednu třetinu. V posledních dvou případech se u modulů vyskytují takzvané šnečí cestičky, což jsou v podstatě praskliny či jiné nedokonalosti způsobené pravděpodobně atmosférickými vlivy.

Pro ukázkou jsou některé termogramy fotovoltaických modulů pořízeny jak z přední, tak ze zadní části panelu. Na snímcích z přední části si můžeme všimnout velkého množství nečistot viz termogram modulu s označením 13C. Nečistoty uložené na fotovoltaických modulech mohou způsobovat zkreslení výsledků při měření termokamerou, avšak pokud se jedná pouze o drobné nečistoty a prach, výkon panelů neovlivňují.

## 4 Zhodnocení výsledků měření a návrh doporučení k odstranění případných problémů

Celkové vyhodnocení funkčnosti a efektivity měřené fotovoltaické elektrárny je potřeba rozdělit do dvou dílčích etap, a to podle postupných kroků, kterými byla kondice systému ověřována. Konkrétně se jednalo o kontrolu systému pomocí termografie a následnou simulaci výroby a porovnání simulovaných a reálných hodnot.

Vzhledem k tomu, že byly použity dvě metody pro zjištění stavu fotovoltaického systému, dostáváme velmi dobrou představu o aktuálním stavu elektrárny, a to po téměř 17 letech provozu.

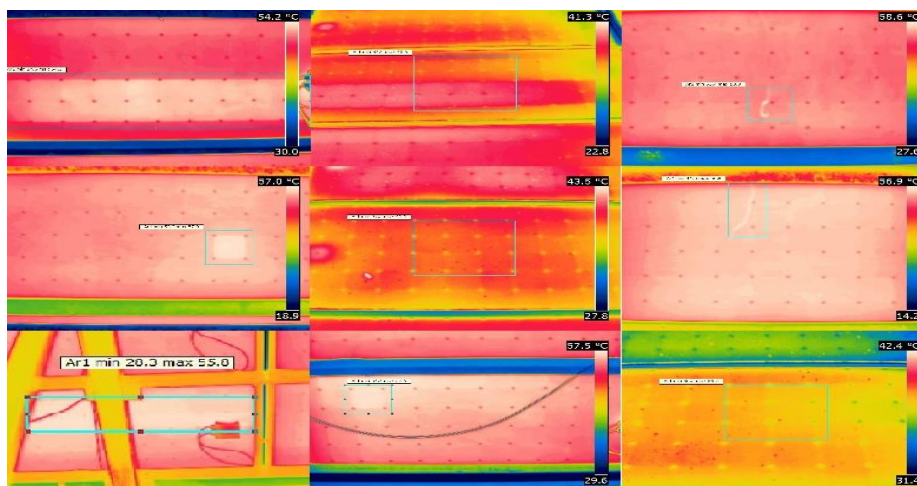
Výsledky měření jsou velmi zajímavé, právě vzhledem k době provozu fotovoltaické elektrárny. Fotovoltaická zařízení vyrobena a uvedena do provozu kolem roku 2005 většinou poskytovala garanci výkonu na prvních 15-20 let. Po určité časové období je výrobcem poskytována garance udržení 80 % původního výkonu i nyní, avšak jedná se zpravidla o 25 let.

Jak níže z výsledků uvidíme, nejsou vždy jednotlivé závěry z dílčích měření přímo korelační. Jako příklad nám může posloužit simulace výroby elektrické energie s termografickým měřením, které bylo k práci použito. Vzhledem k faktu, že měření výkonu probíhá kontinuálně po celý rok, nemůžeme brát v potaz jednotlivé poškození panelů jako přímou příčinu k poklesu výkonu v daném období. Kontrola termografií probíhala v létě ve dne 3.7.2019, přičemž panely mohly být poškozeny dávno před měřením a tím ovlivňovat množství vyrobené energie i v předchozích letech. Velmi důležitý je také časový rozestup při provádění měření. Fotovoltaické panely mohou za krátkou dobu projít velkou změnou, a to hlavně vlivem nadměrně nepříznivých klimatických podmínek.

Další důležitá věc, kterou je třeba při měření mít na paměti se týká především měření prováděné termokamerou. Při pořízení termogramu se nám objevují místa s vyšší teplotou, než je teplota samotného panelu. Není ovšem pravidlem, že každé místo s vyšší teplotou negativně ovlivňuje výkon fotovoltaického modulu a tím i celkovou vyrobenou energii.

## 4.1 Měření termokamerou

Jako první probíhalo měření za pomoci termokamery. K měření jsem použil termokameru od firmy FLIR s označením T335. Před samotným měřením bylo potřeba nastavit parametry jako je emisivita či teplota. Bez správného nastavení veličin ovlivňujících výsledné termogramy bychom dostali zkreslené výsledky. Samotné měření je poměrně rychlé a jednoduché, přičemž je zapotřebí přijít jednotlivě ke každému modulu, udržovat správnou vzdálenost, úhel a následně provést záznam. Po zhotovení termogramů ke všem jednotlivým fotovoltaickým modulům jsem prohlédl výsledné snímky v počítači. Při analýze termogramů jsem u některých snímků zjistil nerovnoměrné rozložení teploty na povrchu modulu, což indikuje nesprávnou funkčnost modulu. U těchto modulů jsem poté provedl kontrolu i z přední strany. Na obrázku níže jsou k nahlédnutí moduly, u kterých se objevilo nerovnoměrné rozložení teploty.



Obrázek 39 FV moduly s nerovnoměrným rozložením teploty (2D, 15F, 16F, 17F, 19A, 25C), u některých modulů jsou pořízeny termogramy z obou stran. Poslední snímek obsahuje ukázkou nečistoty.

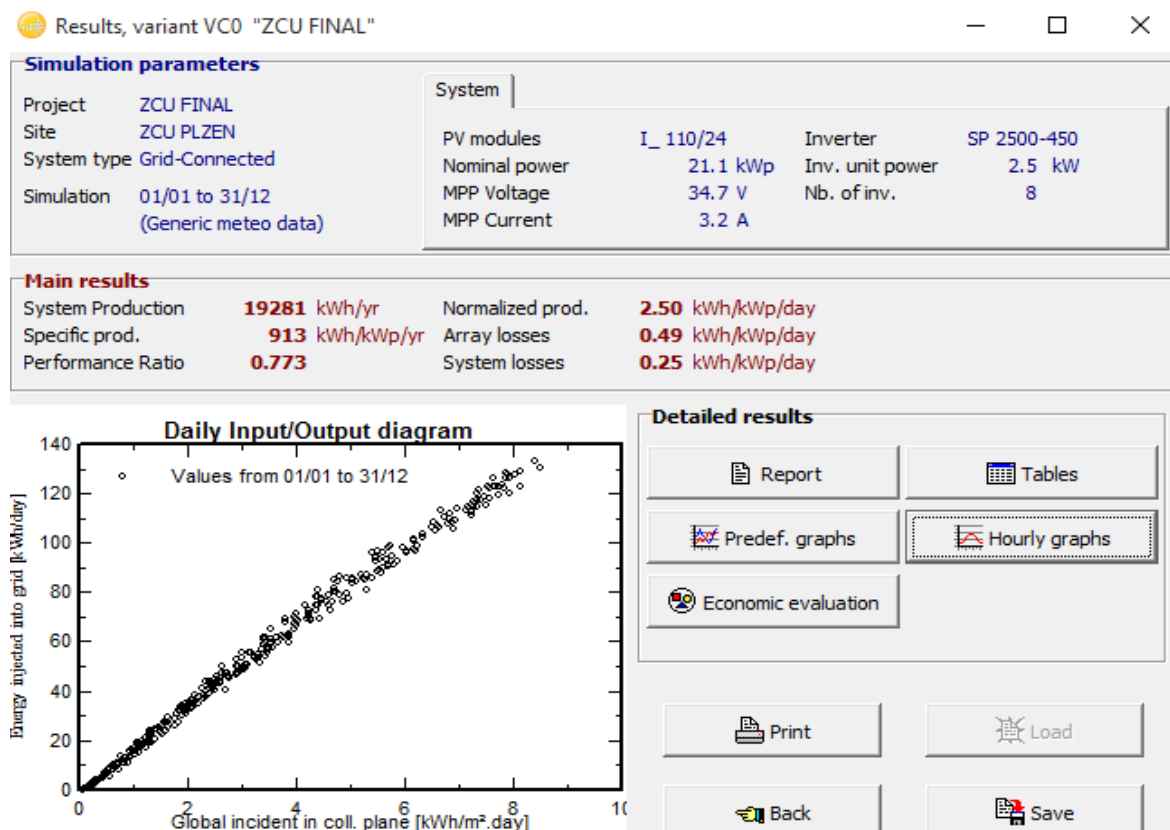
Měření za pomoci termokamery je velmi dobrým vyhodnocovacím nástrojem k určení případných chyb u fotovoltaických modulů. Pro jednoduché a rychlé zhodnocení stavu solárního systému je výhodné, po nějakém časovém úseku, provádět kontrolu za pomoci termografie. Výsledné termogramy nám pomohou odhalit případné vady, ať už současné či budoucí, a následnými opatřeními předejít potenciálně rozsáhlému poškození systému. Je pravdou, že některé nesrovnalosti v rozložení teplot nemusí mít nutně souvislost s výkonovým poklesem solárního systému.



## 4.2 Simulace a porovnání hodnot se skutečnou výrobou

Jako další krok byla zvolena simulace fotovoltaické elektrárny a porovnání nasimulovaných výsledků s reálnou výrobou. Nejprve jsem si vybral vhodný program k simulaci výroby elektrické energie ve fotovoltaickém systému. Po doporučení vedoucího práce jsem měl na výběr z několika programů a následně vybral program PVsyst. Tento konkrétní program byl zvolen jednak z důvodu jeho snadné dostupnosti – výrobce softwaru nabízí měsíc zdarma se všemi funkcemi jako v plné verzi a také kvůli jeho přívětivému uživatelskému prostředí.

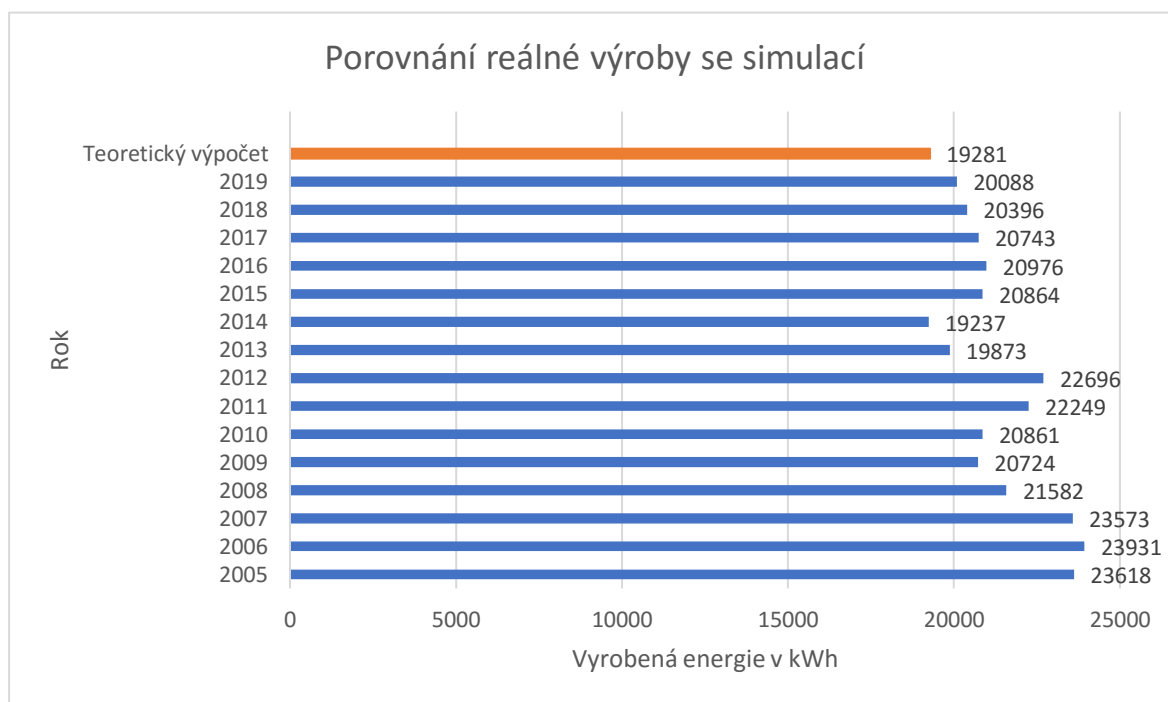
Nejprve se do simulačního programu zadají konkrétní parametry jako je poloha systému, sklon a orientace panelů, jejich typ, celkový počet panelů, případně jejich celková plocha, typ použitých střídačů a také se naimportují meteorologická data pro vybranou oblast. Zadání vstupních dat je velmi jednoduché a intuitivní, viz výše v kapitole 2.2 simulace v programu PVsyst. Následně program provede během pár vteřin výslednou simulaci a požadované hodnoty a tabulky zpracuje do tiskové zprávy. V programu si také můžeme poměrně jednoduše najít další výsledky ze simulací, které by nás mohly zajímat.



Obrázek 40 Možnosti simulačního programu

Na obrázku 40 vidíme, jaké jsou možnosti simulačního programu PVsyst, v jednotlivých kategoriích. Na pravé straně obrázku můžeme zobrazit například grafy nebo tabulky. Po otevření nějaké kategorie můžeme vybírat hodnoty, které budeme do grafu či tabulky chtít zaznamenat. Tlačítko report nám vytvoří tiskovou zprávu, která obsahuje nejdůležitější výsledky zpracované simulací.

Další podstatnou částí v oblasti simulace je její porovnání s reálnou výrobou. Samotná simulace nám může poskytnout mnoho informací a je velmi vhodné provádět ji i před samotnou stavbou solárního systému. Každá simulace má však své limity, a proto je doporučeno porovnat simulaci s reálnou výrobou. Na Fakultě elektrotechnické jsou zapisovány údaje o fotovoltaické elektrárně, které jsou k dispozici pro studenty. Konkrétní hodnoty jsem dostal k dispozici od vedoucího práce a poté je porovnal s výsledky mé simulace.



Graf 2 porovnání reálných a nasimulovaných hodnot

Jak můžeme z grafu vidět, fotovoltaická elektrárna byla nejvíce výkonná první tři roky po svém zprovoznění. Zároveň je z grafu patrné, že až na jeden rok, konkrétně 2014 byl skutečný výnos vyšší než odhadovaný. Nejméně elektrické energie vyrobila elektrárna v roce 2014, nejvíce v roce 2006. Odchylka z odhadované výroby činí (-0,3 až 24,1 %). Z těchto výsledků je patrné, že elektrárna pracuje velmi dobře a za sledované období vyrobila průměrně 21 427 kWh a tedy o 11,3 % více, než byl teoretický předpoklad.

### 4.3 Doporučení k odstranění nedostatků

Na solárních systémech dochází k přirozené degradaci hlavně z důvodu stárnutí a jejich vystavení atmosférickým vlivům. Po určité době se projevuje stáří a únava materiálu, nedokonalost spojů či jen drobné oděrky a nepřesnosti ve výrobě. Tyto vady, které jsou při uvedení do provozu neznatelné se mohou časem rozšířit a způsobit pokles výkonu systému.

Při vizuální prohlídce fotovoltaického systému jsem zjistil, že některé panely vykazují jisté drobné prasklinky a škrábance. Ne všechny drobné oděrky však mají vliv na výkon systému. Při kontrole za pomoci termografie bylo odhaleno celkem 6 panelů s většími vadami, které jsou zřetelně viditelné na výše zobrazených termogramech. Jedná se o tři typy vad, a to konkrétně praskliny, vadné fotovoltaické články a vadné bypass diody, které slouží k přemostění.

Na celkový výkon mají největší vliv hlavně bypass diody, které způsobují pokles výkonu FV modulu zhruba o 1/3. Další nezanedbatelný vliv na výkon mají vadné fotovoltaické články. U těchto fotovoltaických článků však není pokles výkonu tak velký jako v případě bypass diod. Pro škrábance a praskliny platí, že nemusí mít přímý vliv na pokles výkonu, ale mohou způsobit vážnější problém v budoucnu z důvodu přehřívání modulů vlivem poškozených částí. Na první pohled se u vadných bypass diod a fotovoltaických článků nezdá patrné poškození, což nasvědčuje nejspíše vnitřnímu poškození těchto součástí.

Pro bezchybnou funkčnost mnou zkoumaného systému by bylo vhodné především vyměnit bypass diody, které jsou poškozené na modulech s označením 2D a 19A. Dále by bylo dobré vyměnit jednotlivé vadné fotovoltaické články z modulů 16F a 25C. Co se týče drobných prasklin a oděrek, doporučuji je průběžně sledovat po rozumných časových obdobích a v případě, že by začali zásadně ovlivňovat funkčnost systému, vyměnit poškozené části.

Další opatření, které by vedlo ke zvýšení efektivity fotovoltaického systému a prodloužení životnosti článků je jejich cílené ochlazování. Jak již bylo výše zmíněno, fotovoltaické systémy pracují lépe při nižších teplotách. Toto opatření by však vedlo ke zvýšení nákladů na provoz a nebylo by ekonomicky výhodné. Jako velmi důležité vnímám další sledování celého systému, aby bylo při případných problémech možné provést rychlá opatření vedoucí k nápravě. Drobné nedostatky se totiž mohou vyřešit snáze a ekonomičtěji než ty vážnější způsobené dlouhodobým provozem nesprávně fungujícího systému.

## Závěr

Předkládaná diplomová práce se zabývala kontrolním měřením malé fotovoltaické elektrárny, která je umístěna na střeše budovy Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Předmětem práce bylo provést kontrolu systému za využití měření a počítačové simulace a určit aktuální stav a stupeň degradace elektrárny.

Jako první jsem v létě zkontroloval vizuální stav a opotřebení fotovoltaických modulů a poté jsem použil k jejich kontrole termokameru. Výsledkem z této kontroly byly termogramy pořízené termokamerou FLIR T335, které posloužily k dalšímu zpracování.

Po vyhotovení termogramů jsem se věnoval prvnímu bodu zadání práce, a to popisu systému. K popisu parametrů solárního systému posloužily odborné zdroje a technická dokumentace dodaná vedoucím práce. Po vyhotovení úvodní teoretické části jsem se začal věnovat vlastnímu praktickému zhodnocení stavu systému.

Jako další jsem provedl softwarovou simulaci v programu PVsyst, kde byly jako vstupní parametry použity data získané z technické dokumentace, hodnoty odečtené z jednotlivých komponent systému a v neposlední řadě meteorologická data pro danou lokalitu, která byla získána z databáze Meteonorm. Ve chvíli, kdy jsem měl simulaci hotovou, mohl jsem přikročit k porovnání výsledků simulace s reálnými hodnotami vyrobené energie. Tyto hodnoty mi byly poskytnuty vedoucím práce z databáze, která je na příslušné katedře vedena od spuštění provozu elektrárny. Při porovnání hodnot bylo zjištěno, že elektrárna vyrábí průměrně o cca 11 % energie více. Až na rok 2014 byly vždy reálné výnosy vyšší než předpokládané. V tabulce 4 je možné pozorovat mírně sestupný trend vyrobené energie oproti prvním rokům provozu. Mírný pokles je však očekáván, a to hlavně vlivem přirozené degradace systému.

Dalším krokem bylo zpracování termogramů pořízených v létě. Analýza probíhala zkoumáním jednotlivých snímků v programu FLIR quickreport. Následně jsem vybral snímky, na kterých bylo patrné rozdílné rozložení teploty a u nich posléze určil typ vady fotovoltaického modulu. Z analýzy snímků vyplynulo, že se jedná o tři vady – vadná bypass dioda, vadný fotovoltaický článek, anebo se jednalo o praskliny způsobené atmosférickými vlivy. Jako nejhorší se jeví vadná bypass dioda, která snižuje výkon cca o 1/3 oproti zdravému fotovoltaickému modulu. Jedná se o běžnou vadu u solárních modulů a její případné odstranění není náročné ani

drahé. Další dvě vady příliš neovlivňují výkon systému, avšak není dobré je přehlížet. U systému pracujících s vysokou teplotou mohou vést nedokonalosti k většímu oteplení důsledkem procházení elektrického proudu a tím k horším následkům. Proto doporučuji výměnu vadných bypass diod, případně výměnu vadných fotovoltaických článků a zbytek solárního systému v rozumných intervalech dále sledovat, aby bylo zabráněno případnému poškození.

Vzhledem k tomu, že bylo použito měření za pomoci termografie a současně porovnání softwarové simulace výroby s jejími reálnými hodnotami, můžeme celkem přesně určit stav elektrárny a stupeň její degradace. V závislosti na výsledné vyrobené energii v průběhu jednotlivých let a malém počtu poškozených fotovoltaických modulů lze konstatovat, že měřená solární elektrárna je ve velmi dobrém stavu i po 17 letech od uvedení do provozu.

Další zpřesňující výsledky bychom dostali při proměření volt-ampérových charakteristik jednotlivých fotovoltaických modulů. K měření V-A charakteristik může sloužit I-V analyzátor, který má tu výhodu, že automaticky přepočítá změřené hodnoty na standartní testovací podmínky. Další možností je měření za pomoci dvou multimetrů a odporové dekády. Bohužel měření V-A charakteristiky nebylo možné provést z důvodu nefunkčnosti příslušného I-V analyzátoru a komplikacím spojených s nákazou COVID-19.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Úvod do FV systémů - CNE Czech Nature Energy, a. s.. Hlavní strana - CNE Czech Nature Energy, a. s. [online]. Copyright © 2020 [cit. 22.11.2019]. Dostupné z: <http://www.cne.cz/fotovoltaiicke-systemy/uvod-do-fv-systemu/>
- [2] Domovske stranky uzivatele [online]. Copyright ©I [cit. 22.11.2019]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~skorpil/OZP/OZP11.ppt>
- [3] HASELHUHN, Ralf. Fotovoltaika - Budovy jako zdroj proudu. 1. české vyd. Ostrava: HEL, 2010. 176 s. ISBN 978-80-86167-33-6.
- [4] Fotovoltaika - sluneční záření v České republice. Isofen Energy - titulní stránka [online]. Copyright © 2009 Isofen Energy s.r.o. [cit. 27.11.2019]. Dostupné z: <http://www.isofenenergy.cz/Slunecni-zareni-v-CR.aspx>
- [5] Profesis | základní informace k výkonu odborných profesí ve výstavbě. Profesis | základní informace k výkonu odborných profesí ve výstavbě [online]. Dostupné z: <https://www.protesis.cz/parser/go/>
- [6] Termokamera (termovizní kamera) FLIR T335. Termovize - termovizní kamery (termokamery) FLIR, termovizní měření [online]. Dostupné z: <http://www.termogram.cz/termovizni-kamera-flir-T335>
- [7] Měnit nebo neměnit FV panely. [online]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaiika/18237-menit-nebo-nemenit-fv-panely>
- [8] TR instruments - Měřicí přístroje a monitorovací systémy [online]. Copyright © [cit. 02.02.2020]. Dostupné z: <http://www.trinstruments.cz/data/files/flir-t335-datasheet-875.pdf>
- [9] Měření teploty – bezkontaktní teploměry a termovizní kamery - Časopis Elektro - Odborné časopisy. Odborné časopisy [online]. Copyright © 2014 [cit. 07.02.2020]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/mereni-teploty-bezkontaktni-teplomery-a-termovizni-kamery--13376>
- [10] Termovize, Termokamera, Infračervená kamera - přístroj pro detek. E-myslivost.cz [online]. Copyright ©2014 ADweby.com a Dooffy design, e [cit. 21.02.2020]. Dostupné z: <https://www.e-myslivost.cz/cs/termovize-termokamera-infracervena-kamera-pristroj-pro-detekci-tepla.html>
- [11] BEDNARČÍK, Petr. Termografické měření FV elektrárny. Diplomová práce ZČU v Plzni, 2016
- [12] Svět Energie - Svět energie.cz [online]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/data/web/powerplant/slunecni-elektrarny/fotovoltaiicky-jev.svg>
- [13] VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ - PDF Free Download. Představujeme Vám pohodlné a bezplatné nástroje pro publikování a sdílení informací. [online]. Copyright © DocPlayer.cz [cit. 12.03.2020]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/29030858-Vysoke-uceni-technicke-v-brne.html>

- [14] 403 Forbidden [online]. Copyright © [cit. 27.03.2020]. Dostupné z: [http://departments.fsv.cvut.cz/k102/sites/default/files/k102/vyuka/predmety/soubory/Navod\\_FP\\_5.pdf](http://departments.fsv.cvut.cz/k102/sites/default/files/k102/vyuka/predmety/soubory/Navod_FP_5.pdf)
- [15] Nejpoužívanější pojmy ve fotovoltaice. [online]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/11772-nejpouzivanejsi-pojmy-ve-fotovoltaice>
- [16] Part 1: Photovoltaic (PV) Cells | ITACA. ITACA | The application of Appropriate Technology [online]. Dostupné z: <https://www.itacanet.org/a-guide-to-photovoltaic-panels/photovoltaic-pv-cells/>
- [17] [online]. Copyright © [cit. 08.05.2020]. Dostupné z: [https://fel.zcu.cz/export/sites/fel/obrazky/DOD/FEL/01\\_fel\\_budova.jpg](https://fel.zcu.cz/export/sites/fel/obrazky/DOD/FEL/01_fel_budova.jpg)
- [18] Katedra elektroenergetiky a ekologie, ZČU v Plzni [online]. Copyright © [cit. 10.05.2020]. Dostupné z: <https://www.kee.zcu.cz/images/laboratore/strecha.jpeg>
- [19] [online]. Copyright ©c [cit. 11.05.2020]. Dostupné z: [https://lh3.googleusercontent.com/proxy/o46eZ5LhiSj2vfXkhctFgZFj2BET5Zu5ad9vm90pKmwWoY0zWMW2kf8nClg2KC\\_K4HGiinWj1sIwCpseOvBLA0Zz](https://lh3.googleusercontent.com/proxy/o46eZ5LhiSj2vfXkhctFgZFj2BET5Zu5ad9vm90pKmwWoY0zWMW2kf8nClg2KC_K4HGiinWj1sIwCpseOvBLA0Zz)
- [20] DSpace at University of West Bohemia: NO TITLE [online]. Copyright © [cit. 11.05.2020]. Dostupné z: <https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/26874/1/Diplomova%20prace-Milan%20Flor.pdf>
- [21] [online]. Dostupné z: [https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn%3AANd9GcT\\_FjWSBilJFq1llGFEJlnPKxoOFn7PngUXcVkQZ4SGDgyooDub&usqp=CAU](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn%3AANd9GcT_FjWSBilJFq1llGFEJlnPKxoOFn7PngUXcVkQZ4SGDgyooDub&usqp=CAU)



## Seznam obrázků

Obrázek 1 Fakulta elektrotechnická [17].....	12
Obrázek 2 Umístění FV modulů [18].....	13
Obrázek 3 Střídače FVE [19] .....	15
Obrázek 4 Účinnost střídačů [2].....	16
Obrázek 5 Připojovací skříň FVE [20].....	17
Obrázek 6 Rozvaděč FVE [21].....	18
Obrázek 7 Experimentální část FVE.....	21
Obrázek 8 Intenzita slunečního záření [4].....	22
Obrázek 9 Doba slunečního svitu [4].....	23
Obrázek 10 Intenzita slunečního záření v závislosti na orientaci a sklonu [5].....	24
Obrázek 11 Tok energie a ztráty FV zařízení připojeného do sítě [3].....	26
Obrázek 12 GPS poloha.....	28
Obrázek 13 Import dat .....	28
Obrázek 14 Sklon a orientace systému.....	29
Obrázek 15 Zadání parametrů do programu PVsyst .....	30
Obrázek 16 Diagram ztrát .....	32
Obrázek 17 Prasklý FV modul [7].....	35
Obrázek 18 Princip fotovoltaického jevu [12].....	36
Obrázek 19 Vedení proudu, rekombinace [13].....	37
Obrázek 20 Náhradní schéma fotovoltaického článku [13].....	38
Obrázek 21 Tok energie [13].....	38
Obrázek 22 V-A charakteristika FV článku [14] .....	39
Obrázek 23 Vliv intenzity slunečního záření na proud, napětí a výkon [15].....	41
Obrázek 24 Závislost proudu a napětí na teplotě [16].....	42
Obrázek 25 Termokamera FLIR T335 [6].....	43
Obrázek 26 Schéma termovizního měření [10] .....	44
Obrázek 27 Závislost emisivity na úhlu [11].....	45
Obrázek 28 Termogram – celkový pohled na elektrárnu zezadu .....	46
Obrázek 29 Ukázka úpravy z programu FLIR quick report .....	48
Obrázek 30 Modul s označením 2D s vadnou bypass diodou – zadní strana.....	50
Obrázek 31 Modul s označením 2D s vadnou bypass diodou – přední strana.....	50
Obrázek 32 Modul s označením 15F a takzvaná šnečí cestička.....	51
Obrázek 33 Modul s označením 17F a takzvaná šnečí cestička.....	51
Obrázek 34 Modul s označením 16F s vadným FV článkem – zadní strana .....	52
Obrázek 35 Modul s označením 16F s vadným FV článkem z přední - přední strana .....	52
Obrázek 36 Modul s označením 19A s vadnou bypass diodou - zadní strana .....	53
Obrázek 37 Modul s označením 25C s vadným FV článkem - zadní strana.....	53
Obrázek 38 Modul s označením 13C .....	54
Obrázek 39 FV moduly s nerovnoměrným rozložením teploty (2D, 15F, 16F, 17F, 19A, 25C), u některých modulů jsou pořízeny termogramy z obou stran. Poslední snímek obsahuje ukázkou nečistot .....	56
Obrázek 40 Možnosti simulačního programu.....	57

## Seznam tabulek

Tabulka 1 Parametry FV modulu I-110/24.....	14
Tabulka 2 Štítkové hodnoty střídače.....	16
Tabulka 3 Energetická bilance solárního systém.....	31
Tabulka 4 Výroba elektrické energie ve sledovaných obdobích.....	33
Tabulka 5 Schématické naznačení rozložení panelů.....	49

## Seznam grafů

Graf 1 Porovnání reálné výroby s teoretickou.....	34
Graf 2 Porovnání reálných a nasimulovaných hodnot.....	58

## Přílohy

## Příloha A – Výsledky softwarové simulace v programu PVsyst

PVSYST V6.86		19/03/20	Page 1/4
<b>Grid-Connected System: Simulation parameters</b>			
<b>Project :</b> ZCU FINAL			
<b>Geographical Site</b>	ZCU PLZEN	Country	Czech Republic
<b>Situation</b>	Latitude	49.72° N	Longitude 13.35° E
Time defined as	Legal Time	Time zone UT+1	Altitude 355 m
	Albedo	0.20	
<b>Meteo data:</b>	ZCU PLZEN	Meteonorm 7.2 (1991-2010), Sat=100% - Synthetic	
<b>Simulation variant :</b> ZCU FINAL			
	Simulation date	19/03/20 12h36	
<b>Simulation parameters</b>	System type	No 3D scene defined, no shadings	
<b>Collector Plane Orientation</b>	Tilt	45°	Azimuth -10°
<b>Models used</b>	Transposition	Perez	Diffuse Perez, Meteonorm
<b>Horizon</b>	Free Horizon		
<b>Near Shadings</b>	No Shadings		
<b>User's needs :</b>	Unlimited load (grid)		
<b>PV Array Characteristics</b>			
<b>PV module</b>	Si-mono	Model	I_110/24
Original PVsyst database	Manufacturer	Isofoton	
Number of PV modules	In series	8 modules	In parallel 24 strings
Total number of PV modules	Nb. modules	192	Unit Nom. Power 110 Wp
Array global power	Nominal (STC)	21.12 kWp	At operating cond. 19.02 kWp (50°C)
Array operating characteristics (50°C)	U mpp	249 V	I mpp 76 A
Total area	Module area	164 m <sup>2</sup>	Cell area 145 m <sup>2</sup>
<b>Inverter</b>			
	Model	SP 2500-450	
Original PVsyst database	Manufacturer	Sun Power	
Characteristics	Operating Voltage	194-400 V	Unit Nom. Power 2.50 kWac
Inverter pack	Nb. of inverters	8 units	Total Power 20 kWac
			Pnom ratio 1.06
<b>PV Array loss factors</b>			
Thermal Loss factor	Uc (const)	20.0 W/m <sup>2</sup> K	Uv (wind) 0.0 W/m <sup>2</sup> K / m/s
Wiring Ohmic Loss	Global array res.	55 mOhm	Loss Fraction 1.5 % at STC
Module Quality Loss			Loss Fraction 5.0 %
Module Mismatch Losses			Loss Fraction 1.0 % at MPP
Strings Mismatch loss			Loss Fraction 0.10 %
Incidence effect, ASHRAE parametrization	IAM =	1 - bo (1/cos i - 1)	bo Param. 0.05

PVsyst Evaluation mode

