

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Kontrolní měření FVE malého výkonu**

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**Fakulta elektrotechnická**  
Akademický rok: **2016/2017**

**ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Milan FLOR**  
Osobní číslo: **E15N0085P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Technická ekologie**  
Název tématu: **Kontrolní měření FVE malého výkonu**  
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

**Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :**

1. Popište parametry a jednotlivé komponenty analyzovaného systému.
2. Porovnejte softwareovou simulaci systému s reálnou výrobou.
3. Proveďte základní kontrolu FV panelů systému pomocí termografie.
4. Změřte podrobně V-A charakteristiky za různých provozních podmínek.
5. Zhodnoťte výsledky měření a navrhněte doporučení k odstranění případných problémů.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:

**1. přednášky KEE/SOES**

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

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2016**  
Termín odevzdání diplomové práce: **19. května 2017**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



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

V Plzni dne 14. října 2016

## **Abstrakt**

Předmětem předkládané diplomové práce je kontrolní měření FVE malého výkonu. V práci jsou popsány parametry a jednotlivé komponenty analyzovaného systému. Dále je provedena softwarová simulace systému a ta je následně porovnána s reálnou výrobou. Práce se také zabývá základní kontrolou systému FV panelů pomocí termografie. Poslední části práce jsou zaměřeny na měření podrobných V-A charakteristik za různých provozních podmínek, zhodnocení výsledků měření a na návrh doporučení k odstranění případných problémů.

## **Klíčová slova**

Fotovoltaická elektrárna, fotovoltaický systém, fotovoltaický generátor, fotovoltaický modul, fotovoltaický článek, intenzita slunečního záření, teplota, termovizní měření, V-A charakteristika, výkonová charakteristika.

**Abstract**

The diploma thesis is focused on control measurements of photovoltaic power plant with low power. Parameters and individual components of the analysed system are described in the work. Next a software simulation of the system is performed and after that it is compared to the real production. This study also deals with the basic check of the system of photovoltaic panels using thermography. The last parts of the work is focused on the measurement of detailed V-A characteristics under different operating conditions, evaluation of measurement results and a proposal of recommendations to eliminate potential problems.

**Key words**

Photovoltaic power plant, photovoltaic system, photovoltaic generator, photovoltaic module, photovoltaic cell, intensity of solar radiation, temperature, thermal measurement, V-A characteristic, power characteristic.

## 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 19.5.2017

Bc. Milan Flor

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Milanu Bělíkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat všem učitelům Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni, kteří mi po dobu mého studia poskytli mnoho drahocenných informací. Na závěr též děkuji za věčnou podporu všem přátelům a rodině.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>10</b>
<b>1 PARAMETRY A JEDNOTLIVÉ KOMPONENTY ANALYZOVANÉHO SYSTÉMU</b> .....	<b>11</b>
1.1 POPIS FV MODULŮ MĚŘENÉ FVE.....	11
1.1.1 <i>Technické parametry FV modulu</i> .....	12
1.2 GEOGRAFICKÉ UMÍSTĚNÍ FVE.....	13
1.3 STRÍDAČE FVE.....	17
1.4 PŘIPOJOVACÍ SKŘÍŇ FV GENERÁTORU.....	19
1.5 ROZVADĚČ FVE.....	20
1.6 KABELY A VEDENÍ FVE.....	21
<b>2 SOFTWAREVÁ SIMULACE FV SYSTÉMU A POROVNÁNÍ S REÁLNOU VÝROBOU</b> .....	<b>23</b>
2.1 ZADÁNÍ KONKRÉTNÍCH ÚDAJŮ O MĚŘENÉM FV SYSTÉMU DO DATABÁZE SIMULAČNÍHO PROGRAMU PVSYST.....	24
2.2 VÝSLEDKY SOFTWAREVÉ SIMULACE FV SYSTÉMU V PROGRAMU PVSYST.....	27
2.3 REÁLNÁ VÝROBA ELEKTRICKÉ ENERGIE MĚŘENÉ FVE.....	28
2.4 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ SOFTWAREVÉ SIMULACE FV SYSTÉMU S REÁLNOU VÝROBOU.....	30
<b>3 ZÁKLADNÍ KONTROLA SYSTÉMU FV PANELŮ POMOCÍ TERMOGRAFIE</b> .....	<b>31</b>
3.1 PRINCIP TERMOVIZNÍHO MĚŘENÍ.....	31
3.2 PŘEDNOSTI TERMOVIZNÍHO MĚŘENÍ FV MODULŮ.....	32
3.3 PODMÍNKY PRO CO MOŽNÁ NEJLEPŠÍ VÝSLEDKY TERMOVIZNÍHO MĚŘENÍ FV MODULŮ.....	33
3.4 VÝSLEDKY TERMOVIZNÍHO MĚŘENÍ ZKOUMANÝCH FV MODULŮ.....	34
<b>4 MĚŘENÍ V-A CHARAKTERISTIK ZKOUMANÝCH FV MODULŮ</b> .....	<b>44</b>
4.1 ANALYZÁTOR FV MODULŮ HT INSTRUMENTS I-V 400.....	44
4.2 VLIV FV ČLÁNKŮ NA V-A CHARAKTERISTIKY FV MODULŮ.....	47
4.2.1 <i>Princip FV článku</i> .....	47
4.2.2 <i>Základ FV článku</i> .....	48
4.2.3 <i>Účinnost a výkon FV článků</i> .....	50
4.2.4 <i>Citlivost FV článků na počasí</i> .....	51
4.3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ V-A CHARAKTERISTIK ZKOUMANÝCH FV MODULŮ.....	53
4.4 VÝSLEDKY MĚŘENÍ V-A CHARAKTERISTIK ZKOUMANÝCH FV MODULŮ PŘI RŮZNÝCH PROVOZNÍCH PODMÍNKÁCH.....	59
<b>5 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ A NÁVRH DOPORUČENÍ K ODSTRANĚNÍ PŘÍPADNÝCH PROBLÉMŮ</b> .....	<b>63</b>
5.1 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ ZKOUMANÉ FVE.....	63
5.2 NÁVRH DOPORUČENÍ K ODSTRANĚNÍ PROBLÉMŮ.....	66
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>67</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>68</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>1</b>



## Úvod

Předmětem této práce je kontrolní měření FVE malého výkonu na střeše budovy Elektrotechnické fakulty Západočeské univerzity v Plzni.

Práce je rozdělena do pěti částí. První obsahuje popis parametrů a jednotlivých komponentů analyzovaného systému. V druhé části je provedena softwarová simulace systému, která je porovnána s reálnou výrobou. Třetí se orientuje na základní kontrolu systému FV panelů pomocí termografie. Čtvrtá část zahrnuje měření podrobných V-A charakteristik při různých provozních podmínkách. Poslední pátá část je zaměřena na zhodnocení výsledků měření a navrhuje doporučení k odstranění případných problémů.

Nejvíce řešeným a diskutovaným problémem v současné době je výroba elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Solární elektrárny, přeměňující sluneční energii na elektrickou za pomoci FV článků, využívají vůbec ten nejlepší a nejdostupnější obnovitelný zdroj elektrické energie, což je sluneční záření. Solární panely se neustále vyvíjejí, stávají se cenově dostupnější a jsou čím dál tím více efektivnější. Sluneční energie není jen velmi ekologická, ale co je hlavní, je i lukrativní. Z těchto důvodů je využívání fotovoltaiky v dnešní době velmi atraktivní a na vzestupu. Ve stále větším počtu se FV zařízení objevují na střeších a fasádách všech možných budov, ať už jsou to obchodní domy, rodinná sídla, všelijaké administrativní budovy apod.

FVE jsou oproti jiným zdrojům elektrické energie poměrně technologicky jednoduchá zařízení, protože FV zařízení po nainstalování a uvedení do provozu na konkrétním místě potřebují jen minimální kontrolu a údržbu. Důležitá je ale jejich průběžná kontrola po nějakém daném časovém horizontu, protože i každá malá porucha může mít značný vliv na výkon celé FVE. Nejobtížnější práce při kontrolním měření je právě tyto všechny poruchy správně najít, lokalizovat, vyhodnotit a následně zvolit nejefektivnější způsob řešení na odstranění těchto nežádoucích problémů. Pro kontrolní měření FVE jsou k dispozici různé postupy a metody. Některé z těch nejpoužívanějších pro vyhodnocení závad na FV zařízeních jsou provedeny a popsány v mé práci.

## Seznam symbolů a zkratk

FVE.....	Fotovoltaická elektrárna
FV.....	Fotovoltaický
V-A (I-V).....	Voltampérová
nn.....	Nízké napětí
STC.....	Standardní zkušební podmínky
$P_{MPP}$ ( $P_{MAX}$ ) .....	Jmenovitý maximální výkon
$V_{OC}$ .....	Napětí naprázdno
$I_{SC}$ .....	Zkratový proud
$V_{MPP}$ .....	Napětí při maximálním výkonu
$I_{MPP}$ .....	Proud při maximálním výkonu
$\eta_{STC}$ .....	Jmenovitá účinnost solárního panelu
FF.....	Faktor plnění
$V_{MAX}$ .....	Maximální systémové napětí
MPP .....	Bod maximálního výkonu
IP.....	Stupeň krytí
UV .....	Ultrafialové záření
PVC .....	Polyvinylchlorid
PR .....	Koeficient výkonnosti
$E_{real}$ .....	Skutečný energetický výnos
$E_{ideal}$ .....	Teoreticky očekávaný energetický výnos
e .....	Intenzita slunečního záření
$A_{PV}$ .....	Plocha solárního generátoru
GlobHor.....	Globální horizontální záření
DiffHor .....	Difúzní horizontální záření
T Amb.....	Okolní teplota
GlobInc .....	Energie dopadající v rovině kolektoru
GlobEff.....	Energie dopadající na kolektory, korigovaná na optické ztráty
EArray .....	Energie na výstupu ze solárního generátoru
E_Grid .....	Energie dodaná do sítě
AM.....	Hmotnostní faktor vzduchu

# 1 Parametry a jednotlivé komponenty analyzovaného systému

Měřená FVE malého výkonu se nachází na střeše budovy Elektrotechnické fakulty Západočeské univerzity v Plzni. FV zařízení byla instalována a spuštěna do provozu v roce 2003 v rámci projektu Evropské unie s názvem PV Enlargement na FEL ZČU Plzeň. V té době to byla jedna z pěti největších instalací FVE na území České republiky.



Obr. 1.1 Budova Elektrotechnické fakulty Západočeské univerzity v Plzni

## 1.1 Popis FV modulů měřené FVE

FVE je tvořena 192 FV panely o celkovém instalovaném výkonu 20 kWp elektricky rozdělenými do 8 samostatných FV polí E1 – E8. Každé jednotlivé pole je připojeno k vlastnímu střídači, který vyrobenou elektrickou energii dodává do sítě nn v budově elektrotechnické fakulty. V každém jednotlivém poli je 24 FV modulů, které jsou dále rozděleny na tři větve po 8 modulech a jsou zapojeny mezi sebou sérioparalelně. Poté jsou vyvedeny do svého střídače. Všechny tyto FV panely jsou vyrobeny z monokrystalického křemíku s typovým označením I-110/24 od firmy Isofotón s.r.o. ze Španělska. Celková instalovaná plocha panelů je 164 m<sup>2</sup>. Jeden FV modul se skládá ze 72 monokrystalických křemíkových článků. FV panely jsou uloženy na zinkované ocelové konstrukci s dlouhou životností a trvanlivostí, která je orientována na jižní světovou stranu s úhlem sklonu 45°.

Díky předešlým vlastnostem a umístění FVE, jsou FV moduly velmi snadno dostupné z obou stran, což je velmi výhodné z hlediska kontroly a údržby [1].



Obr. 1.2 Měřená FVE na střeše budovy Elektrotechnické fakulty v Plzni

### 1.1.1 Technické parametry FV modulu

Všichni výrobci FV panelů udávají základní parametry elektrických charakteristik jednotlivých modulů v technickém listu nebo se lze s nimi také setkat přímo na štítku ze zadní strany panelu. Všechny tyto hodnoty FV článků a modulů se měří ve speciálních laboratořích za pevně definovaných světelných a teplotních podmínek. Následně výsledky těchto zkoušek jsou uvedeny jako jmenovité hodnoty jednotlivých FV panelů. Takto provedená měření se dělají hlavně kvůli tomu, aby se daly vzájemně porovnat různé FV panely mezi sebou, nezávisle na daném počasí a stanovišti. V reálném prostředí je velice složité se alespoň trochu přiblížit k laboratorním podmínkám, protože standardní zkušební podmínky STC (Standard Test Conditions), při kterých se měří v laboratořích elektrické charakteristiky FV panelů, se vyskytují v praxi jen velmi zřídka. Z těchto všech předešlých důvodů vyplývá, že FV zařízení pracují jen málokdy ve jmenovitém provozním režimu [2]. V *Tab. 1.1* jsou uvedeny některé základní elektrické charakteristiky FV modulu z monokrystalického křemíku s typovým označením I-110/24, které udává výrobce.

Elektrické charakteristiky	
STC jmenovitý výkon $P_{MPP}$ (W)	110
Napětí naprázdno $V_{OC}$ (V)	43,2
Zkratový proud $I_{SC}$ (A)	3,38
Napětí při maximálním výkonu $V_{MPP}$ (V)	34,8
Proud při maximálním výkonu $I_{MPP}$ (A)	3,16
Jmenovitá účinnost panelu $\eta_{STC}$ (%)	12,9
Faktor plnění FF (%)	75,3
Tolerance výkonu	.
Maximální systémové napětí $V_{MAX}$ (V)	760
Teplotní koeficienty	
Teplotní koeficient $I_{SC}$	.
Teplotní koeficient $V_{OC}$ (%/°C)	-0,37
Teplotní koeficient $P_{MPP}$	.

Tab. 1.1 Elektrické charakteristiky FV modulu s typovým označením I-110/24 [3]

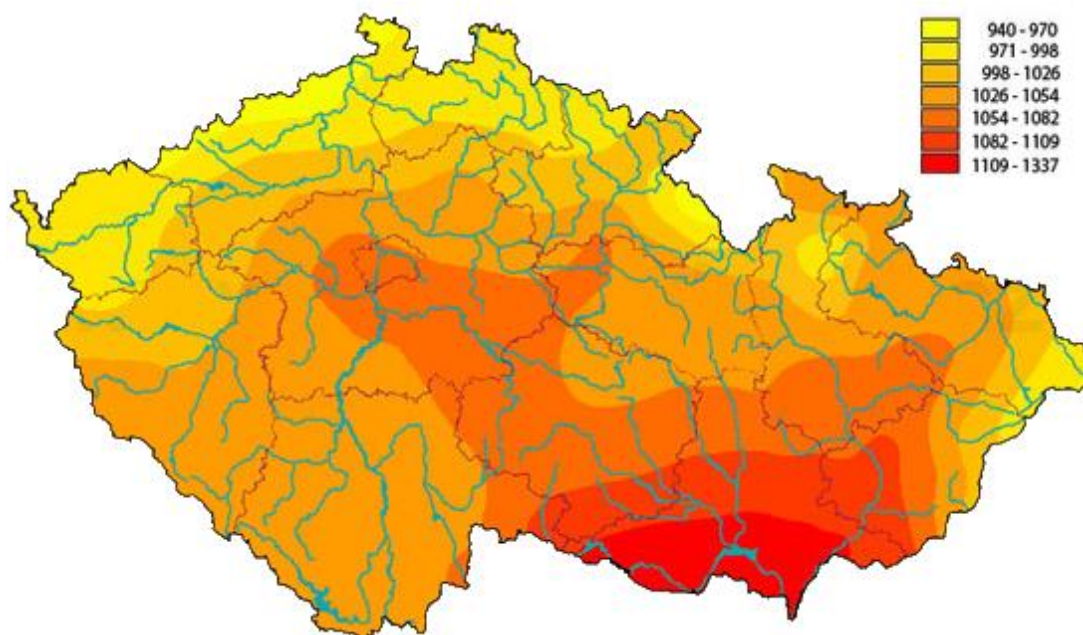
## 1.2 Geografické umístění FVE

Měřená FVE se nachází v Evropské unii na území státu České republiky v Plzeňském kraji. Úplně přesně je nainstalovaná na střeše budovy Elektrotechnické fakulty Západočeské univerzity v Plzni. Město Plzeň se rozkládá na západě Čech a leží na soutoku řek Úhlavy, Úslavy, Mže a Radbuzy, z nichž vzniká řeka s názvem Berounka. To lze dobře pozorovat na *Obr. 1.3* a *Obr. 1.4*.

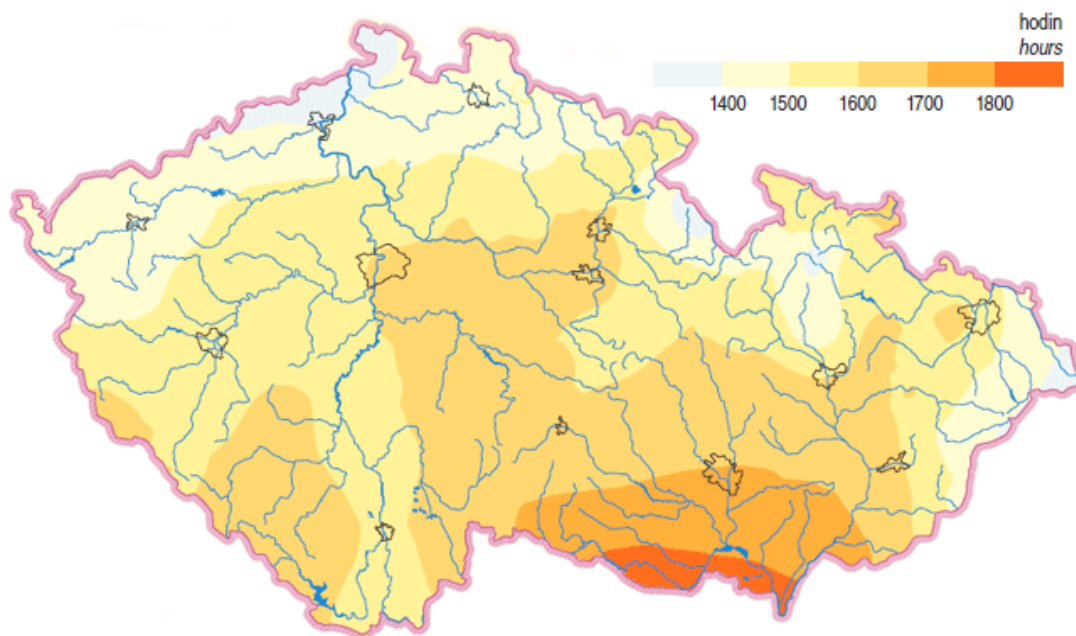
Sluneční záření, které dopadá na planetu Zemi, se skládá z difuzního a přímého záření. Při velmi jasných dnech převládá přímé sluneční záření, což znamená, že záření není vůbec vychylováno ze svého původního směru od Slunce a lze u něho pozorovat, že vrhá velmi zřetelné stíny. Naopak při hodně oblačném počasí se sluneční záření vychyluje a filtruje při průchodu jednotlivými mraky, mlhou a oparem. Odchýlení slunečního světla od původního směru může být také způsobeno ozonovou nebo prachovou vrstvou. Toto záření bez předem určeného směru se pak nazývá difuzní. Celkové složení a intenzitu slunečního záření nejvíce ovlivňují složky, jako jsou počasí, denní doba, roční doba a také zeměpisná šířka. V severní části České republiky je celková celoroční bilance difuzního vůči přímému záření zhruba v poměru 60:40. Naproti tomu v jižní části České republiky se můžeme setkat s téměř vyrovnaným poměrem. FV zařízení ke své funkci využívají obě tyto složky slunečního záření [2].



Při zjišťování jednotlivých hodnot ročního slunečního ozáření na určitou plochu, musíme sečíst energetický obsah přímého i difuzního záření, který dopadá ze Slunce na planetu Zemi. Obě tyto složky záření se sčítají při všech slunečných hodinách v roce. Jestliže toto všechno uděláme, tak dostaneme celkové sluneční ozáření v kilowatthodinách na  $1 \text{ m}^2$  plochy za rok. Hodnota se uvádí pro zcela horizontální plochu. Region od regionu se mohou údaje celkového slunečního ozáření velmi lišit. V České republice se průměrný roční dopad sluneční energie na zemský povrch pohybuje v rozmezí  $940\text{-}1340 \text{ kWh/m}^2$ , to lze vidět na *Obr. 1.3*. Pro měřenou FVE ležící v Plzni se celkové roční ozáření pohybuje zhruba okolo  $1050 \text{ kWh/m}^2$ . Na *Obr. 1.3* lze také pozorovat, jak se průměrný roční dopad sluneční energie na zemský povrch zvyšuje směrem od severu k jihu. Některé výjimky jsou způsobeny mikroklimaty. V České republice nejvíce dopadající sluneční energie připadá na období mezi dubnem a zářím. Je to více než tři čtvrtiny za celý rok. Podle ČHMÚ se počet hodin slunečního svitu v České republice pohybuje v rozmezí  $1331\text{-}1844 \text{ h/rok}$  [2]. Na *Obr. 1.4* je vidět průměrný roční součet trvání slunečního svitu v České republice. Pro měřenou FVE nacházející se v Plzni, je slunečný svit okolo  $1550 \text{ h/rok}$ .

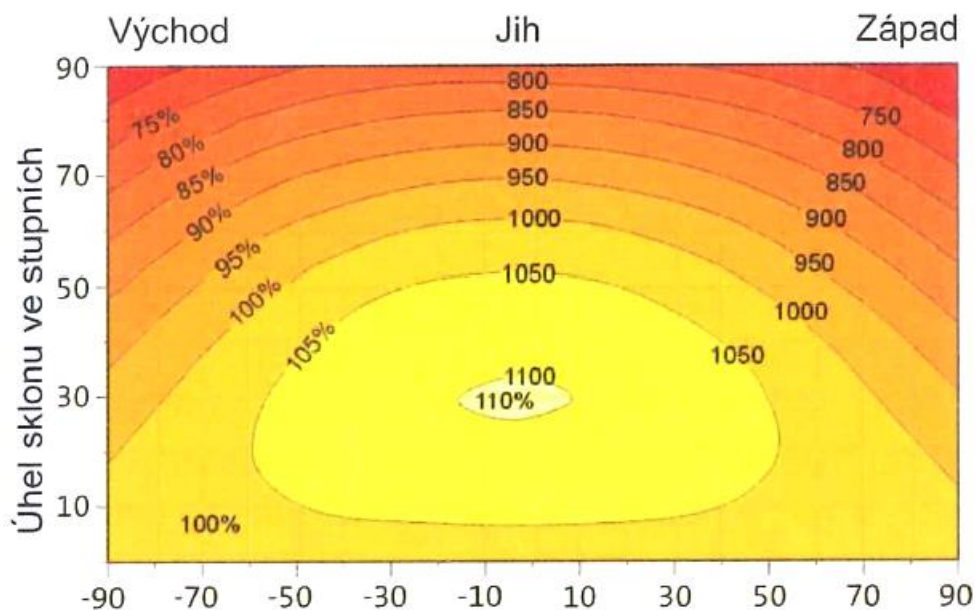


*Obr. 1.3 Průměrný roční dopad sluneční energie v  $\text{kWh/m}^2$  na zemský povrch v ČR [4]*



Obr. 1.4 Průměrná doba trvání slunečního svitu v ČR za rok [4]

Velmi zásadní věc pro umístění FV generátorů je jejich orientace vůči Slunci. FV generátory se umísťují nejlépe na takové budovy, které mají ploché střechy. Ty pak umožňují si zvolit vhodnou orientaci a sklon FV modulů vůči Slunci. Největší ozařovací výkon dopadá na jednotlivé plochy FV modulů, když jsou umístěné v kolmém směru k dopadajícímu slunečnímu záření. Jenže v praxi to je tak, že se během celého dne i roku pořád mění pozice Slunce a s tím i úhel dopadajícího slunečního záření. Optimální úhel sklonu FV modulů také závisí na zeměpisné šířce, ve které se nachází daná FVE. Pro hodnocení jednotlivých ploch FV generátorů s různou orientací a sklonem se používají diagramy ozáření. Ty umožňují posoudit kolik sluneční energie je možno získat na těchto plochách během celého roku. V solární technice se zavádí pojem azimut, který nám určuje orientaci FV modulů vůči světovým stranám. Jestliže má azimut  $0^\circ$ , tak jsou orientovány přímo směrem na jižní světovou stranu. Záporné znaménko mají úhly azimutu směrem na východní světovou stranu a kladné znaménko směrem na západní světovou stranu (např. orientace přímo na východní světovou stranu odpovídá úhlu azimutu  $-90^\circ$ ). Pro Plzeň se nevyskytuje žádný vhodný diagram slunečního ozáření, tak pro ilustraci na Obr. 1.5 je vidět diagram ozáření pro odlišně skloněné a orientované plochy FV generátorů v hlavním městě Německa. Je na něm možno pozorovat roční souhrny hodnot celkového slunečního ozáření v procentech a kWh, které se velmi podobají Plzni [2].



Obr. 1.5 Diagram slunečního ozáření pro Berlín [2]

Z diagramu lze vypočítat, že největší sluneční ozáření za rok v Berlíně dostaneme na střechách orientovaných na jižní světovou stranu se sklonem zhruba 30°. Rozdíl zisku slunečního ozáření oproti vodorovné rovině je něco kolem 10 %. Nevýhoda vodorovných ploch je také ta, že se na nich snadno usazuje prach, listí nebo sníh. To způsobuje další ztráty FV generátoru, kterým by se dalo předcházet jen pravidelným ručním čištěním. Samočišticí efekt způsobený deštěm a gravitací se totiž projevuje až u ploch se sklonem větším přibližně než 12°. S narůstajícím sklonem je samočištění ještě efektivnější. Pro FV generátory se pohybují celoroční ztráty způsobené znečištěním většinou mezi 1 – 5 %. Znečištění nejvíce ovlivňují místní podmínky, jako jsou např. zdejší silnice, průmysl, pole a lesy. Ztráty zastíněním způsobuje také sněhová pokrývka. Pro FV generátory s určitým sklonem je zastínění sněhem během roku velmi řídké. To je zapříčiněno i tím, že na FV zařízeních sněhová pokrývka taje o dost rychleji oproti jejich bezprostřednímu okolí [2].

Diagram slunečního ozáření také ukazuje, že při odchylce  $\pm 10^\circ$  od jižní světové strany a při odchylce sklonu  $\pm 5\%$  se nevyskytují žádné markantní rozdíly v celoročním slunečním ozáření FV generátoru. Jak lze také vidět, tak odchylka optimálního slunečního ozáření mezi jihovýchodní a jihozápadní světovou stranou nebo sklonem  $10^\circ - 50^\circ$  je nejvíce 10 %. Z toho vyplývá, že vhodných stanovišť pro FV generátory může být více [2]. Zkoumaný FV generátor má orientaci na jižní světovou stranu s azimutem  $-10^\circ$  a sklonem



45° vůči vodorovné rovině. Tyto parametry FVE jsou z hlediska optimálního celkového slunečního ozáření za rok velmi vyhovující, jak je vidět na *Obr. 1.5*.

### 1.3 Střídače FVE

Všechny instalované FV generátory ke své činnosti potřebují pracovat se stejnosměrným proudem. Pro zpracování a následné využití elektrické energie se používají střídače. Ty mají za hlavní úkol přeměnit stejnosměrné napětí a proud z FV modulů na střídavé napětí a proud, které jsou žádané v dané napěťové síti. V České republice v třífázové síti nn je požadována hodnota efektivního napětí 230/400 V a frekvence 50 Hz. Většina měničů má vysokou účinnost, tudíž pracují s malými ztrátami. Je to hlavně způsobeno moderním provedením daných střídačů, protože většina z nich pracuje s výkonovou elektronikou. Největší výkon střídač dodává do sítě, když se provozuje v bodě maximálního výkonu MPP FV generátoru, který hlavně závisí na intenzitě slunečního záření a také na teplotě FV modulů [5] [6].

Ze všech FV zařízení je právě střídač jeden z těch nejvíce poruchových členů. Z dlouhodobé praxe se zjistilo, že měnič v bezporuchovém stavu vydrží v průměru 5 – 8 let. Z těchto údajů vyplývá, že zhruba po 10 letech činnosti musí přijít velmi drahá oprava nebo zcela úplná výměna měniče. V dnešní době se čím dál častěji můžeme setkat s tím, že výrobci nabízejí zákazníkům volitelné prodloužení záruky střídače až na 20 let. To je velmi výhodné, protože to minimalizuje možné ztráty zisku, které mohou být způsobeny při přerušení dodávky elektrické energie. Největší ztráty zisku vznikají právě tím, že je nějaká porucha měniče identifikována příliš pozdě daným provozovatelem FV zařízení. Nejčastější příčiny vzniku poruch jsou výpadky pojistek, poruchy v síti, bouřky atd. Pro správnou činnost měničů je také velmi důležité, aby se správně dimenzovaly. Velmi nízké výkonové dimenzování měniče by mohlo způsobit poruchu z důvodu přetížení jednotlivých elektronických součástí. Nejlepší způsob, jak se tomu všemu vyhnout, je online nebo off-line monitoring daného FV zařízení a jeho pravidelná údržba [2].

FV střídače mají několik předností a výhod. Jednou z nich je zprostředkovávání uložení všech provozních hodnot z minulosti. Dále umožňují přímé propojení s počítačem a následně i s internetem. Na většině měničů můžeme nalézt digitální displej, na kterém lze pozorovat okamžitý výkon FVE, dobu činnosti celého systému, hodnotu vyprodukované

elektrické energie za nějaké určité časové období a poruchy, které se vyskytly někde v dané FVE. Ve střídači se mohou nacházet také některá stejnosměrná a střídavá bezpečnostní zařízení. Jsou to např. ochrany proti přetížení, přepólování a přepětí [5].

Měřená FVE má 8 větvových střídačů od společnosti Sun Power se sídlem v San José ve státě Kalifornii. Typ těchto všech střídačů je Sun Profi SP 2500 – 450, které lze vidět na *Obr. 1.6*. Ze strany jednotlivých FV střídačů se nachází štítek s některými základními údaji. Ty jsou uvedeny v *Tab. 1.2*.

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

*Tab. 1.2* Základní údaje ze štítku FV střídače



*Obr. 1.6* Osm FV střídačů typu SP 2500 – 450 měřené FVE

## 1.4 Připojovací skříň FV generátoru

Měřená FVE se skládá ze 192 FV modulů, které jsou elektricky rozdělené do 8 samostatných FV polí E1 – E8. Každé z těchto jednotlivých polí je připojeno ke svému střídači. V každém jednotlivém poli je 24 FV modulů, které jsou dále rozděleny na tři větve po 8 modulech a jsou zapojeny mezi sebou sérioparalelně. Při třech a více větvích se dělá dohromady spojení v připojovací skříni, která je vidět na *Obr. 1.7*. Poté už jsou vyvedeny do jednoho z osmi střídačů hlavním stejnosměrným elektrickým vedením. V připojovací skříni FV generátoru se nachází připojovací svorky a oddělovací místa. Dále se tam mohou vyskytovat větvové pojistky nebo diody. V nejlepším případě by měla mít připojovací skříň třídu ochrany II a zřetelně oddělené jednotlivé kladné a záporné části v nitru skříně. Jestliže se nachází někde ve venkovním prostředí, tak by se měla provádět se stupněm ochrany krytí IP 54. Dále připojovací skříň musí dobře čelit účinkům UV záření [2].



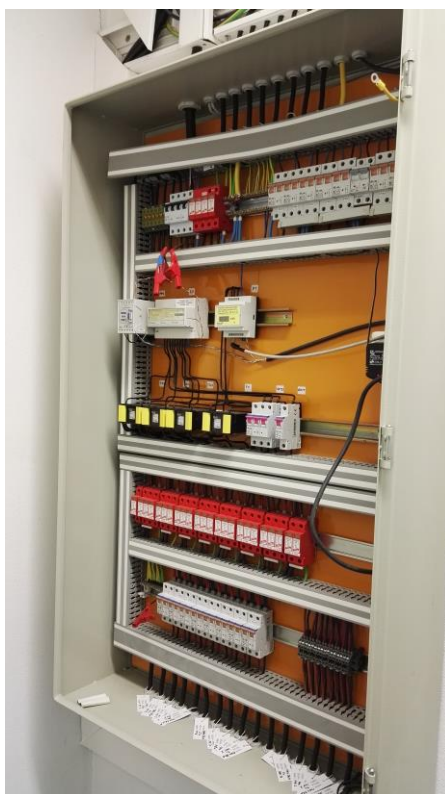
*Obr. 1.7 Připojovací skříň měřeného FV generátoru*

Větvové pojistky v připojovací skříni FV generátoru mají za úkol chránit elektrické vedení proti přetížení v momentě, kdy nastane nějaká porucha. Tyto pojistky by měly být

vyhovující jak pro stejnosměrný chod, tak pro kolísavé provozní podmínky, které se hojně vyskytují ve fotovoltaice. V případech, kdy má FV zařízení třídu ochrany II a je to neuzemněný FV systém, tak se větvové pojistky nemusí použít. Větvové diody mají za úkol oddělit dílčí větve. Jejich využití je jen u velmi zastiňovaných FVE s centrálním měničem [2]. Měřená FVE má uzemněný systém, není zastiňována a má 8 větvových měničů.

## 1.5 Rozvaděč FVE

V té samé místnosti, kde jsou umístěné střídače FVE, se nachází i rozvaděč. Hlavní úkol rozvaděče je, že umožňuje propojení FV zařízení s nn sítí. Toto elektrické propojení musí být v souladu se všemi platnými normami, které obsahují všechny technické připojovací podmínky na nn síť. Nejčastěji se elektrické vedení napojuje na takový bod sítě, který je po technické a ekonomické stránce nejvíce výhodný. V tomto rozvaděči se nachází elektroměr a také všechna potřebná spínací, měřicí a ochranná zařízení, která jsou zapotřebí pro provozování FVE napojené na nn síť. Na *Obr. 1.8* je vyfocen rozvaděč měřené FVE se všemi jednotlivými prvky [2].

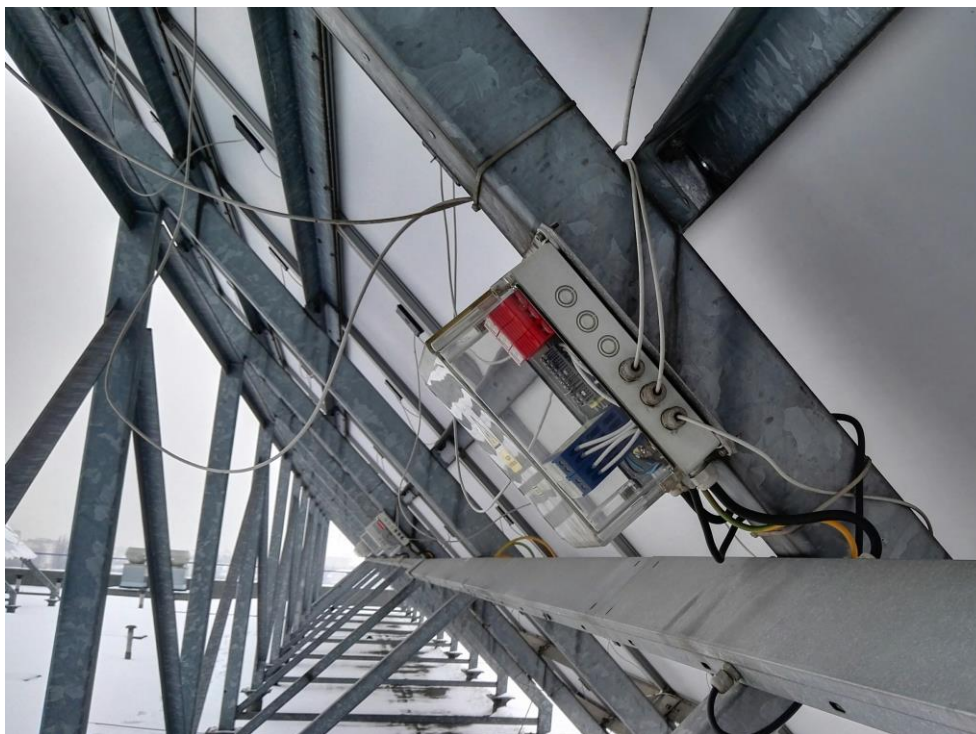


*Obr. 1.8 Rozvaděč FVE napojené na nn síť*

## 1.6 Kabely a vedení FVE

Veškerá elektrická vedení FVE, která slouží k propojení jednotlivých FV panelů mezi sebou nebo vedou k přípojovací skříni FV generátoru nebo k daným měničům, musí být po bezpečnostní stránce správně uložena, aby nemohlo dojít ke vzájemným zkratům nebo zkratům se zemí. Nejčastěji se tomu předchází tím, že se položí zvlášť kladný a záporný pól elektrického vedení s dvojitou izolací. Z dlouhodobé praxe se ukázalo, že po bezpečnostní a praktické stránce jsou pro to nejvíce vhodné jednožilové kabely s dvojitou izolací. Při použití kabelů ve venkovním prostředí na ně působí mnoho různých nežádoucích činitelů, ať už je to UV záření, povětrnostní vlivy nebo také velké rozmezí teplotních hodnot. Proti těmto všem vlivům jsou nejvíce odolné tzv. solární kabely, které se vyrábí přímo do těchto nepříznivých podmínek. Veškerá elektrická vedení by neměla být položena přímo na vnějšku střechy, ale měla by být připevněna na kostře daného systému, v nejlepším případě ve stínu jak lze vidět na *Obr. 1.9*. Také je velmi důležité vyhnout se dotyku s hranami, které zapříčiňují odírání a mechanické poškození elektrických kabelů. Dále se musí dbát na správnou polaritu při připojování elektrického vedení na svorkovnicích. V současné době jsou čím dál tím častěji používány k propojení jednotlivých částí FVE konektorové spoje zabezpečené proti dotyku, které také slouží pro velmi rychlou montáž a demontáž dílčích součástí FVE. Z finančních důvodů se mnohdy pro hlavní stejnosměrné elektrické vedení vedoucí z přípojovací skříně FV generátoru do střídače využívají obyčejné elektrické kabely s PVC izolací s typovým označením NYM nebo NYY. S ohledem na životní prostředí by v nejlepším případě měly být tyto kabely bez halogenů. To je např. typ NHMH-J [2].

Při plánování FVE by měla být co nejmenší celková délka jejího elektrického vedení. V praxi se používají takové průřezy vodičů, aby nepřesáhly ztrátu ve stejnosměrném elektrickém vedení 1 % při jmenovitém provozním výkonu FVE. Pro nějaká delší vedení by se měla pohybovat maximální ztráta do 2 %. Dále se také musí brát velký zřetel na napěťovou pevnost a proudovou zatížitelnost FV vedení. Většina FVE má propojena jednotlivá FV zařízení kabelem s průřezem  $4 \text{ mm}^2$ . Střídavé elektrické vedení pro nn síť, které vede z měniče skrz elektroměr, dále přes jednotlivá ochranná zařízení až do rozvodné sítě, se používá pro jednofázové měniče třípólové a pro třífázové měniče pětipólové. To jsou např. kabely typu NYM, NYY nebo NYCW [2].



*Obr. 1.9 Kably a vedení měřené FVE*

## 2 Softwarová simulace FV systému a porovnání s reálnou výrobou

Pomocí softwarové simulace FV systému lze získat teoretickou předpověď výnosu celé zkoumané FVE. Nejdůležitější kritéria pro ohodnocení FVE jsou kvalita stanoviště neboli intenzita slunečního záření a jakost FV zařízení. Pro jakost FV zařízení se zavádí součinitel, který se nazývá koeficient výkonnosti PR (Performance Ratio) a je to poměr skutečného a teoreticky očekávaného energetického výnosu FVE [2]:

$$PR = E_{\text{real}} / E_{\text{ideal}} \quad (2.1)$$

Teoreticky očekávaný energetický výnos  $E_{\text{ideal}}$  se spočte vynásobením intenzity slunečního záření  $e$  v kWh na m<sup>2</sup> dané plochy FV generátoru  $A_{\text{PV}}$  a jmenovité účinnosti FV panelů  $\eta_{\text{STC}}$  [2]:

$$E_{\text{ideal}} = A_{\text{PV}} \cdot e \cdot \eta_{\text{STC}} \quad (2.2)$$

Jestliže nemáme k dispozici software pro simulaci FV systému, tak se k předpovědi výnosu využívá průměrný roční dopad sluneční energie na dané místo, kde je umístěná FVE (viz *Obr. 1.3*). Dále se určí z diagramu ozáření (viz *Obr. 1.5*) přímé sluneční záření dopadající za rok na FV generátor pomocí azimutu a sklonu daných FV modulů. Takto získaná hodnota se vynásobí účinností FV modulů  $\eta_{\text{STC}}$  a plochou daného FV generátoru  $A_{\text{PV}}$ . Poté už se dostane výsledek s teoreticky očekávaným energetickým výnosem  $E_{\text{ideal}}$  za rok. Jestliže se v průběhu dne vyskytují nějaké stíny na FV generátoru, tak se musí vzít v úvahu procentuální ztráta způsobená zastíněním. V našem případě jí nebudeme uvažovat. Když se ideální energetický výnos  $E_{\text{ideal}}$  za rok vynásobí koeficientem výkonnosti PR, tak se dostane celoroční reálný zisk energie  $E_{\text{real}}$  FV zařízeních. Pro střešní zařízení se koeficient výkonnosti PR nejčastěji pohybuje v rozmezí 70 a 85 % [2].

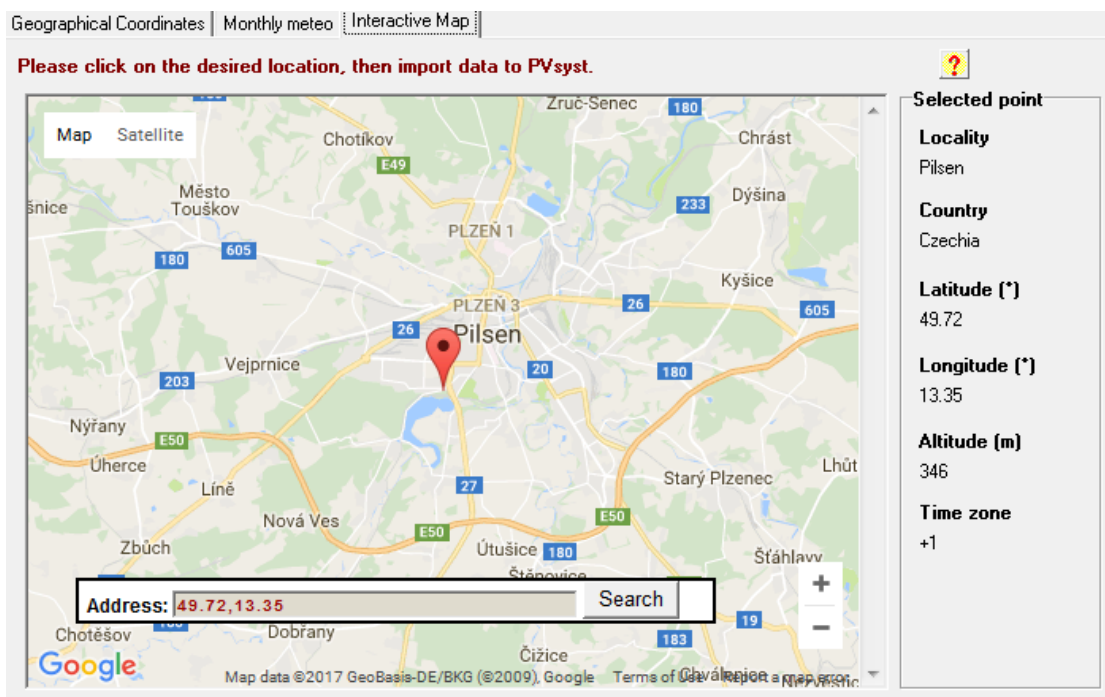
Každý majitel chce vědět co nejpřesnější předpověď výnosu své FVE. Z tohoto hlavního důvodu se používá software pro simulaci FV systémů. Simulačních programů je na dnešním trhu mnoho. Mohou to být velmi jednoduché odhadní programy, ale i velmi



složité simulační softwary, které umí vypočítat předpokládané výnosy FVE, údaje o hospodárnosti, úsporu emisí, schéma a údaje FV zařízeních atd. Tyto všechny cenné informace pak shrnou do jedné přehledné tiskové zprávy, která zahrnuje údaje o celé zkoumané FVE. Většina složitých simulačních softwarů, provádějící ověření věrohodnosti významných parametrů FVE, ale stejně nemůže zaručit stoprocentní správnost uživatelem zadaných vstupních parametrů. Z tohoto důvodu je nejlepší porovnat výsledky ze simulačních programů s nějakými konkrétními hodnotami z praxe [2]. Pro tuto práci byl vybrán simulační software FV systémů s názvem PVsyst.

## 2.1 Zadání konkrétních údajů o měřeném FV systému do databáze simulačního programu PVsyst

Na začátku softwarové simulace konkrétního FV systému se nejprve musí zadat jeho přesná poloha se zeměpisnými souřadnicemi. Na *Obr. 2.1* lze vidět přesné umístění Elektrotechnické fakulty Západočeské univerzity v Plzni, na které se nachází měřená FVE.

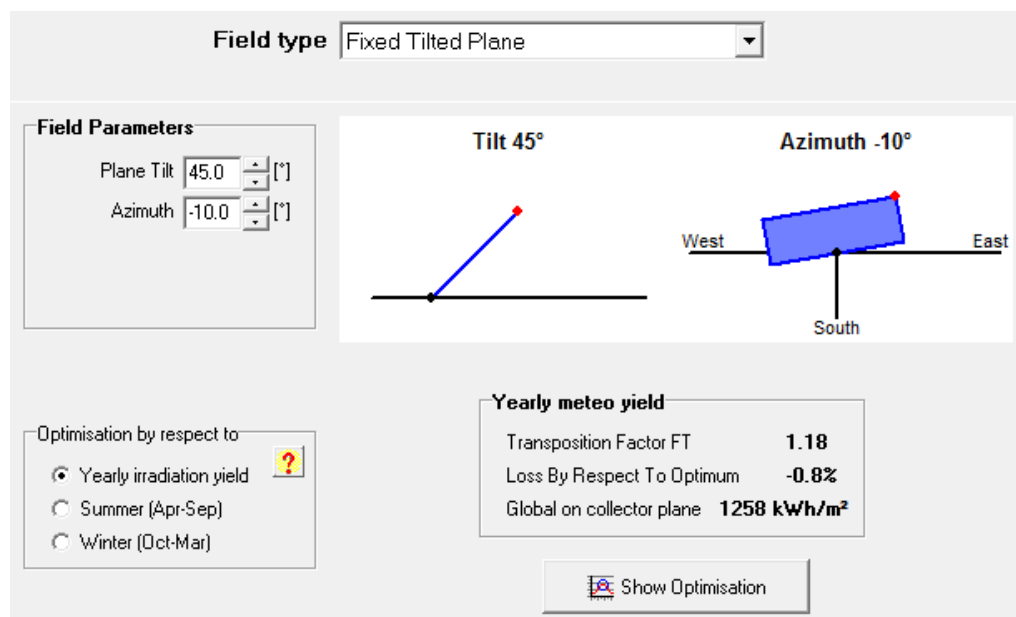


Obr. 2.1 Geografické umístění měřené FVE v simulačním programu PVsyst

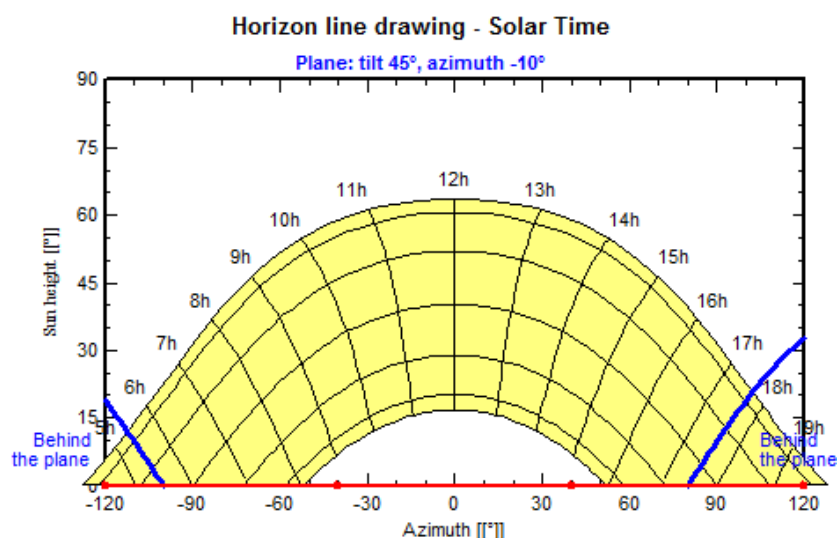
Po určení přesné geografické polohy FVE se musí dále zadat průměrné měsíční hodnoty intenzity slunečního záření a teploty. Jako zdroj těchto meteorologických dat byl použit Meteororm 7.1, který nabízí přístup k mnoha přesným meteorologickým údajům pro téměř jakékoliv místo na planetě Zemi.



Jestliže jsou pro zkoumanou FVE zadána všechna potřebná meteorologická data na konkrétním místě, tak se může přejít na určování sklonu, orientace a konstrukčního provedení daných FV modulů. Měřené FV moduly mají úhel sklonu  $45^\circ$ , azimut  $-10^\circ$  a z konstrukčního hlediska jsou položeny na pevné nakloněné rovině. Tyto všechny parametry se pak zadají do simulačního softwaru, který také vypočte odchylku od optimálního umístění FV panelů vůči dopadajícímu slunečnímu záření. Jak lze vidět na Obr. 2.2, tak pro měřenou FVE je ztráta od optimálního umístění FV modulů jenom 0,8 %, což je velmi vyhovující pro konečný největší možný zisk elektrické energie z dané FVE.



Obr. 2.2 Sklon, orientace a konstrukční provedení měřených FV modulů v simulačním programu PVsyst



Obr. 2.3 Diagram trajektorie Slunce nad obzorem pro měřenou FVE v Plzni v simulačním programu PVsyst

V dalším kroku se určuje zastínění FV generátoru, které může být způsobeno např. horizontem, komínem, stromem, anténou nebo budovou. Pro měřenou FVE se žádné zastínění jednotlivých FV modulů neuvažuje. Na *Obr. 2.3* lze pozorovat trajektorii Slunce nad obzorem, jak se mění po celý rok v místě, kde se nachází daná FVE.

V posledním kroku se musí zadat do simulačního programu PVsyst všechny zbylé známé údaje o FVE. Nejprve se doplní do databáze celková plocha měřeného FV generátoru, která činí 164 m<sup>2</sup>. Dále se vybere z databáze konkrétní typ a počet FV modulů a střídačů. Na měřené FVE se nachází 192 FV modulů od firmy Isofotón, které jsou vyrobeny z monokrystalického křemíku s typovým označením I-110/24. Dále je tam umístěno 8 větrových střídačů od společnosti Sun Power. Typ těchto všech FV střídačů je SP 2500 – 450. Na závěr se ještě doplní údaje o množství FV modulů v sérii a také počtu všech stringů. Tyto všechny zadané parametry a jednotlivé komponenty do simulačního programu PVsyst měřené FVE lze vidět na *Obr. 2.4*.

**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

... or available area: 164 m<sup>2</sup>

**Select the PV module**

All 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

Use Optimizer

**Select the inverter**

All inverters

Sun Power 2.5 kW 194 - 400V 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

Input maximum voltage: 450 V

**Design the array**

**Number of modules and strings**

Mod. in series: 8

Nbre strings: 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>

Impp (STC): 76.4 A

Isc (STC): 82.5 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

*Obr. 2.4* Parametry a jednotlivé komponenty měřené FVE v simulačním programu PVsyst

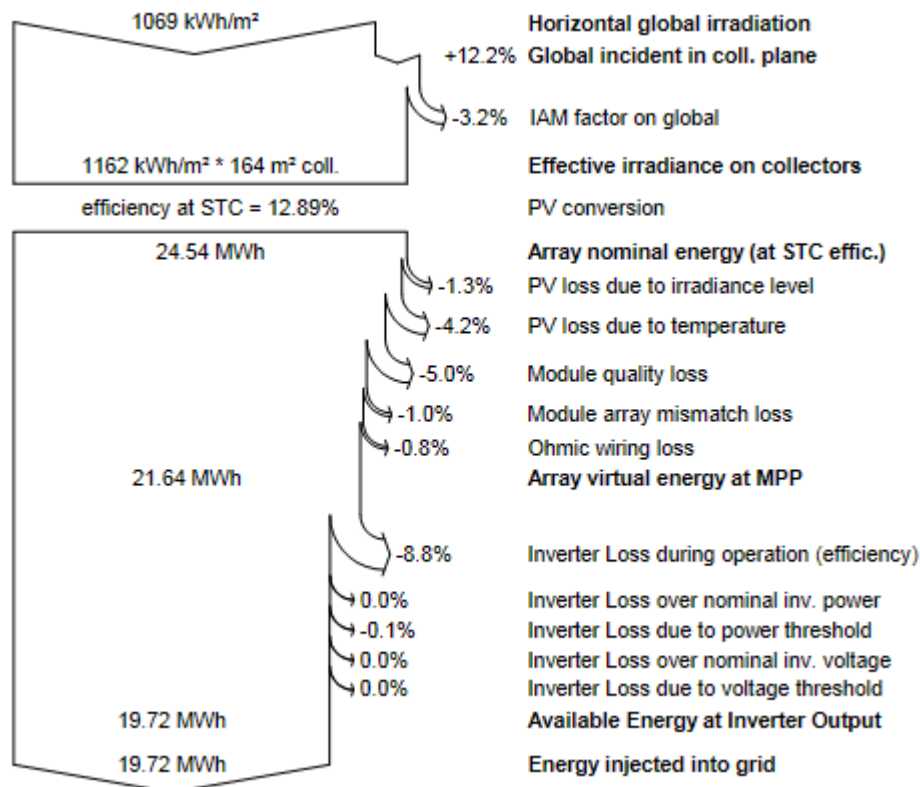
## 2.2 Výsledky softwarové simulace FV systému v programu PVsyst

Univerzitní 26, 306 14 Plzeň  
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	24.6	14.19	-0.95	48.4	47.1	0.934	0.843	0.824
February	39.7	26.64	0.80	58.2	56.6	1.119	1.010	0.821
March	77.1	45.73	3.91	97.2	94.3	1.813	1.652	0.805
April	127.9	64.53	9.28	145.5	141.0	2.639	2.433	0.792
May	151.7	77.88	14.14	144.0	139.0	2.540	2.322	0.763
June	160.0	87.30	16.77	145.8	140.6	2.571	2.351	0.764
July	160.4	85.75	18.48	150.4	145.2	2.624	2.400	0.756
August	131.7	71.98	18.45	135.0	130.5	2.361	2.158	0.757
September	95.4	49.05	13.51	118.8	115.5	2.120	1.940	0.773
October	55.8	33.43	9.05	77.9	75.7	1.423	1.287	0.782
November	27.4	18.18	3.98	45.4	44.1	0.854	0.758	0.791
December	17.9	12.04	0.05	33.8	32.7	0.644	0.567	0.765
Year	1069.4	586.70	9.00	1200.4	1162.4	21.643	19.720	0.778

Legends: GlobHor Horizontal global irradiation  
 DiffHor Horizontal diffuse irradiation  
 T Amb Ambient Temperature  
 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

Tab. 2.1 Bilance a hlavní výsledky měřené FVE ze simulačního programu PVsyst



Obr. 2.5 Celoroční ztrátový diagram měřené FVE ze simulačního programu PVsyst

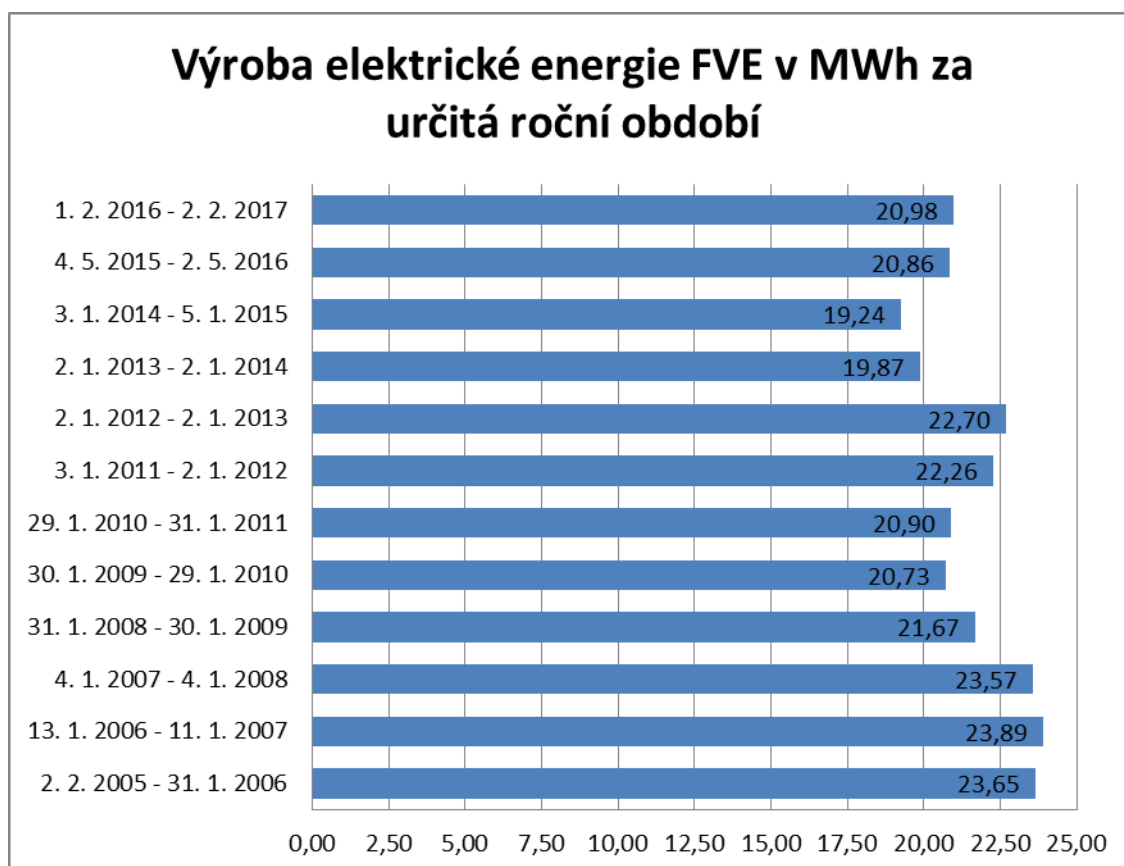
Všechny parametry, jednotlivé komponenty a výsledky softwarové simulace měřené FVE v programu PVsyst lze nalézt v příloze A, kde jsou přehledně shrnuty do jedné tiskové zprávy na tři stránky. V Tab. 2.1 jsou vidět veškeré bilance a hlavní výsledky měřené FVE, které jsou vygenerovány simulačním programem PVsyst. Jsou to údaje za celý rok a v jednotlivých měsících. Z těchto hodnot se pak může sestavit ztrátový diagram, který ukazuje ztráty FVE v průběhu celého roku a ten je k vidění na Obr. 2.5. Z výsledků lze vyčíst, že celkové horizontální roční sluneční ozáření pro stanoviště měřené FVE je  $1069,4 \text{ kWh/m}^2$ , což téměř odpovídá i Obr. 1.3. Po přičtení 12,2 % k této hodnotě se dostane celkové roční sluneční ozáření  $1200,4 \text{ kWh/m}^2$ , které dopadá přímo na nakloněnou rovinu FV modulů. Dále po odečtení 3,2 % z této hodnoty kvůli faktoru AM (Air Mass) = 1,5, který označuje množství vzduchu v atmosféře, kterým musí projít sluneční světlo, se získá výsledná hodnota slunečního ozáření dopadajícího přímo na měřený FV generátor  $1162,4 \text{ kWh/m}^2$  během celého roku. Po vynásobení hodnoty intenzity slunečního ozáření  $1162,4 \text{ kWh/m}^2$ , celkové plochy měřeného FV generátoru  $164 \text{ m}^2$  a účinnosti daných FV modulů 12,89 % se dostane celková největší možná vyrobená elektrická energie za rok FV generátorem. Ta se rovná hodnotě 24,54 MWh v simulačním programu PVsyst. Po odečtení ztrát vzhledem k úrovni slunečního ozáření, závislosti na okolní teplotě, kvalitě FV modulů, nesouladu FV modulů a ohmické elektroinstalaci, tak je pak výsledná vyrobená efektivní elektrická energie na výstupu z FV generátoru 21,64 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 19,72 MWh. Za zmínku ještě stojí zmínit koeficient výkonnosti PR, který vyšel pro měřenou FVE 77,79 %.

### 2.3 Reálná výroba elektrické energie měřené FVE

Celková vyrobená elektrická energie měřené FVE, která byla dodána do nn sítě za určitá roční období, je k nahlédnutí v Tab. 2.2. Hodnoty vyrobené elektrické energie jsou odečteny ze sešitu, do kterého se zapisuje od konce roku 2004 průběžný stav elektroměru vždy k určitému datu. Tento elektroměr ukazuje celkový údaj vyrobené elektrické energie, která byla dodána do nn sítě od začátku uvedení FVE do provozu až po současnost. Pro přehlednost je na Obr. 2.6 uveden graf, který ukazuje, jak se mění průběžný vývoj celkové výroby elektrické energie FVE za jednotlivá roční období.

Období	Vyrobená elektrická energie FVE v MWh
2. 2. 2005 - 31. 1. 2006	23,65
13. 1. 2006 - 11. 1. 2007	23,89
4. 1. 2007 - 4. 1. 2008	23,57
31. 1. 2008 - 30. 1. 2009	21,67
30. 1. 2009 - 29. 1. 2010	20,73
29. 1. 2010 - 31. 1. 2011	20,90
3. 1. 2011 - 2. 1. 2012	22,26
2. 1. 2012 - 2. 1. 2013	22,70
2. 1. 2013 - 2. 1. 2014	19,87
3. 1. 2014 - 5. 1. 2015	19,24
4. 5. 2015 - 2. 5. 2016	20,86
1. 2. 2016 - 2. 2. 2017	20,98

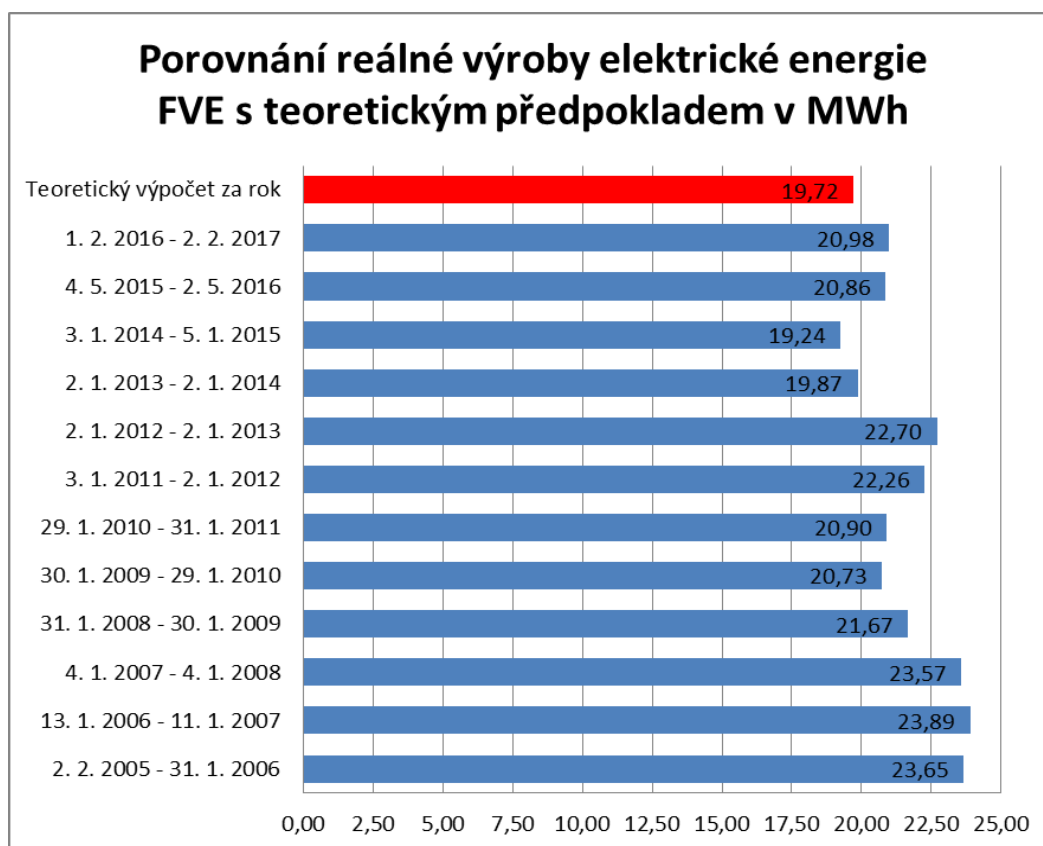
Tab. 2.2 Celková vyrobená elektrická energie měřené FVE za určitá roční období



Obr. 2.6 Celková výroba elektrické energie FVE za jednotlivá roční období

## 2.4 Porovnání výsledků softwarové simulace FV systému s reálnou výrobou

Porovnání hodnot celkové reálné výroby elektrické energie měřené FVE za určitá roční období s teoretickým předpokladem, který je vypočítán v simulačním programu PVsyst za jeden rok, lze vidět na Obr. 2.7. Měřená FVE nejvíce elektrické energie vyráběla hned po svém spuštění, což je logické, protože ze začátku FV panely nebo celý FV systém pracuje na co možná největší výkon. Postupem času výkon celé FVE pomaloukku upadá. Posledních pár let se roční výroba elektrické energie měřené FVE téměř shoduje s teoretickým výpočtem až na pár výjimek, které mohou být způsobené větším ročním průměrným slunečním svitem dopadajícím na zemský povrch v dané lokalitě. Hodnota teoretického výpočtu celkové vyrobené elektrické energie za rok je vždy menší, až na jeden ojedinělý případ. Z toho vyplývá, že měřená FVE je na tom se svým celkovým výkonem dodávaným do nn sítě velmi dobře, tudíž bude mít s největší pravděpodobností celý FV systém jen málo nepatrných vad nebo poruch, které by následně ovlivňovaly celkovou výkonnost FVE.



Obr. 2.7 Srovnání hodnot reálné výroby elektrické energie FVE za jednotlivá roční období s teoretickým předpokladem

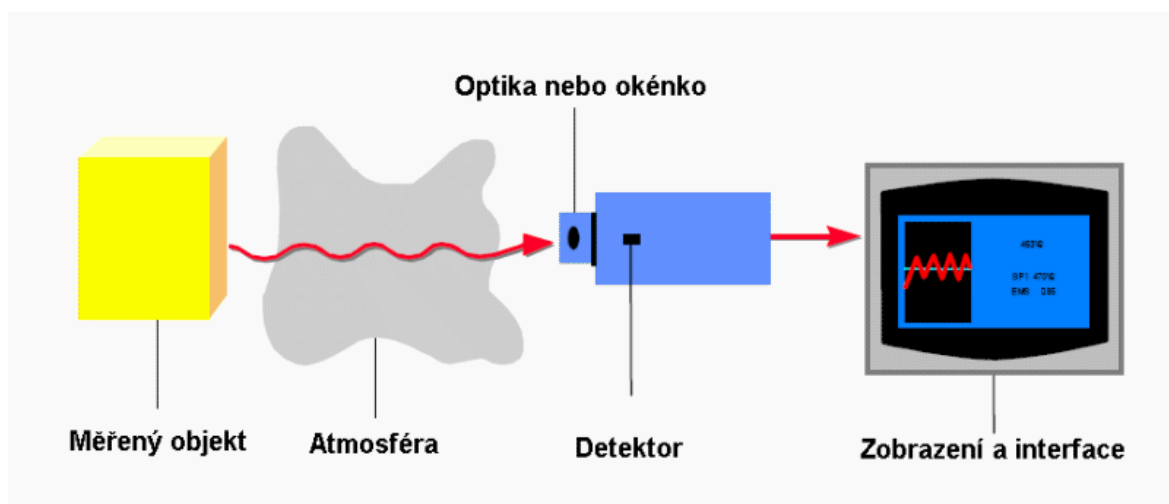
### 3 Základní kontrola systému FV panelů pomocí termografie

Jedna z nejpoužívanějších, nejrychlejších a nejefektivnějších metod pro vyhodnocení provozního stavu FVE je diagnostika pomocí termografie. K tomu se používá zařízení, které nese název termokamera. Ta vyhodnocuje z pořízených termografických snímků rozložení teploty na površích všelijakých objektů. Umožňuje odhalit jednotlivé skryté vady na FV panelech za plného provozu, které na první pohled není možné objevit. Všechny vady na FV panelech se obvykle projevují zvýšeným rozdílem teplot oproti bezprostřednímu okolí. Mohou být způsobeny elektrickými součástkami, jako jsou např. jednotlivé FV články, bypass diody nebo přípojovací krabice modulů. Dále se mohou vyskytovat i závady mechanického rázu, které se projevují oddělením dvou slepených materiálů, buněčným poškozením atd. Jak bylo řečeno, tak všechny tyto vady se vyznačují neobvyklým rozdílem teplot a ve výsledku způsobují snížení celkového dodávaného elektrického výkonu FVE do napájecí sítě. Všechny tyto nežádoucí defekty se musí co možná nejlépe vyhodnotit, aby se pak mohl zvolit ten nejefektivnější způsob jejich nápravy na daném FV systému.

#### 3.1 Princip termovizního měření

Termovizní měření se provádí přístrojem zvaným termokamera, která funguje na principu bezkontaktního měření teplot na nejrůznějších objektech. Teplota z povrchu těles, ale i z okolí, se šíří prostorem ve formě elektromagnetického záření. Také je to označováno pod názvem radiace. Toto záření detekuje termokamera v infračerveném spektru v rozsahu vlnových délek 8 – 14  $\mu\text{m}$  a následně to převádí do viditelného spektra. Výsledné hodnoty teplot na termografickém snímku jsou od sebe rozlišeny rozdílným barevným odstínem, který si lze libovolně nastavit v termokameře neboli detektoru. Tato výsledná teplota se neměří přímo, ale vypočítává se z údajů, které jsou definované přímo v tomto přístroji. Na *Obr. 3.1* lze vidět schéma termovizního měření. Při měření určitých objektů se musí zadat do termokamery jisté údaje např. o atmosférické teplotě, relativní vlhkosti a hodnotě emisivity pro daný materiál. Je to kvůli tomu, aby se dosáhlo co možná nejpřesnějších výsledků rozložení teplotního pole na konkrétním objektu. Emisivita je definována jako poměr vyzařené a odražené energie. Její hodnota se může pohybovat v rozmezí 0 – 1.

Jestliže se emisivita rovná hodnotě 1, tak daný materiál je schopen vyzářit ze svého povrchu všechnu tepelnou energii. Ve fyzice se to označuje absolutně černým tělesem. Pro hodnotu emisivity 0 to je úplně naopak. Z toho vyplývá, že čím větší je hodnota emisivity, tím lépe se může změřit povrchová teplota objektu. Pro měření FV panely se zadává emisivita jejich vnější plochy, která je tvořena sklem, a to má hodnotu emisivity 0,92 [5] [7].

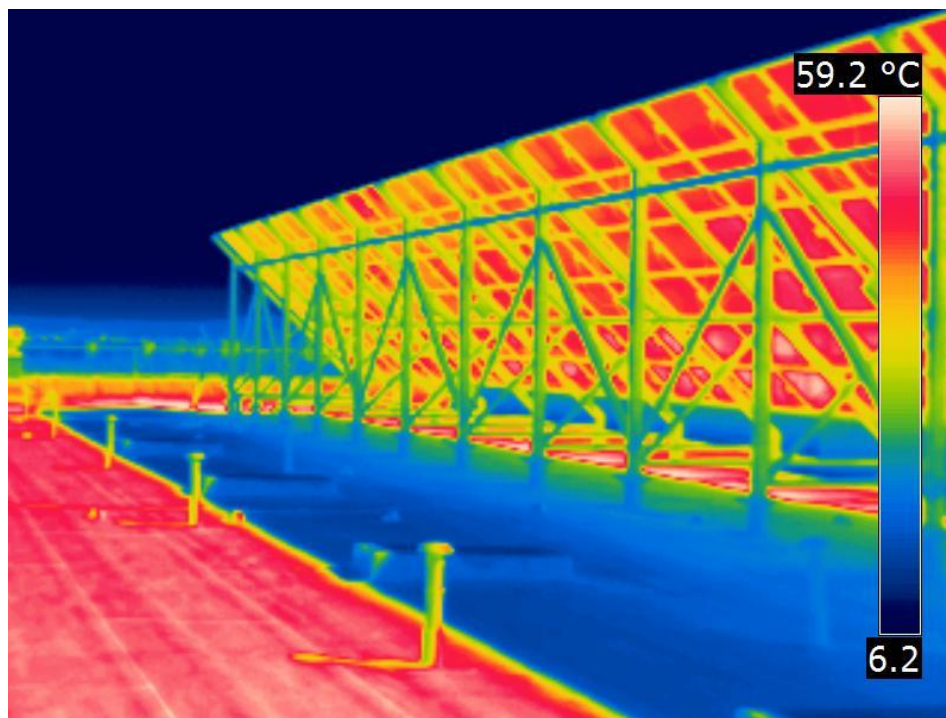


Obr. 3.1 Schéma termovizního měření [8]

### 3.2 Přednosti termovizního měření FV modulů

Jedna z výhod termovizního měření je ta, že termografické snímky rozložení teploty na FV modulech se pořizují velmi rychle, a to bez zásahu do chodu celé měřené FVE. Pro ilustraci na Obr. 3.2 je vidět termografický snímek zkoumané FVE z její zadní strany za plného provozu, který byl pořízen termokamerou při jasné obloze. V den pořízení tohoto snímku se hodnota intenzity slunečního záření pohybovala okolo  $700 \text{ W/m}^2$  a atmosférická teplota byla  $18 \text{ }^\circ\text{C}$ . Další výhodou termografie je bezkontaktní měření, které se buď může provádět ručně nějakou osobou, tak i třeba bezpilotním letounem neboli dronem, který má na sobě připevněnou danou termokameru. To umožňuje snímání velkých ploch měřených objektů i na těžce dostupných místech. Další velkou výhodou je nedestruktivnost, protože termovizní měření pracuje na principu detekce infračerveného záření, které je vyzařováno z měřeného objektu. Dále jedna z předností moderní termokamery je ta, že umožňuje prolínání termografického snímku s reálným snímek měřeného objektu. Díky této funkci se mohou snáze zjistit a zaznamenat oblasti s podezřele velkými rozdíly teplot, které jsou nejspíše způsobeny nějakými vadami na FV systému [5] [9].

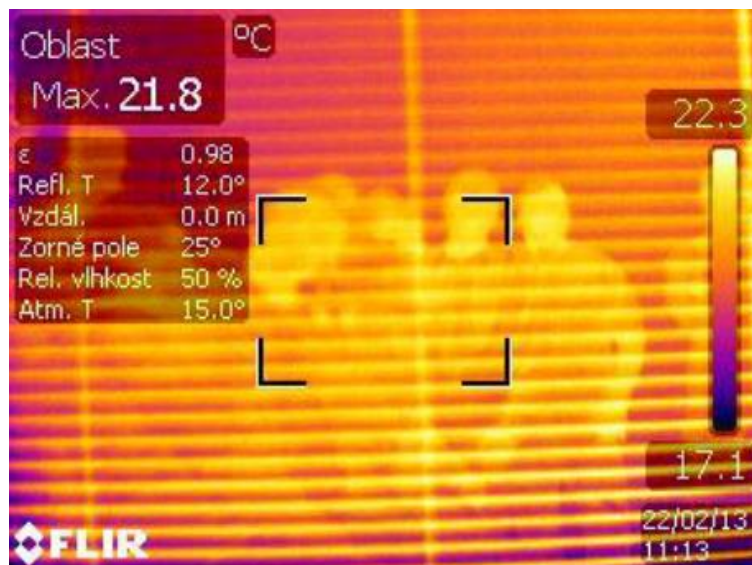




Obr. 3.2 Termografický snímek měřené FVE ze zadní strany

### 3.3 Podmínky pro co možná nejlepší výsledky termovizního měření FV modulů

Jednou z nevýhod termovizního měření FV modulů jsou konkrétní požadavky, při kterých by se toto měření mělo provádět, kvůli správnému vyhodnocení dobrého či špatného stavu jednotlivých FV komponentů. Jeden z nich je ovlivněn parametrem intenzity slunečního záření, které by se mělo pohybovat nejlépe nad hodnotou  $500 \text{ W/m}^2$ . To odpovídá převážně slunečným dnům bez mraků. Další zásadní faktor ovlivňující dobré výsledky termovizního měření FV modulů je okolní teplota prostředí. Pro přesné výsledky by měla být co nejmenší, protože nejspolehlivější hodnoty se získají při velkém rozdílu teplot mezi měřeným objektem a jeho okolním prostředím. Dále samotné měření také ovlivňuje ochranné sklo na povrchu jednotlivých FV modulů, protože se od něj může odrazet tepelné záření, které je způsobeno vyzařováním objektů z přilehlého prostředí. To lze vidět na Obr. 3.3. Tento tepelný tok pak může snadno zapříčinit znehodnocení změřených výsledků. Zabránit lze těmto odrazům tak, že se provede termovizní měření pod úhlem  $5^\circ - 60^\circ$  nebo se změří termokamerou FV moduly z jejich zadních stran. Faktor ovlivňující optimální měření může být i samotný silný vítr [9].



Obr. 3.3 Odraz tepelného záření v okně [9]

### 3.4 Výsledky termovizního měření zkoumaných FV modulů

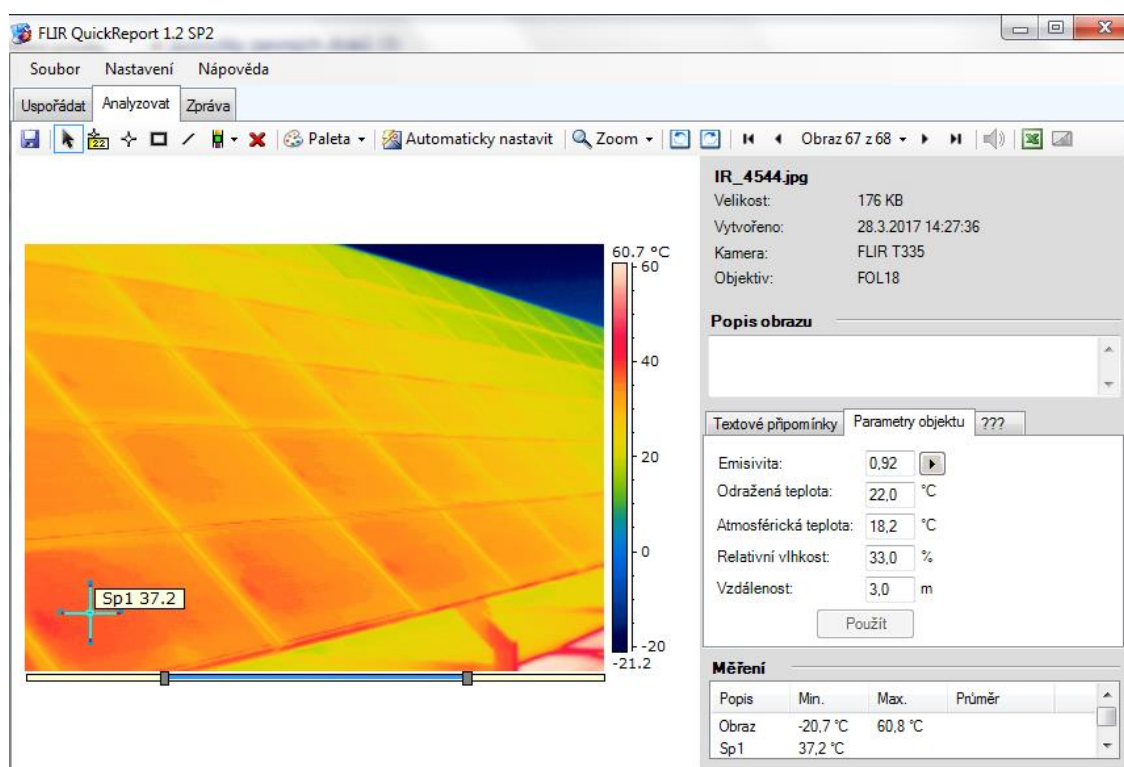
Kontrolní termovizní měření všech 192 FV modulů jsem prováděl termokamerou FLIR T335. Tento přístroj pro bezkontaktní měření rozložení teplot na vnějšku objektů je vyfocen na Obr. 3.4.



Obr. 3.4 Termokamera FLIR T335

Samotné měření jsem provedl dne 28. března 2017 od zhruba 11:15 h do 15:00 h při hodnotě intenzity slunečního záření mezi 550 – 700 W/m<sup>2</sup>. Atmosférická teplota se v tomto časovém horizontu pohybovala v rozmezí 11 – 19 °C. Za těchto podmínek se daly získat

velmi dobré výsledky pořízených termografických snímků FV modulů. Pro zpracování výsledných termografů jsem použil program FLIR QuickReport, který je k vidění na *Obr. 3.5*. V tomto softwaru si lze velice snadno doladit paletu barev snímku, zvolit vhodný rozsah teplotní stupnice, zadat jiné vstupní parametry, přidat popisky a komentáře nebo označit konkrétní body s teplotou. Všechny tyto úpravy slouží k tomu, aby byly finální výsledky pořízených termografických snímků vyhovující a co nejlépe čitelné pro jejich správné zhodnocení.



*Obr. 3.5 Úprava termografických snímků v programu FLIR QuickReport*

Pro přehlednost umístění a správné vyhodnocení jednotlivých měřených FV modulů na střeše budovy Elektrotechnické fakulty v Plzni je v *Tab. 3.1* ukázáno jejich rozmístění a vlastní číselné označení. Po změření všech dílčích FV modulů termokamerou a následném upravení pořízených termografických snímků se ukázalo, že zkoumaná FVE má nejspíše na 7 FV modulech nějakou závadu. Na těchto FV panelech se vyskytují nejpravděpodobněji dva různé druhy poruch elektrických součástek. První porucha je způsobená poškozenou bypass diodou. Druhá závada je zapříčiněna vadným FV článkem. V *Tab. 3.1* je k vidění, na kterých konkrétních FV panelech se zrovna ta daná porucha nachází.

Jižní okraj střechy budovy

1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36
37	38	39	40	41	42
43	44	45	46	47	48
49	50	51	52	53	54
55	56	57	58	59	60
61	62	63	64	65	66
67	68	69	70	71	72
73	74	75	76	77	78
79	80	81	82	83	84
85	86	87	88	89	90
91	92	93	94	95	96
97	98	99	100	101	102
103	104	105	106	107	108
109	110	111	112	113	114
115	116	117	118	119	120
121	122	123	124	125	126
127	128	129	130	131	132
133	134	135	136	137	138
139	140	141	142	143	144
145	146	147	148	149	150
151	152	153	154	155	156
157	158	159	160	161	162
163	164	165	166	167	168
169	170	171	172	173	174
175	176	177	178	179	180

Legenda:	
	FV moduly bez závady
	FV moduly s vadnou diodou
	FV moduly s vadným článkem

181	182	183	184
185	186	187	188
189	190	191	192

## Východní okraj střechy budovy

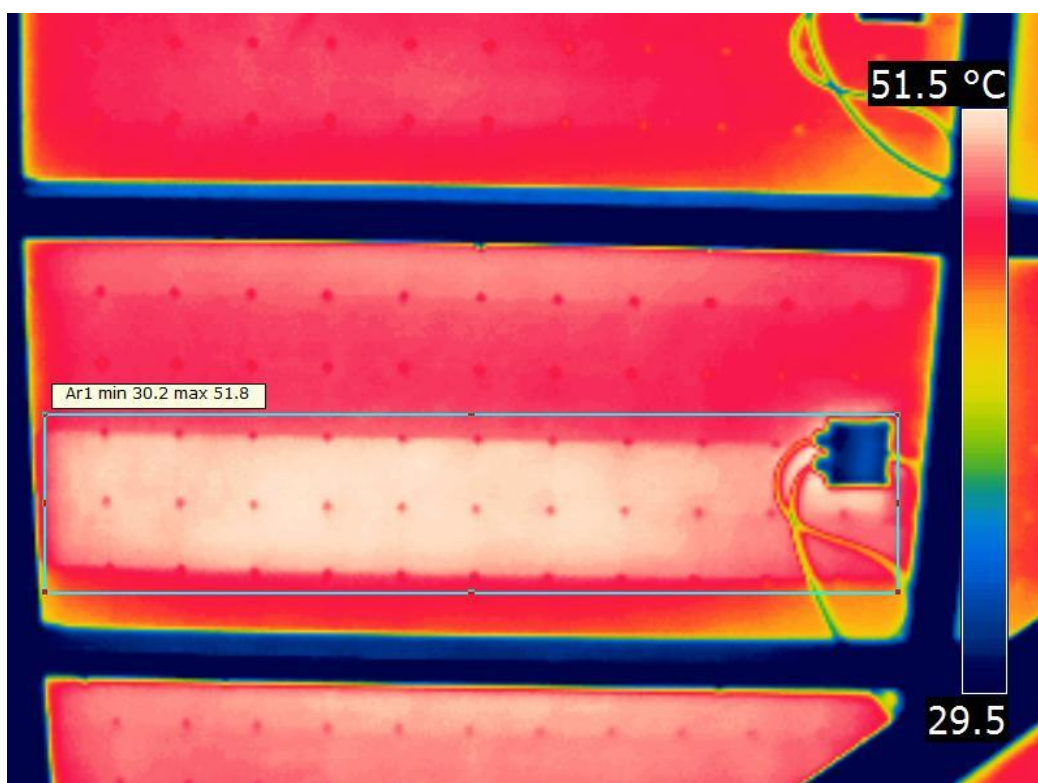
Tab. 3.1 Stav a vlastní číselné označení jednotlivých měřených FV modulů

Měření FV modulů z jejich předních stran bylo velmi obtížné, protože leží velice blízko u okraje střechy. Z tohoto důvodu se nedaly pořídít optimální termografické snímky, proto jsem se spíše zaměřil proměřit termokamerou FV moduly z jejich zadních stran. Tam se daly obstarat o hodně lepší výsledky jednotlivých termografů. Z přední strany jsem pak udělal jen finální kontrolu zjištěných vad a nakonec se všechny nalezené vady pomocí termokamery potvrdily z obou stran FV panelů. Zjištěné poruchy bypass diody i FV článku na dílčích FV panelech se projevují zvýšeným rozdílem teplot oproti bezprostřednímu okolí. Konkrétně u vady s bypass diodou jsou viditelné výrazné teplotní pásy se zvýšenou teplotou. Ty lze pozorovat na *Obr. 3.6, Obr. 3.7, Obr. 3.12, Obr. 3.13, Obr. 3.14 a Obr. 3.15*. Druhá vyskytující se porucha je způsobena jedním nejspíše vadným FV článkem a tu lze vidět na *Obr. 3.8, Obr. 3.9, Obr. 3.10, Obr. 3.11, Obr. 3.16 a Obr. 3.17*. Úplně všechny pořízené termografické snímky jsou k dispozici na přiloženém CD.

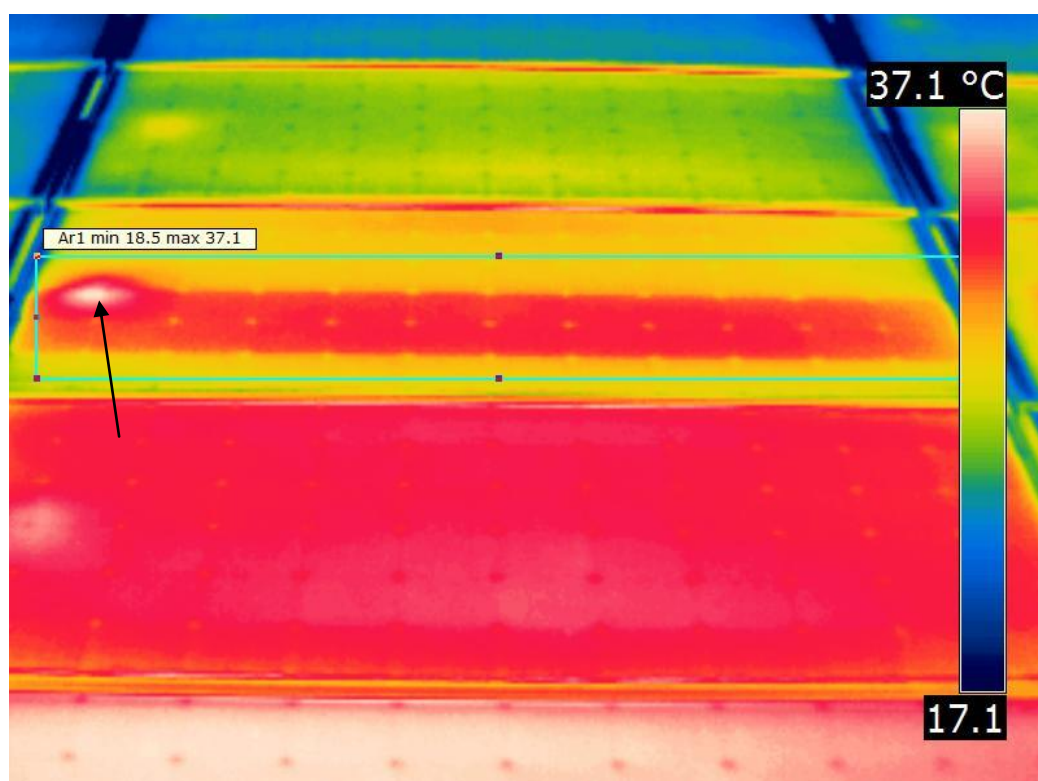
Všechny tyto defekty na FV generátoru jsou nežádoucí, protože způsobují ve výsledku snížení celkově vyrobené elektrické energie. Toto snížení výkonu dané FVE je zapříčiněno tím, že přehřáté FV články nepracují nebo neprodukují elektrickou energii a mění se z generátoru na spotřebič díky nabývání opačné polarizace. Tyto vzniklé problémy s vadnými součástkami by se měly co nejdříve odstranit, protože pokud se neudělá náprava v brzké době, tak by se mohly postupem času zničit i nejbližší okolní FV články, z důvodu na ně působící zvýšené teploty od přehřátých FV článků. Riziková situace nastává tehdy, když teplota porouchaných FV článků stoupne o 10 °C vůči průměrné teplotě jejich bezprostředního okolí. To může zapříčinit velmi výrazné snížení životnosti celého FV panelu. Všechny zaznamenané vady se ještě zkontrolují pomocí I-V analyzátoru. Díky němu se mohou nakonec tyto závady na jednotlivých FV modulech potvrdit nebo zcela vyvrátit.

Na všech pořízených termografických snímcích si lze dobře všimnout, že okraje jednotlivých FV panelů vykazují menší hodnotu výsledné teploty. To je způsobeno proudícím okolním vzduchem, který je lépe ochlazuje. Dále jsou na termogramech z přední strany FV modulů dobře viditelná místa, kde je připevněna jejich přípojovací krabice. Ta zabraňuje dobrému odvodu tepla. Tím pádem se tyto místa projevují zvýšenou teplotou oproti bezprostřednímu okolí, ale nejsou brány jako vady FV systému. Pro ilustraci to lze dobře vidět na *Obr. 3.7* vlevo uprostřed, tam kde ukazuje šipka.

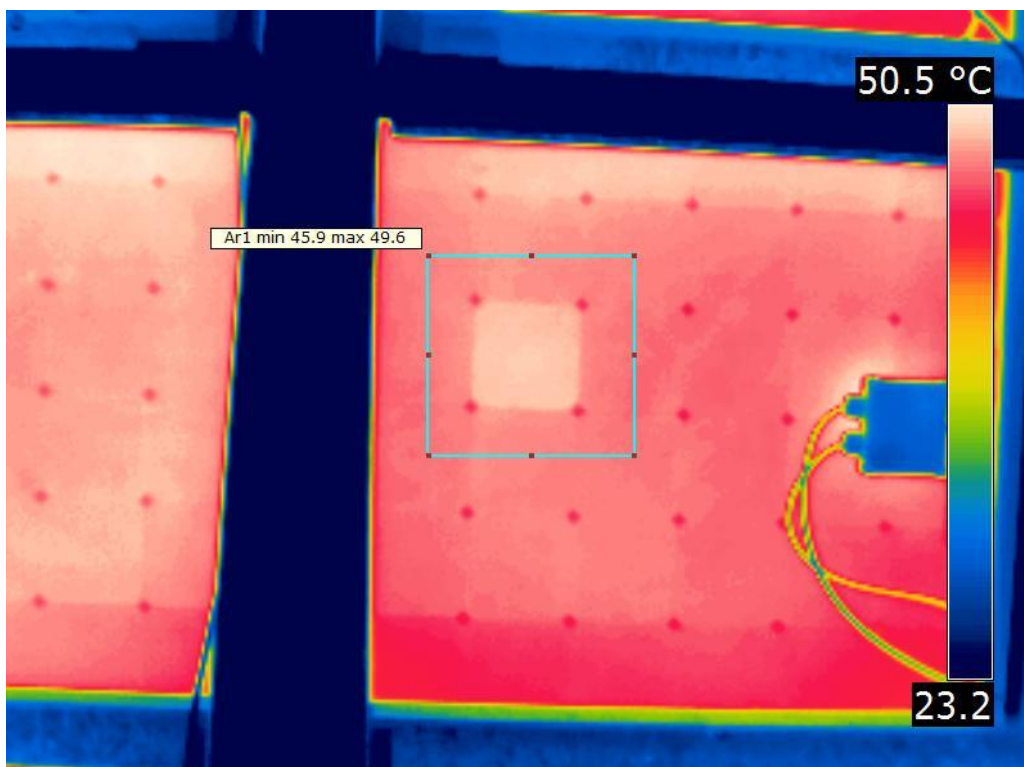




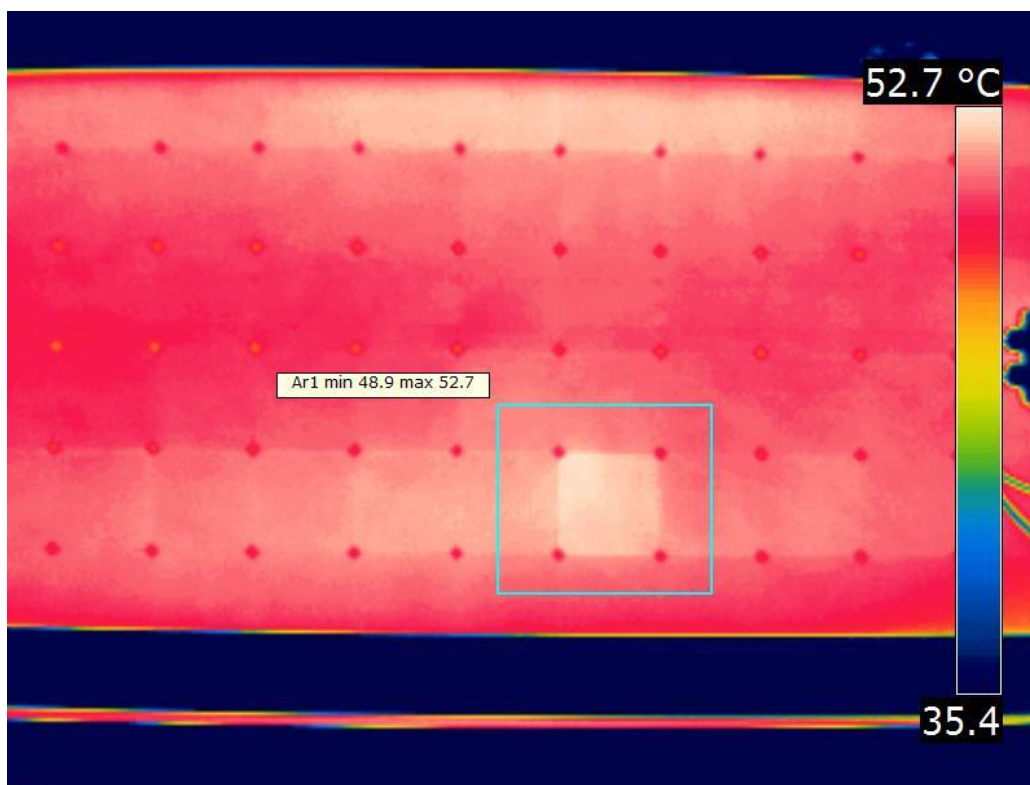
Obr. 3.6 Termograf ze zadní strany FV modulu číslo 10 s vadnou bypass diodou



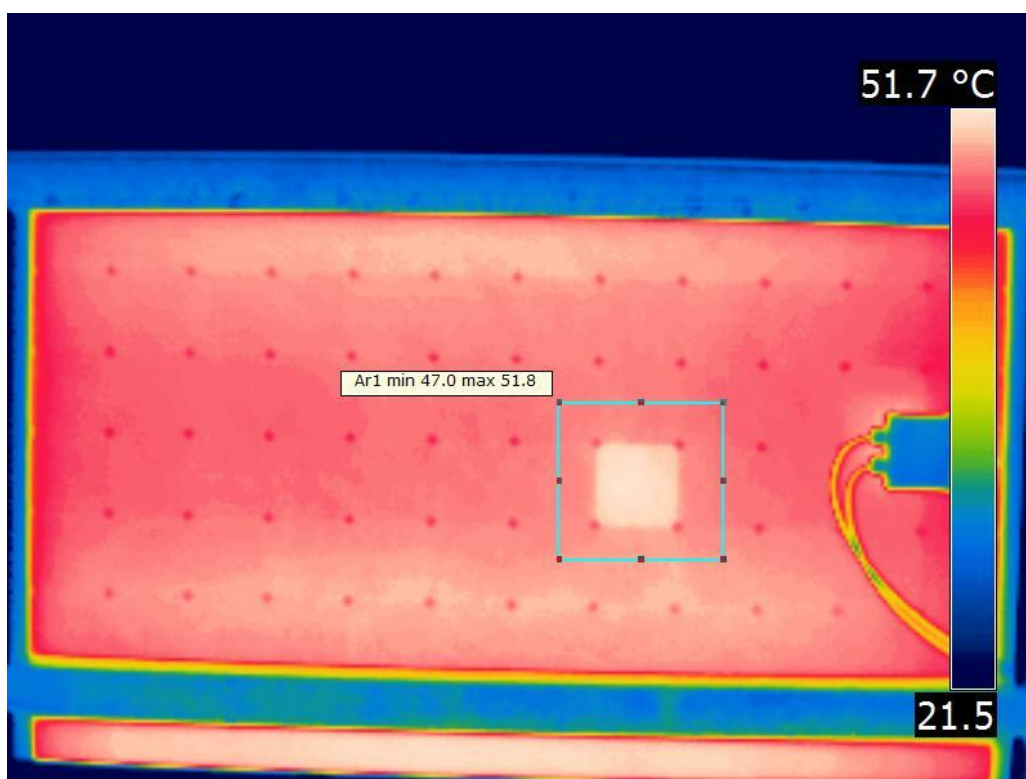
Obr. 3.7 Termograf z přední strany FV modulu číslo 10 s vadnou bypass diodou



Obr. 3.8 Termograf ze zadní strany FV modulu číslo 17 s vadným FV článkem



Obr. 3.9 Termograf ze zadní strany FV modulu číslo 36 s vadným FV článkem

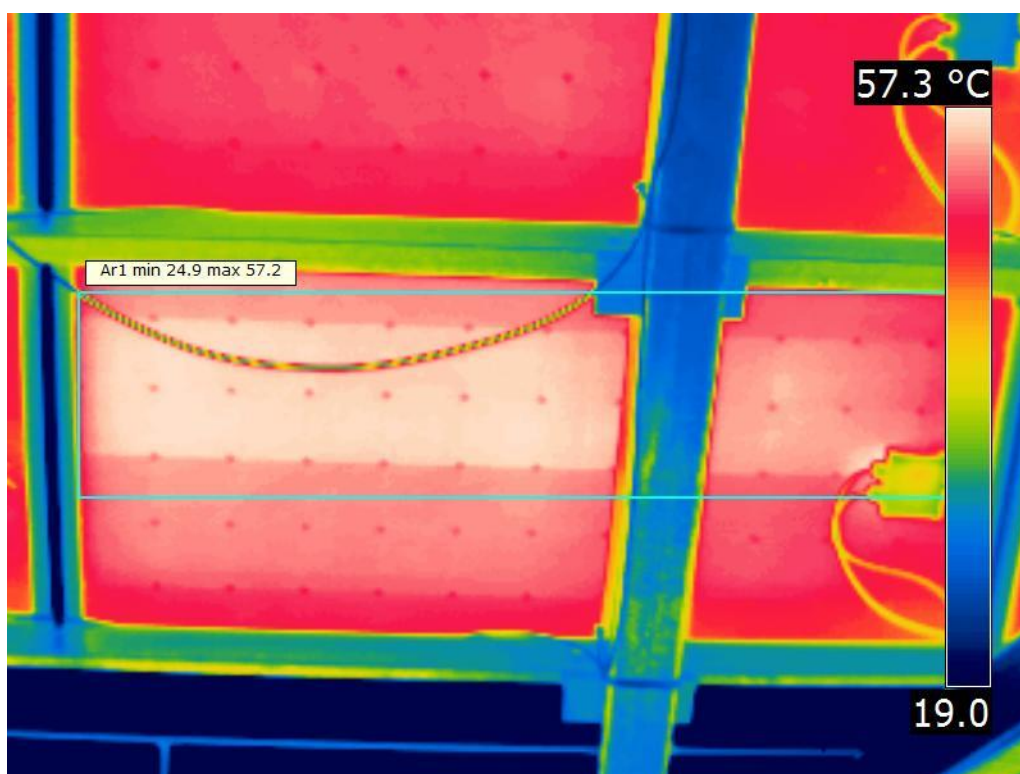


Obr. 3.10 Termograf ze zadní strany FV modulu číslo 96 s vadným FV článkem

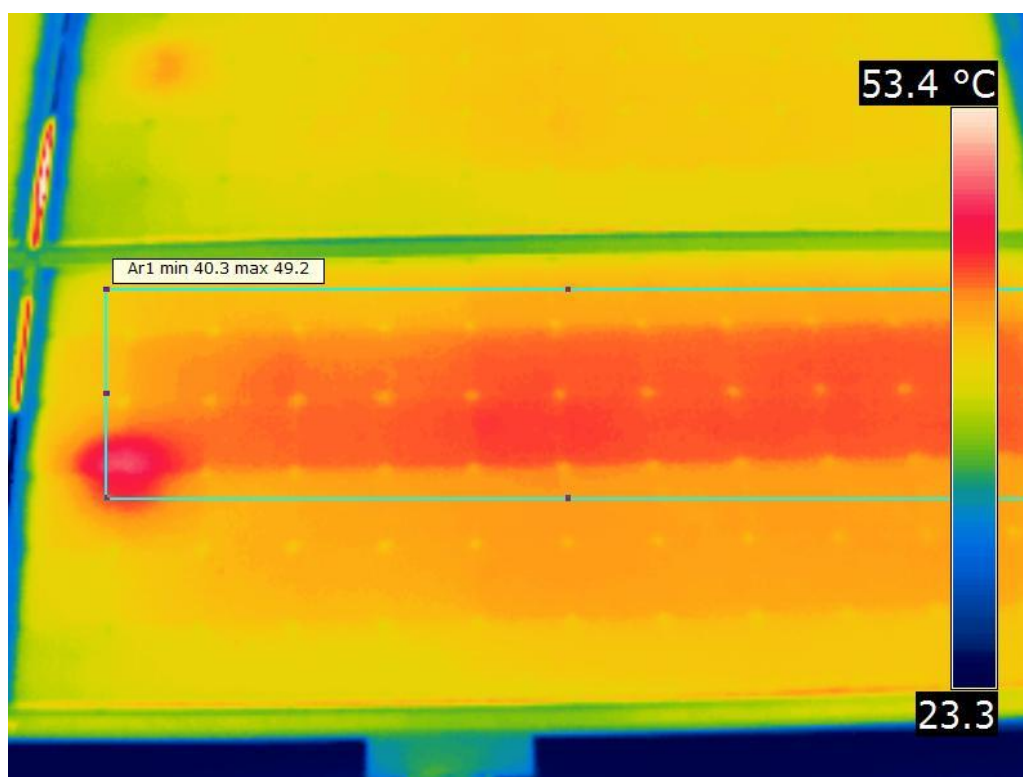


Obr. 3.11 Termograf z přední strany FV modulu číslo 96 s vadným FV článkem

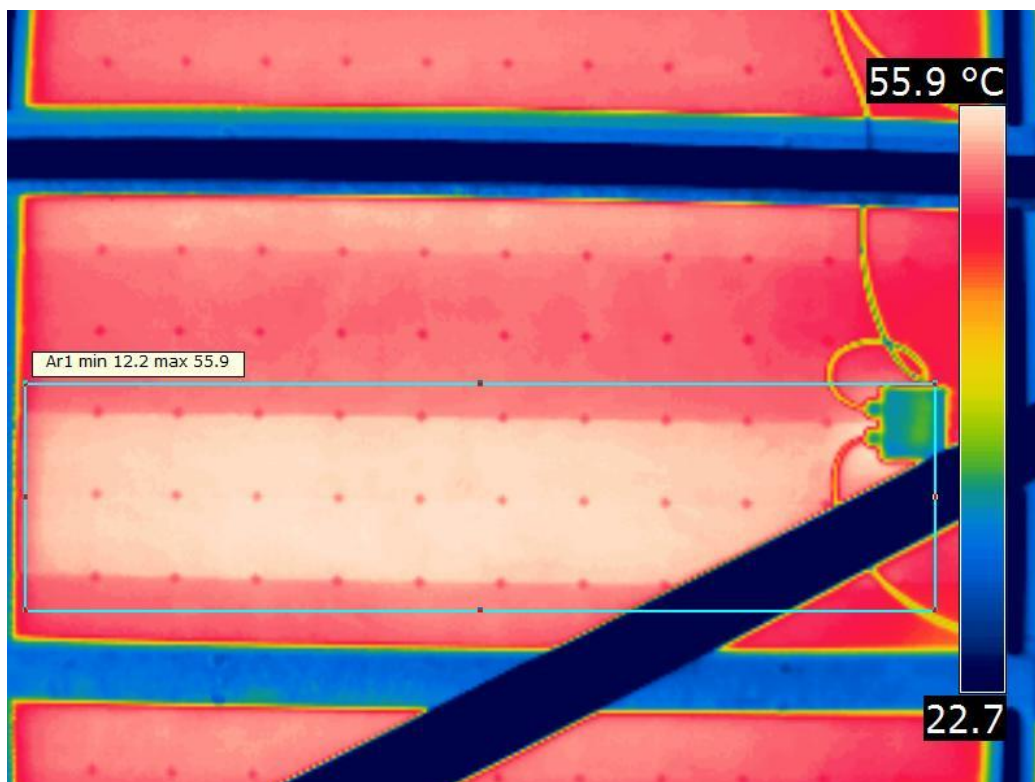




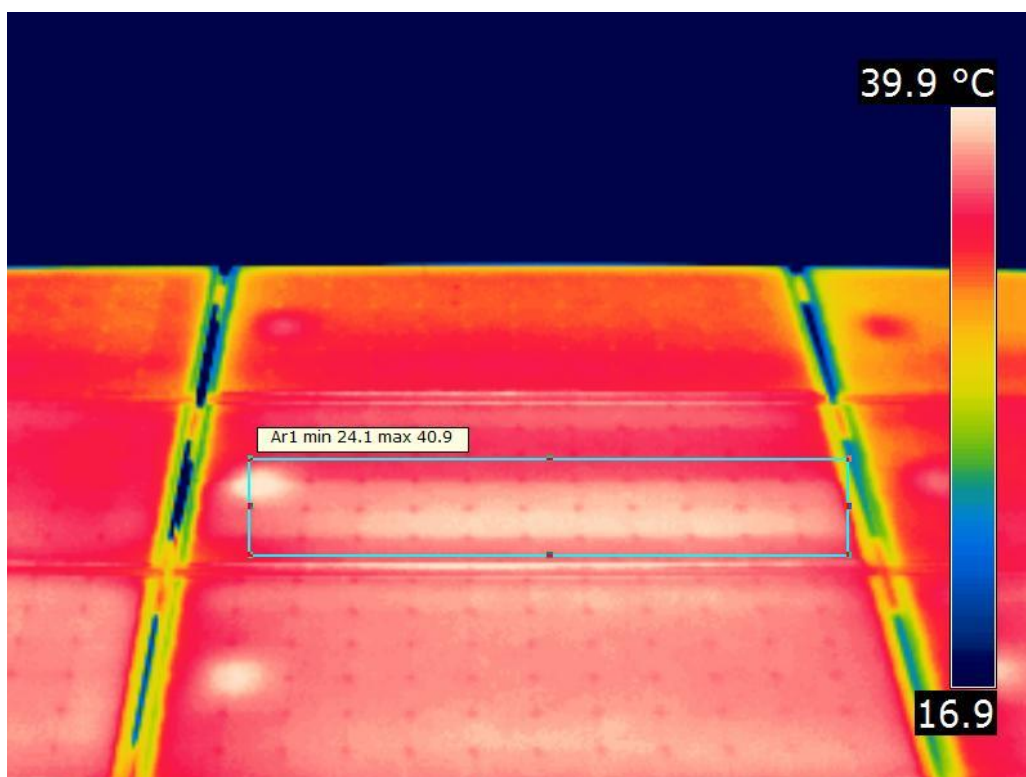
Obr. 3.12 Termograf ze zadní strany FV modulu číslo 109 s vadnou bypass diodou



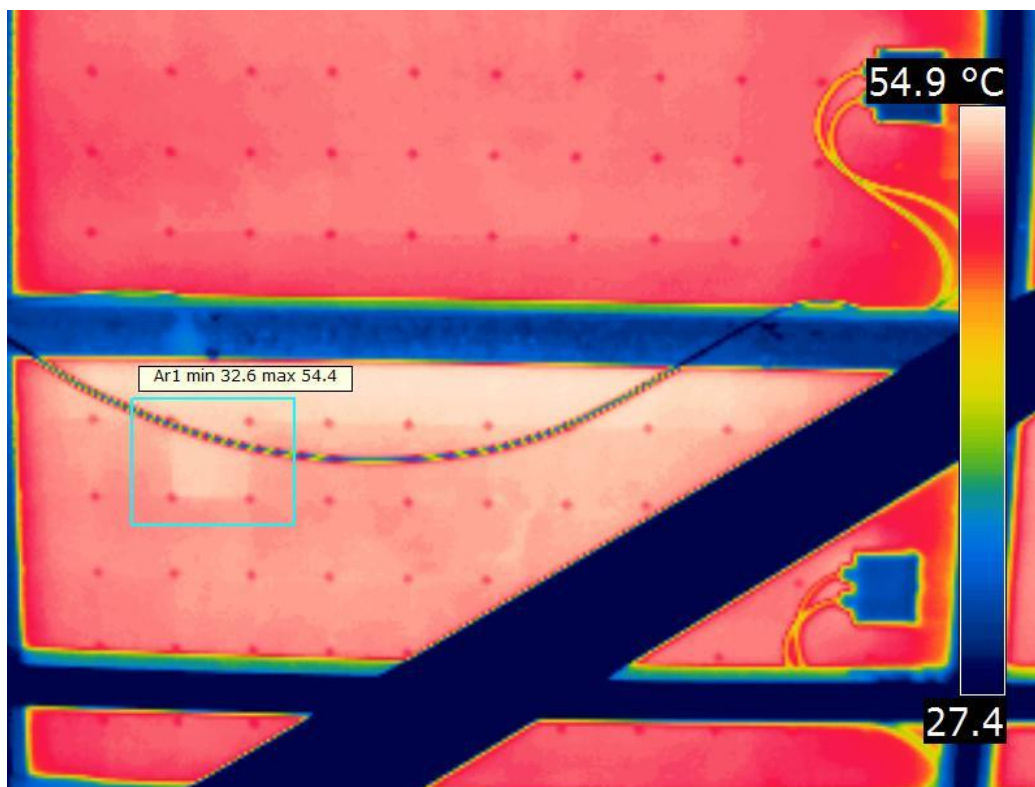
Obr. 3.13 Termograf z přední strany FV modulu číslo 109 s vadnou bypass diodou



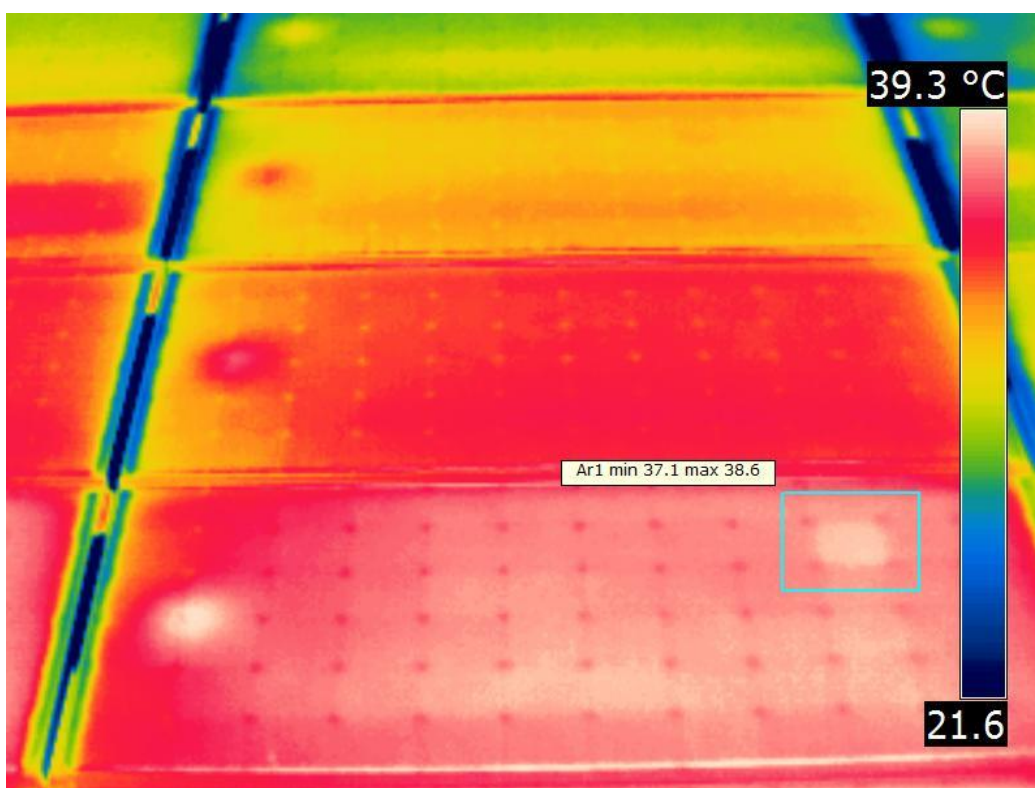
Obr. 3.14 Termograf ze zadní strany FV modulu číslo 143 s vadnou bypass diodou



Obr. 3.15 Termograf z přední strany FV modulu číslo 143 s vadnou bypass diodou



Obr. 3.16 Termograf ze zadní strany FV modulu číslo 147 s vadným FV článkem



Obr. 3.17 Termograf z přední strany FV modulu číslo 147 s vadným FV článkem



## 4 Měření V-A charakteristik zkoumaných FV modulů

Další velmi používaná, rychlá a efektivní metoda pro vyhodnocení provozního stavu FVE je měření V-A charakteristik FV modulů za pomoci přístroje, který se jmenuje I-V analyzátor. Ten umožňuje snadné zjištění skutečných parametrů FV modulů, jako je jejich elektrický proud, napětí, výkon atd. Díky tomuto měření se mohou velice lehce odhalit skryté vady na FV modulech, které nejsou vidět na první vizuální pohled a ani na termovizních snímcích pořízených termokamerou.

### 4.1 Analyzátor FV modulů HT Instruments I-V 400



Obr. 4.1 Analyzátor HT Instruments I-V 400 [10]

Analyzátor I-V 400, jenž lze vidět na *Obr. 4.1*, je multifunkční přístroj od italského výrobce HT Instruments, který slouží k ověřování I-V charakteristik u jednotlivých FV modulů nebo také řetězců. Pomocí tohoto přístroje se velice snadno provádí všední i budoucí plánovaná kontrola či údržba FV panelů. Případné vyskytující se závady nebo potíže dokáže odhalit velice rychle, efektivně a hlavně intuitivně. Jednotlivá měření V-A charakteristik a základních parametrů FV modulů nebo řetězců probíhají v terénu za plného provozu FVE. Analyzátor HT Instruments I-V 400 také měří hodnotu intenzity slunečního záření, které dopadá na povrch FV modulů a snímá i jejich teplotu. Přístroj ze

všech zjištěných dat poté vydedukuje pro konkrétní FV modul nebo řetězec I-V charakteristiku, která může být přepočítána i pro měření při standardních zkušebních podmínkách STC. Toto je podstatné pro porovnání jednotlivých hodnot I-V charakteristik měřených FV modulů s nominálními údaji, které deklaruje daný výrobce. Díky tomu se dají velice snadno porovnat výsledky charakteristik mezi sebou. Výhoda tohoto přístroje je, že dané I-V charakteristiky měřených FV modulů umí porovnat rychle a automaticky s hodnotami od výrobce a následně sám je schopen rozhodnout, zda vyhovují či nikoliv. Obsluha tohoto HT Instruments I-V 400 analyzátoru je tak ušetřena od provádění nějakých výpočtů nebo složitých operací. Výsledný elektrický proud a napětí jednotlivých FV modulů se měří s pomocí čtyřdrátového zapojení z důvodu zaručení přesných a správných výsledků daného měření [11].

Kvůli správným výsledným hodnotám zkoumaných FV modulů musí být referenční článek k měření intenzity slunečního záření, který je k vidění na *Obr. 4.2*, vždy správně nainstalován. Tím je myšleno, že musí kopírovat příslušný úhel sklonu i orientaci daných měřených FV modulů. Referenční článek k snímání intenzity slunečního záření nesmí ležet na měřených FV modulech, protože by zastiňoval jednotlivé FV články, a to by způsobovalo znehodnocení příslušného měření. Z tohoto důvodu se vždy pokládá na nejbližší sousední neměřený FV panel. Nápodobně se to musí provést i s čidlem snímajícím teplotu FV modulů. Druhou možností je přiložení čidla na daný měřený FV panel tak, aby nezastiňoval žádné jeho FV články (např. ze zadní strany). Po přiložení čidla na FV moduly se musí chvíli počkat na ustálení jeho snímané teploty, aby se zamezilo nesprávným výsledkům měřených elektrických charakteristik. Snímač teploty FV modulů je k vidění na *Obr. 4.3* [5].



*Obr. 4.2 Referenční článek k měření intenzity slunečního záření*

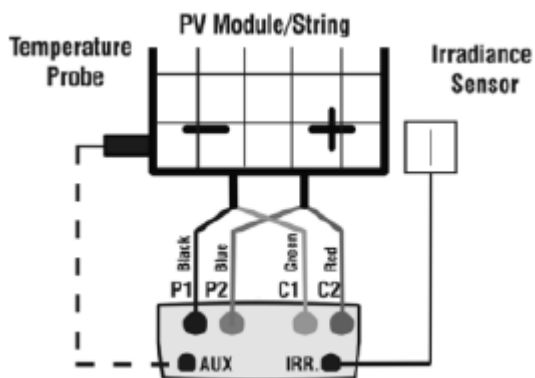


Obr. 4.3 Čidlo k snímání teploty FV modulů

Všechny připojovací kabely i vstupní zdířky k měření výstupního elektrického proudu a napětí FV modulu nebo řetězce jsou u analyzátoru HT Instruments I-V 400 barevně rozlišeny z důvodu přehlednosti správného připojení. Jednotlivé vstupní zdířky analyzátoru lze vidět na Obr. 4.4. Schéma zapojení referenčního článku měřícího intenzitu slunečního záření, čidla snímajícího teplotu FV modulů a zbylých čtyř připojovacích kabelů k FV modulu nebo řetězci je k nahlédnutí na Obr. 4.5.



Obr. 4.4 Vstupní zdířky analyzátoru HT Instruments I-V 400 [10]



Obr. 4.5 Schéma zapojení analyzátoru HT Instruments I-V 400 k FV modulu nebo řetězci [5]

## 4.2 Vliv FV článků na V-A charakteristiky FV modulů

### 4.2.1 Princip FV článku

Základní princip FV článku spočívá v přímé přeměně slunečního světla na využitelnou elektrickou energii. Tento fyzikální jev přeměny slunečního světla na elektrickou energii se uskutečňuje nehlučně, bez žádné spotřeby látek ve FV materiálech, a hlavně bez škodlivých emisí. Jednotlivé FV články jsou složeny z polovodičů a jako nejčastější materiál se pro to využívá křemík. Princip polovodičů je ten, že začnou být vodivými až po přívodu určité energie. Atom polokovového prvku křemíku má čtyři vnější elektrony, které společně se sousedními atomy vytváří vazby elektronových párů. U všech krystalických FV článků je při tom uskutečněn zrod krystalické mřížky, která má pravidelnou strukturu. Uvnitř jednotlivého FV článku se nachází dvě elektricky rozdílně dotované spolu sousedící vrstvy a tím pádem i odlišně vodivé polovodičové oblasti. První oblast je kladně dotovaná (p) a druhá záporně (n). Mezi těmito oblastmi se vytváří interní elektrické pole, které vzniká důsledkem difuze nadbytečných elektronů ze záporného do kladného polovodiče v místě nacházejícího se pn přechodu. Tímto se vytvoří oblast s malým množstvím volných nosičů náboje, někdy označovaná jako vrstva prostorového náboje. V záporné oblasti vrstvy prostorového náboje se vyskytují zbylé kladně nabitě atomy a v kladné oblasti vrstvy prostorového náboje se zase naopak nalézají zbylé záporně nabitě atomy dotujícího prvku. Díky tomu se vytvoří elektrické pole, které má směr své orientace proti směru chodu nosičů náboje a to zapříčiní, že difuze jednotlivých elektronů neprobíhá donekonečna [2].

Jestliže dopadne na FV článek sluneční světlo, tak se díky této zářivé energii fotonů mohou odpoutat elektrony ze své vazby, kterou mají s atomovou mřížkou. Jednotlivé dopadající fotony se přitom absorbují. Odpoutané elektrony se pak mohou zcela volně pohybovat a na své prvotní pozici zanechají kladný náboj, tzv. díru. Interní elektrické pole FV článku má za následek, že elektrony i díry mají tendenci se přitahovat do protikladných směrů. Oba elektrické náboje tudíž postupují odlišnými trasami (záporné náboje cestují k přední straně FV článku a kladné náboje naopak k zadní straně FV článku). To má za následek, že na přední a zadní straně FV článku vznikne obrácená polarita, která způsobí mezi těmito stranami odlišný potenciál. Jinými slovy vzniká mezi nimi elektrické napětí. Toto vzniklé elektrické napětí naprázdno se pohybuje u krystalických FV článků nejčastěji



mezi hodnotami 0,6 – 0,7 V. Jestliže se uzavře celý elektrický obvod, tak jsou umožněny podmínky pro tečení elektrického proudu přes určitý spotřebič. To lze vidět např. na *Obr. 4.6* se žárovkou. Nějaké elektrony se však nedostanou až ke kontaktům, protože rekombinují. Takovýto elektron se neúčastní tečení proudu [2].

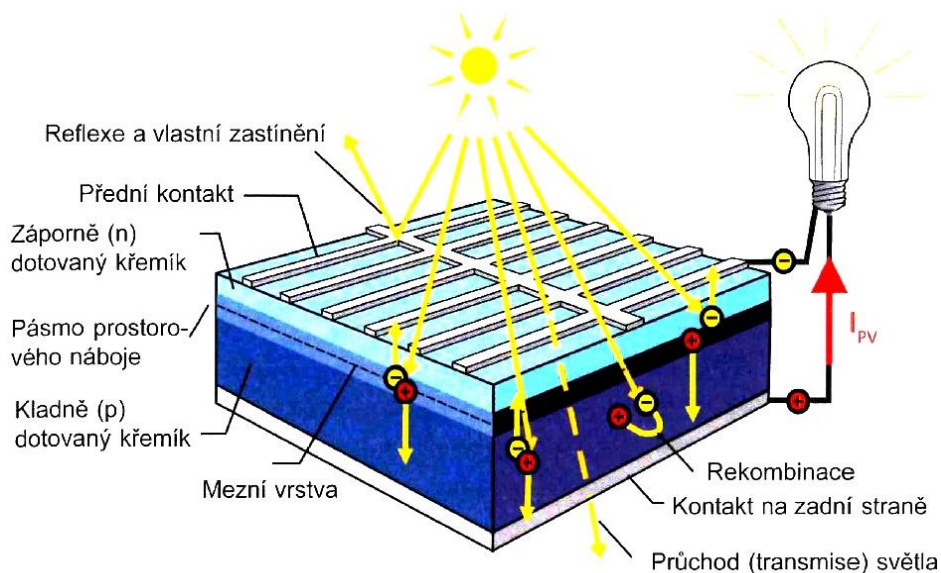
Ve zkratce lze říci, že difuze nosičů náboje k jednotlivým elektrickým kontaktům FV článku má za následek, že vznikne elektrické napětí na daném FV článku [2].

#### 4.2.2 Základ FV článku

Základní složení běžného krystalického FV článku je takové, že má dvě jinak dotované křemíkové vrstvy. Horní vrstva směřovaná ke slunečnímu záření je záporně dotovaná nekovovým chemickým prvkem fosforem. Pod touto horní vrstvou se pak nachází druhá křemíková vrstva, která se dotuje kladným polokovem, jehož název je bór. Na přední a zadní straně FV článku se nachází jednotlivé kontakty z kovových elektrod. Díky nim je umožněno odebírání elektrického proudu z FV článků. Zadní strana se nejvíce realizuje jako celoplošný kontakt, který se tam dává prostřednictvím hliníkové nebo stříbrné tenké vrstvy pasty. Naopak kontakty přední strany jsou často provedeny ve stylu tenké mřížky, protože musí zahalovat co nejmenší plochu vnějšku, aby bylo umožněno propouštění co možná největšího množství slunečního záření. Jednotlivé kontakty se nejčastěji dělají pomocí sítotiskové metody. Další důležitou částí FV článků je antireflexní vrstva na povrchu, která zabraňuje odražení jednotlivých fotonů. Díky ní se jich může absorbovat co největší množství. Základní FV články mají šedou barvu, ale díky antireflexní vrstvě se zbarví na jinou podle druhu jednotlivých krystalických článků. Stavbu celého krystalického křemíkového FV článku a jeho způsob přeměny energie lze vidět na *Obr. 4.6* [2].

Při dopadu slunečního záření na FV článek se uskuteční oddělení nábojů, které způsobí tečení elektrického proudu při spojení se spotřebičem. Ztráty FV článku jsou způsobeny rekombinací, odrazem neboli reflexí a zastíněním předními kovovými elektrodami. Nejvíce ztrát energie je však způsobeno dlouhovlnným nebo krátkovlnným slunečním zářením. Např. dlouhovlnné sluneční záření celé prostupuje daným FV článkem, a tudíž nezpůsobuje produkci nosičů nábojů. Jinými slovy se to také nazývá transmisí. Každý druh FV článku umí jinak účinně využít jednotlivé vlnové délky slunečního spektra

a následně je přeměnit na užitečnou elektrickou energii. Z toho vyplývá, že každý druh FV článku se svými materiálně technickými vlastnostmi má jinou spektrální citlivost, a to způsobuje odlišné ztráty. Jiná složka nevyužité energie se zase pohlcuje a přeměňuje se v tepelnou energii. Na Obr. 4.7 lze vidět všechny jednotlivé ztráty a výslednou využitou elektrickou energii z celé dopadající sluneční energie [2].



Obr. 4.6 Struktura krystalického křemíkového FV článku a jeho způsob přeměny energie [12]



Obr. 4.7 Tok energie ve FV článku [2]

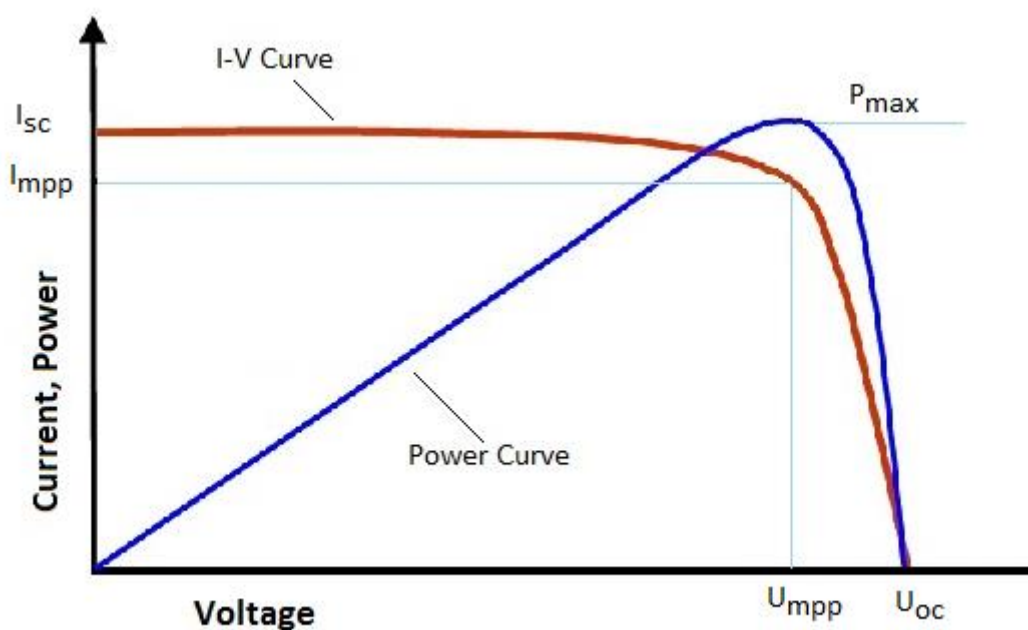
### 4.2.3 Účinnost a výkon FV článků

Pomocí účinnosti FV článku nebo modulu se definuje největší možný elektrický výkon, který je schopna vyprodukovat daná plocha FV článku nebo modulu. Z důvodu neustálé proměnlivosti intenzity slunečního záření v běžné praxi se zavedlo, že bude pro všechny FV články nebo moduly použita referenční hodnota ozáření  $1000 \text{ W/m}^2$ , z které se bude vypočítávat daná hodnota účinnosti. Dalšími parametry, které ovlivňují výslednou účinnost, a tudíž i výkon FV článků, je sluneční spektrum a teplota. Pro tyto dva faktory se také definovaly referenční hodnoty. Pro teplotu FV článku nebo modulu to je  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  a pro sluneční spektrum je stanovená hodnota  $AM = 1,5$ . Všechny takto definované hodnoty intenzity slunečního záření, teploty a slunečního spektra slouží k tomu, aby se daly vzájemně porovnat elektrické charakteristiky FV článků nebo modulů mezi sebou. Měří se to za tzv. standardních zkušebních podmínek STC (Standard Test Conditions). Výsledná účinnost FV modulu se pohybuje pokaždé o malinko menší než finální účinnost FV článku. To má za následek přední sklo FV modulu, protože sluneční záření jím neprochází v plné síle. Další faktor snižující účinnost je ten, že nejde umístit FV články na celou plochu FV modulu. Jednotlivé FV moduly mají vždy svůj typový štítek, na kterém jsou napsány údaje o maximálním výkonu  $P_{MAX}$  nebo častěji se to značí  $P_{MPP}$ . Tento výkon  $P_{MPP}$  je určen v bodě maximálního výkonu MPP (Maximum Power Point) FV modulu spolu s náležitým napětím  $U_{MPP}$  a proudem  $I_{MPP}$ . Dále se uvádí na typovém štítku FV modulu hodnota napětí naprázdno  $U_{OC}$  a hodnota zkratového proudu  $I_{SC}$ . Většinou můžou mít tyto jmenovité hodnoty snášenlivost v rozmezí až  $\pm 10 \%$  kvůli výrobě. Výsledná jmenovitá účinnost FV článků, případně modulů v bodě maximálního výkonu MPP za standardních zkušebních podmínek STC se tedy vypočte [2]:

$$\eta_{STC} = \frac{P_{MPP(STC)}}{A \times e} = \frac{P_{MPP(STC)}}{A \times 1000 \text{ W/m}^2} \quad (4.1)$$

Na následujícím *Obr. 4.8* jsou k vidění dvě elektrické charakteristiky FV modulu, které jsou popsány jistými křivkami. První charakteristika I-V prochází všemi provozními body, které si lze zvolit v souvislosti se změnou zatížení FV modulu za standardních zkušebních podmínek STC. Jestliže se spolu vynásobí napětí a proud FV modulu, tak výsledkem je výkonová křivka, která je také k vidění na *Obr. 4.8*. Na těchto elektrických

charakteristikách FV modulu lze dobře vidět, kde se nachází provozní bod maximálního výkonu MPP [2].



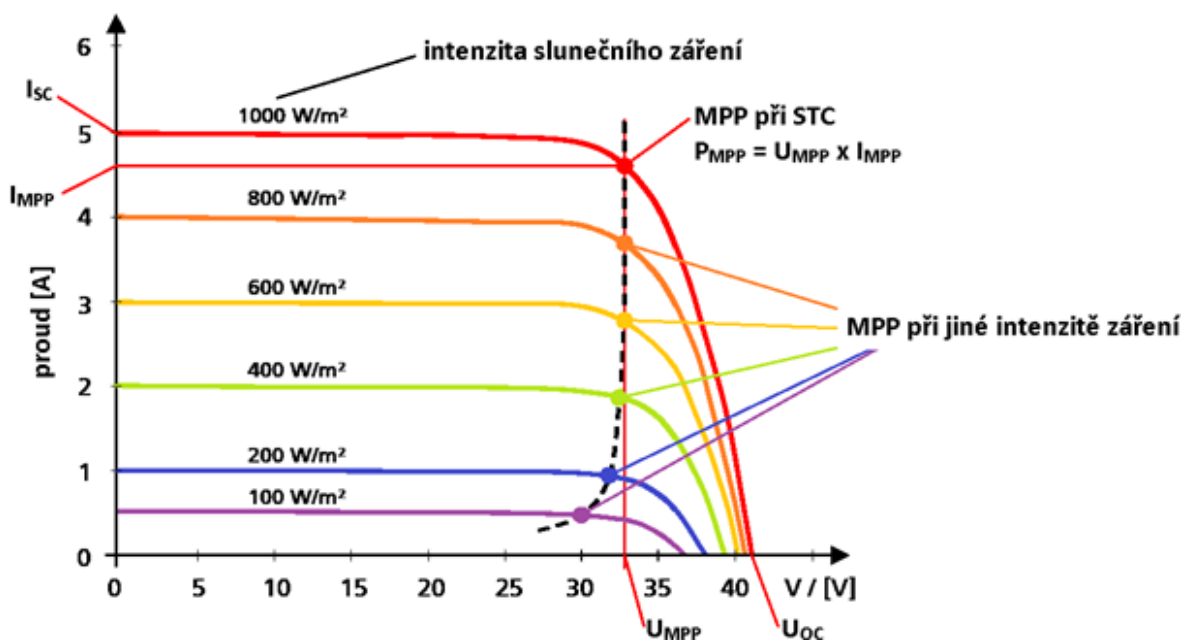
Obr. 4.8 I-V a výkonová charakteristika FV modulu [15]

#### 4.2.4 Citlivost FV článků na počasí

Veškeré jmenovité hodnoty elektrických charakteristik FV článků nebo modulů uvedené v datových listech se měří a určují ve speciálních laboratořích, které mají pevně dané světelné a teplotní podmínky. To se provádí hlavně kvůli tomu, aby se daly navzájem porovnat elektrické charakteristiky jednotlivých typů FV článků nebo modulů mezi sebou, nehledě na dané počasí a stanoviště. V reálném prostředí je velice složité se alespoň trochu přiblížit k laboratorním podmínkám, protože standardní zkušební podmínky STC, při nichž jsou měřeny dané elektrické charakteristiky FV článků nebo modulů, se vyskytují v praxi jen velmi zřídka. Z tohoto důvodu FV zařízení pracují jen málokdy ve jmenovitém provozním režimu [2].

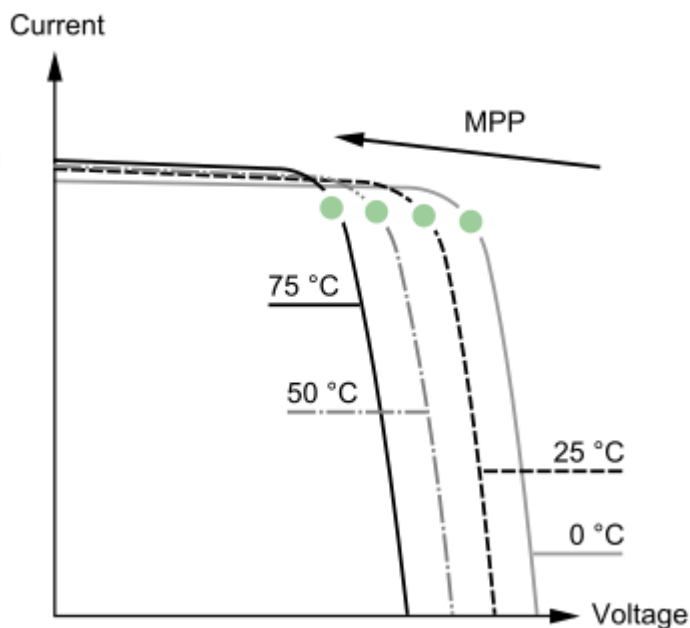
Během celého dne se neustále mění na FV člancích nebo modulech napětí, proud, a tudíž i výkon v závislosti na intenzitě slunečního ozáření a také na vlastní teplotě. Intenzita slunečního ozáření má největší vliv na celkovou hodnotu protékajícího proudu konkrétním FV modulem. Přibližně lze říci, že když klesne hodnota slunečního ozáření na polovinu, tak proud vystupující z FV modulu je také poloviční. To lze vidět na Obr. 4.9, na kterém

jsou ukázány pro rozdílné hodnoty intenzity slunečního ozáření V-A charakteristiky FV modulu skládajícího se z krystalických FV článků [2].



Obr. 4.9 Charakteristiky FV modulu pro různé intenzity slunečního záření [13]

Naopak napětí na FV modulu je nejvíce ovlivňováno svojí výslednou celkovou teplotou modulu. Tato závislost se projevuje tak, že při nízkých teplotách se napětí na FV modulu zvětšuje (např. v zimním období finální hodnota napětí může klidně stoupnout až o 20 % nad stanovenou jmenovitou hodnotu) a naopak při vyšších teplotách napětí klesá, viz *Obr. 4.10*. Zahřátí FV modulu značně snižuje jeho účinnost, a tudíž i jeho elektrický výkon. V letních prosluněných měsících se teplota FV modulu může klidně pohybovat okolo 50 °C. Stoupající teplota má vliv na výkon krystalických FV panelů takový, že s každým stupněm navíc se snižuje jejich jmenovitý výkon zhruba o 0,4 – 0,5 %. I přes tato úskalí vyrábí v letních měsících FV moduly téměř o 80 % více elektrické energie než v zimních měsících. To je zapříčiněno tím, že v letním období je o dost větší intenzita dopadajícího slunečního záření na zemský povrch. Pro zvýšení výsledné produkované elektrické energie FV generátorem do sítě je dobré, aby zadní strana všech FV modulů byla co nejlépe odvětrávána z důvodu lepšího chlazení. Na *Obr. 4.9* a *Obr. 4.10* lze velmi dobře pozorovat, jak se mění bod maximálního výkonu MPP při odlišných hodnotách intenzity slunečního záření nebo teploty [2].



Obr. 4.10 Charakteristiky FV modulu pro různé teploty [14]

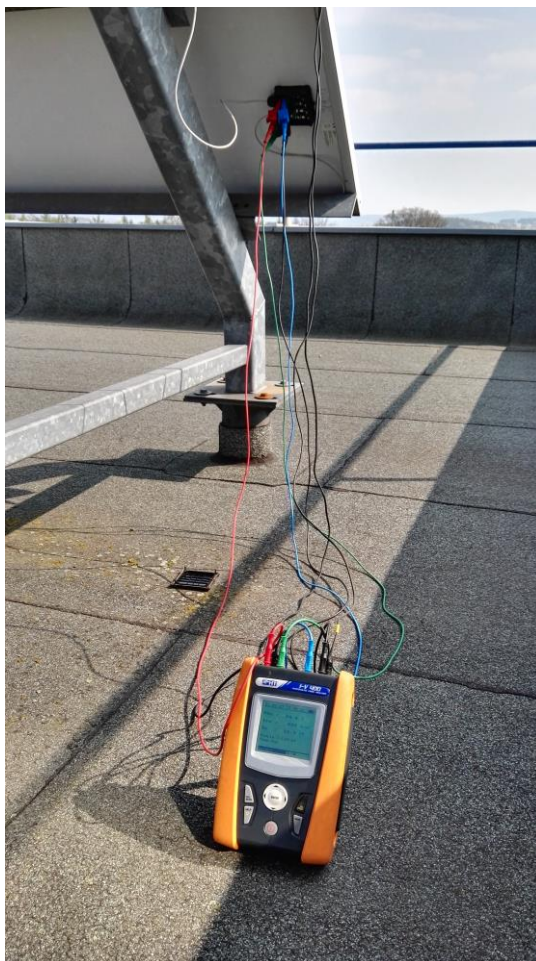
### 4.3 Výsledky měření V-A charakteristik zkoumaných FV modulů

Samotné měření V-A charakteristik všech 192 FV panelů jsem prováděl analyzátozem HT Instruments I-V 400 ve více dnech z důvodu velké časové náročnosti. Ta spočívala v otevření všech připojovacích krabiček u jednotlivých FV panelů, aby se mohly dané kladné nebo záporné připojovací kontakty FV panelů vůbec odpojit ze svorkovnice. Hlavně jedním z největších problémů bylo najít optimální slunečný den, kdy by se mohlo realizovat dané měření, aby se daly získat co možná nejlepší výsledné naměřené hodnoty všech FV modulů. Ty jsem pak analyzoval a porovnával v programu Topview, který byl součástí balíčku s daným analyzátozem.

První měření jsem provedl dne 24. dubna 2017 od zhruba 11:45 h do 16:30 h při hodnotě intenzity slunečního záření, které se ze začátku měření pohybovalo okolo  $800 \text{ W/m}^2$ , pak postupně kleslo s přibývajícím hodinami až na hodnotu kolem  $600 \text{ W/m}^2$ . Za těchto světelných podmínek se daly získat docela dobré výsledky V-A charakteristik FV modulů. Ukázka ze samotného měření je na Obr. 4.11, na kterém je vidět analyzátoz HT Instruments I-V 400 se čtyřdrátovým zapojením pro měření napětí a proudu jednotlivých FV modulů a také vývody k jeho dvěma sondám pro snímání teploty FV panelů a dopadajícího slunečního záření na jejich povrch. Tento zmiňovaný den jsem změřil

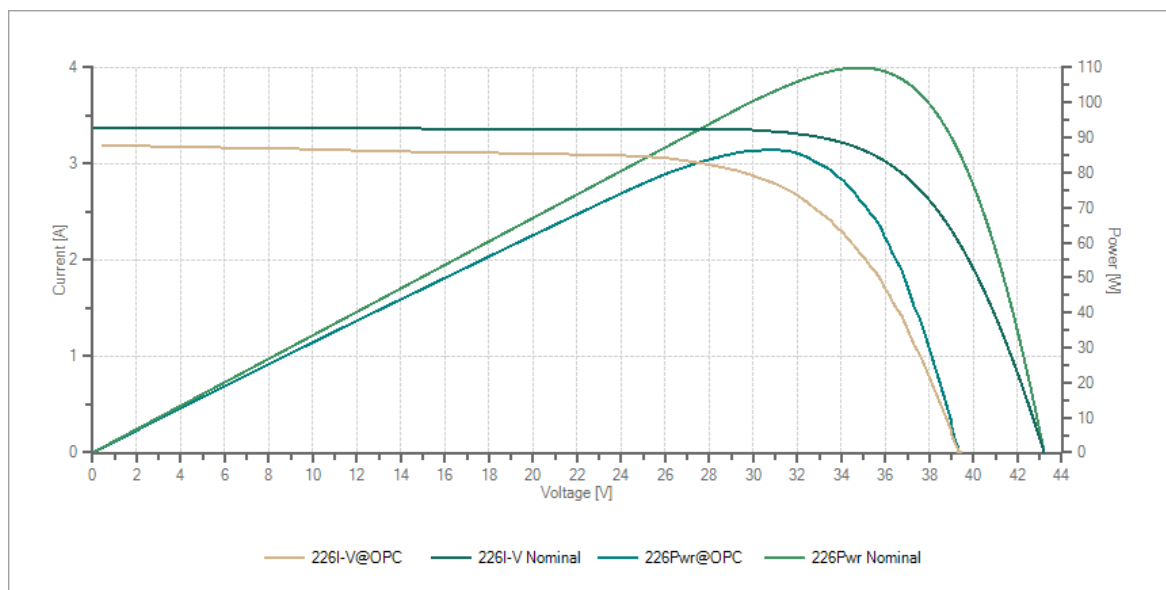


polovinu všech FV panelů a navíc také ty, které vykazovaly na termovizních snímcích nějaké závady projevující se zvýšenou teplotou oproti bezprostřednímu okolí.



Obr. 4.11 Měření V-A charakteristik FV modulů analyzátozem HT Instruments I-V 400

Správný průběh V-A a výkonové charakteristiky FV modulu z monokrystalického křemíku s typovým označením I-110/24, na kterém se nevyskytují žádné závady, lze vidět na Obr. 4.12. Je na něm také možno pozorovat porovnání mnou změřených elektrických charakteristik za určitých světelných a teplotních podmínek se jmenovitými elektrickými charakteristikami, které se určují za standardních zkušebních podmínek STC. Díky odlišným měřicím podmínkám jsou měřené průběhy křivek o něco nižší než nominální křivky. Nejdůležitější ale je to, že oba průběhy jednotlivých křivek V-A i výkonové charakteristiky mají stejný tvar, což ukazuje na to, že daný FV modul je bez jakéhokoliv poškození. V Tab. 4.1 jsou ukázány všechny výsledky naměřených hodnot pro tento FV modul bez závad.



Obr. 4.12 I-V a výkonová charakteristika FV modulu bez závad

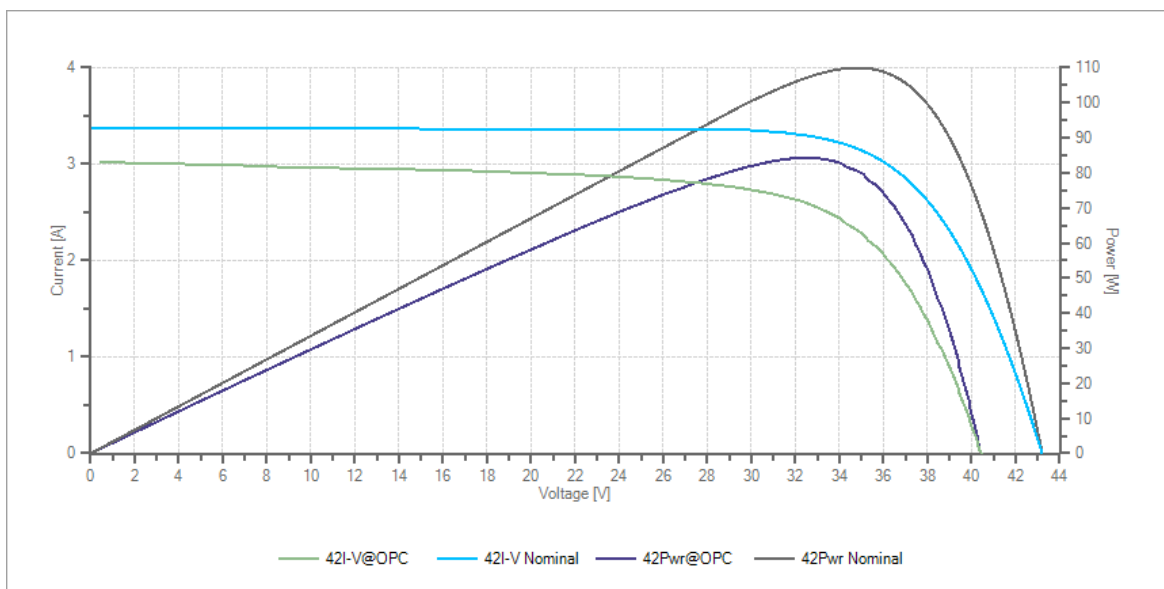
Module 26	$P_{MPP}$ (W)	$V_{OC}$ (V)	$V_{MPP}$ (V)	$I_{MPP}$ (A)	$I_{SC}$ (A)	Irradiance (W/m <sup>2</sup> )	Module Temp. (°C)	FF (%)
Measures@OPC	86,61	39,39	30,94	2,8	3,2	804	33,5	69
Nominal	110	43,2	34,8	3,16	3,38	1000	25	75

Tab. 4.1 Naměřené hodnoty FV modulu bez závad

Při termovizním měření bylo zjištěno, že na čtyřech FV panelech se vyskytují plošky se zvýšenou teplotou oproti bezprostřednímu okolí. Ty jsou vidět na *Obr. 3.8*, *Obr. 3.9*, *Obr. 3.10*, *Obr. 3.11*, *Obr. 3.16* a *Obr. 3.17*. Tento teplotní rozdíl je nejspíše způsoben přehříváním konkrétních FV článků. Po změření jejich V-A a výkonových charakteristik u těchto všech čtyřech FV modulů se ukázalo, že jejich průběhy křivek vůbec nevykazují nějaké odlišné výsledky hodnot v porovnání s hodnotami, které mají FV moduly bez závad. To lze vidět na *Obr. 4.13*, kde je průběh V-A a výkonové charakteristiky pro FV modul číslo 17, a také na *Obr. 4.14*, kde jsou ty samé průběhy, ale akorát pro FV modul číslo 147. V *Tab. 4.2* a *Tab. 4.3* jsou ukázány všechny výsledky naměřených hodnot pro FV moduly s číselným označením 17 a 147. Díky proměření V-A a výkonové charakteristiky FV modulů označených při termovizním měření jako FV moduly s jedním vadným FV článkem, byly vyloučeny ze seznamu poškozených FV modulů. Nicméně bych netvrdil, že jsou zcela v pořádku. Výchyly v termovizním měření mohou naznačovat začátek nějaké projevující se budoucí vady, ale zatím není ještě patrný žádný konkrétní

vliv na dané hodnoty jejich elektrických charakteristik. To se ale s postupem času může změnit.

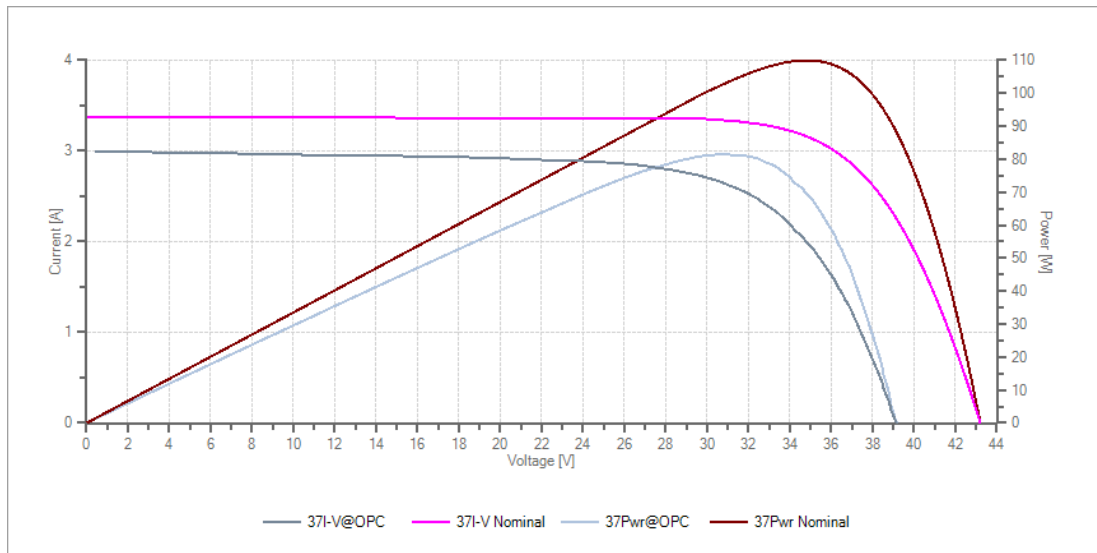
Dále s pomocí termovizního měření byly nalezeny na třech FV modulech výrazné teplotní pásy, které se projevily na termografických snímcích zřetelnou zvýšenou teplotou oproti jejich bezprostřednímu okolí. Tyto teplotní pásy jsou vidět na *Obr. 3.6*, *Obr. 3.7*, *Obr. 3.12*, *Obr. 3.13*, *Obr. 3.14* a *Obr. 3.15*. Teplotní pásy na FV modulech jsou nejpravděpodobněji způsobeny vadnými bypass diodami. Na V-A a výkonových charakteristikách se tyto vady projevují snížením napětí naprázdno  $V_{OC}$  zhruba o 1/3 oproti FV modulům bez závady. To má vliv na výkon celého FV modulu, který je přibližně taky o 1/3 menší než celkový výkon na jednotlivých nepoškozených FV modulech. V-A a výkonová charakteristika vadných FV modulů, které mají poškozenou bypass diodu, je k vidění pro FV modul číslo 10 na *Obr. 4.15* a pro FV modul číslo 109 na *Obr. 4.16*. Všechny výsledky naměřených hodnot pro FV modul číslo 10 jsou uvedeny v *Tab. 4.4* a pro FV modul číslo 109 v *Tab. 4.5*.



*Obr. 4.13 I-V a výkonová charakteristika FV modulu číslo 17*

Module 17	$P_{MPP}$ (W)	$V_{OC}$ (V)	$V_{MPP}$ (V)	$I_{MPP}$ (A)	$I_{SC}$ (A)	Irradiance ( $W/m^2$ )	Module Temp. ( $^{\circ}C$ )	FF (%)
Measures@OPC	84,43	40,43	32,23	2,62	3,02	736	30,1	69
Nominal	110	43,2	34,8	3,16	3,38	1000	25	75

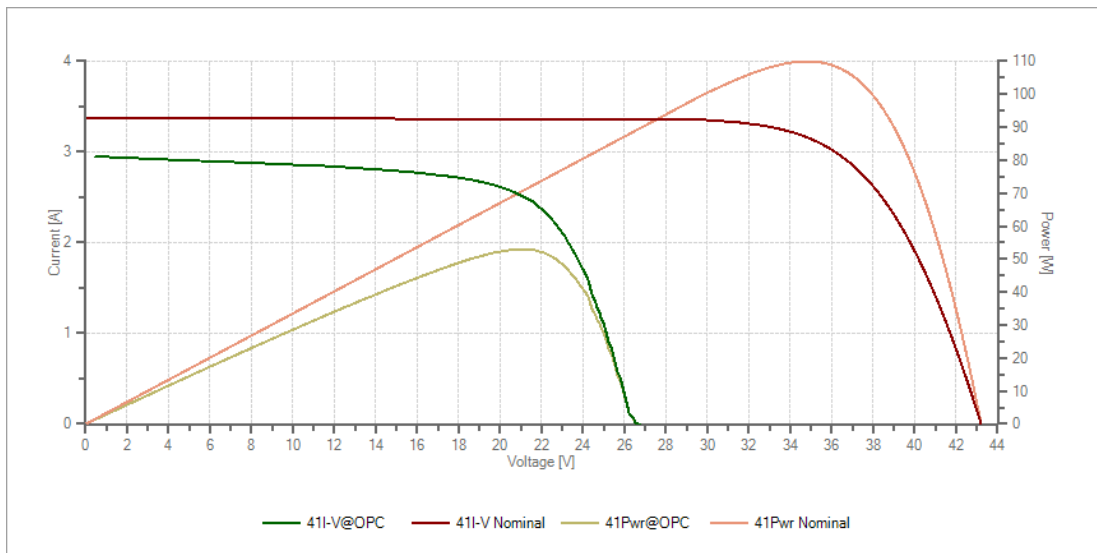
*Tab. 4.2 Naměřené hodnoty FV modulu číslo 17*



Obr. 4.14 I-V a výkonová charakteristika FV modulu číslo 147

Module 147	$P_{MPP}$ (W)	$V_{OC}$ (V)	$V_{MPP}$ (V)	$I_{MPP}$ (A)	$I_{SC}$ (A)	Irradiance ( $W/m^2$ )	Module Temp. ( $^{\circ}C$ )	FF (%)
Measures@OPC	81,52	39,13	30,66	2,66	3	754	36,7	70
Nominal	110	43,2	34,8	3,16	3,38	1000	25	75

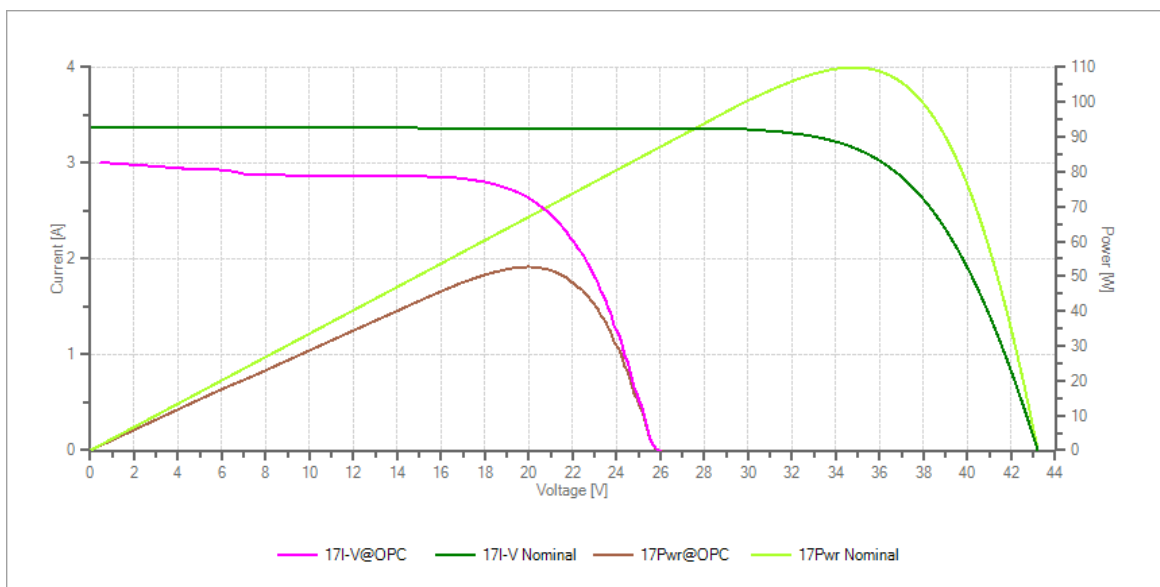
Tab. 4.3 Naměřené hodnoty FV modulu číslo 147



Obr. 4.15 I-V a výkonová charakteristika FV modulu číslo 10 s vadnou bypass diodou

Module 10	$P_{MPP}$ (W)	$V_{OC}$ (V)	$V_{MPP}$ (V)	$I_{MPP}$ (A)	$I_{SC}$ (A)	Irradiance ( $W/m^2$ )	Module Temp. ( $^{\circ}C$ )	FF (%)
Measures@OPC	52,93	26,64	21,58	2,45	2,95	730	29,1	67
Nominal	110	43,2	34,8	3,16	3,38	1000	25	75

Tab. 4.4 Naměřené hodnoty FV modulu číslo 10 s vadnou bypass diodou



Obr. 4.16 I-V a výkonová charakteristika FV modulu číslo 109 s vadnou bypass diodou

Module 109	$P_{MPP}$ (W)	$V_{OC}$ (V)	$V_{MPP}$ (V)	$I_{MPP}$ (A)	$I_{SC}$ (A)	Irradiance ( $W/m^2$ )	Module Temp. ( $^{\circ}C$ )	FF (%)
Measures@OPC	52,72	25,94	20,01	2,63	3,01	759	31,9	68
Nominal	110	43,2	34,8	3,16	3,38	1000	25	75

Tab. 4.5 Naměřené hodnoty FV modulu číslo 109 s vadnou bypass diodou

Další měření FV modulů bylo provedeno dne 9. května 2017 přibližně od 9:00 h do 12:30 h. Hodnota intenzity slunečního záření se pro tento časový horizont pohybovala zhruba v rozmezí  $400 - 700 W/m^2$ . Poslední měření všech zbylých FV modulů proběhlo 10. května 2017 mezi 10:00 h a 14:20 h. Ze začátku měření se hodnota intenzity slunečního záření pohybovala okolo  $500 W/m^2$  a postupem času vystoupala až na úroveň kolem  $800 W/m^2$ .

Po změření V-A a výkonových charakteristik u všech jednotlivých FV modulů a následném zpracování a porovnání jejich výsledků v programu Topview se ukázalo, že nakonec mají jen tři FV panely velmi rozdílné průběhy elektrických charakteristik, a tudíž se u nich vyskytují nějaké nežádoucí vady. Konkrétně to jsou s největší pravděpodobností vadné bypass diody. Tyto tři poškozené FV moduly mají snížený celkový výkon zhruba o 1/3 oproti FV modulům, na kterých se nevyskytuje žádná závada. Zbytek všech FV modulů má stejný tvar průběhů křivek V-A a výkonové charakteristiky jako na Obr. 4. 12. Můžeme o nich říci, že jsou zcela bez závady a nijak nezhoršují výsledné hodnoty

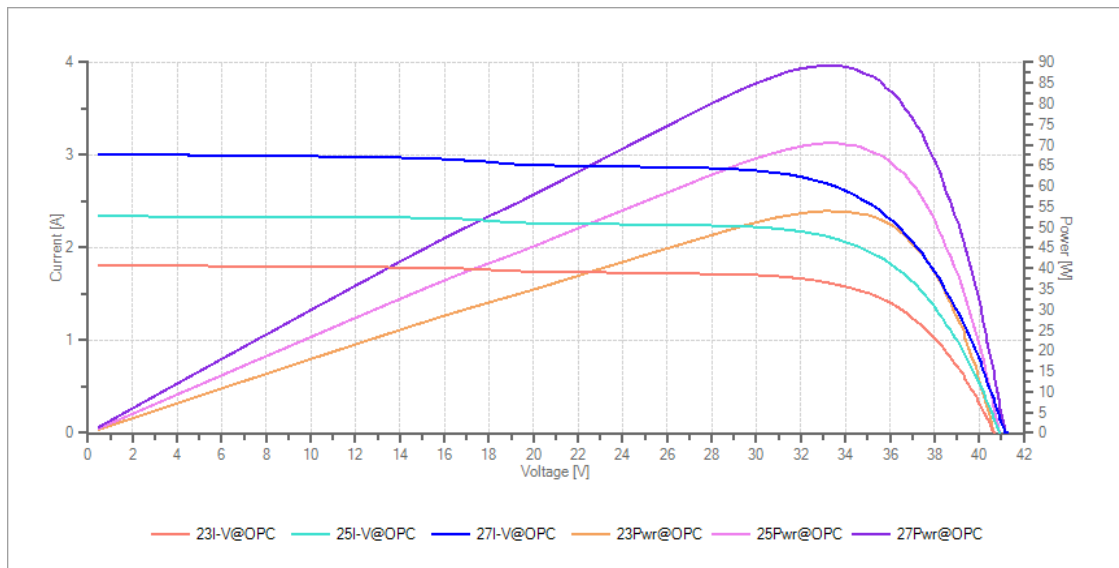
elektrických charakteristik oproti hodnotám jmenovitým, které jsou uváděny výrobcem. Jinými slovy tyto FV moduly pracují zcela v pořádku. Všechny naměřené hodnoty, I-V a výkonové charakteristiky všech FV modulů jsou k dispozici na přiloženém CD.

#### 4.4 Výsledky měření V-A charakteristik zkoumaných FV modulů při různých provozních podmínkách

Značný vliv na V-A a výkonové charakteristiky FV modulů má dané počasí a s ním spojená intenzita slunečního záření, a také okolní teplota vzduchu. Tyto dva parametry nejvíce ovlivňují průběhy křivek a hodnoty elektrických charakteristik. Konkrétně intenzita slunečního záření dopadající na povrch jednotlivých FV modulů má na průběh V-A charakteristiky takový vliv, jak je znázorněno na *Obr. 4.9*. Teplota samotných FV modulů se projevuje na průběhu V-A charakteristiky zase jiným způsobem a to lze vidět na *Obr. 4.10*. Ideální podmínky pro dosažení co možná největší výkonosti jednotlivých FV modulů jsou při vysokých hodnotách intenzity slunečního záření a nízké teplotě samotných FV modulů. Za těchto předpokladů se dá docílit největších hodnot vyrobené elektrické energie FV generátorem.

Vliv počasí na elektrické charakteristiky měřeného FV modulu číslo 186 za různých světelných podmínek je vidět na *Obr. 4.17*, kde je I-V a výkonová charakteristika pro tři různé hodnoty intenzity slunečního záření. Je možno pozorovat, že proud vystupující z tohoto panelu se snižuje téměř lineárně v závislosti na klesajícím slunečním ozáření. Dále výsledné napětí naprázdno  $V_{OC}$  se zmenšuje jen velmi nepatrně se snižujícími se hodnotami intenzity slunečního záření. Všechny naměřené údaje FV modulu číslo 186 pro tři různé hodnoty slunečního ozáření jsou uvedeny v *Tab. 4.6*. Pro názornost je ještě na *Obr. 4.18* uvedena I-V a výkonová charakteristika FV modulu číslo 20 pro dvě různé intenzity slunečního záření dopadajícího na jeho povrch. Na *Obr. 4.18* je vidět, že rozdíl mezi první a druhou hodnotou slunečního ozáření je zhruba trojnásobný, a tudíž i výstupní proud FV modulu má přibližně trojnásobný rozdíl. To se logicky projeví i trojnásobným rozdílem celkového výkonu FV modulu. Napětí naprázdno  $V_{OC}$  se zdá být na první pohled stejné. To je z toho důvodu, protože při slunečním ozáření  $222 \text{ W/m}^2$  mají moduly teplotu pouze  $19,7 \text{ }^\circ\text{C}$  a díky tomu se posune napětí naprázdno  $V_{OC}$  výše na téměř stejnou hodnotu jako při slunečním ozáření  $653 \text{ W/m}^2$ . Všechny naměřené hodnoty FV modulu číslo 20 pro dvě odlišné intenzity slunečního záření jsou ukázány v *Tab. 4.7*.

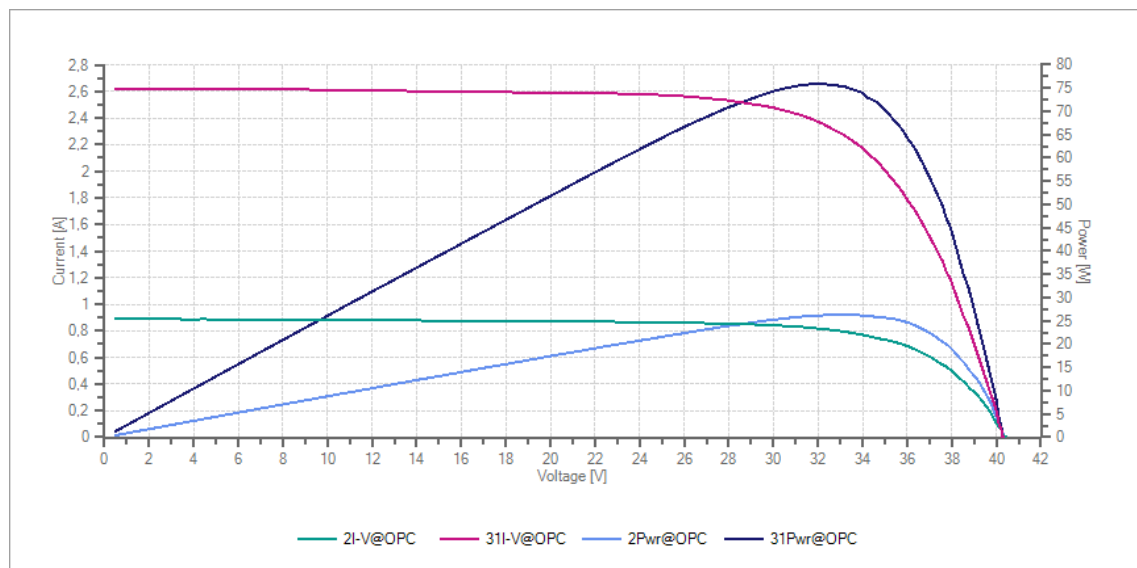




Obr. 4.17 I-V a výkonová charakteristika FV modulu číslo 186 pro různé intenzity slunečního záření

Module 186	$P_{MPP}$ (W)	$V_{OC}$ (V)	$V_{MPP}$ (V)	$I_{MPP}$ (A)	$I_{SC}$ (A)	Irradiance ( $W/m^2$ )	Module Temp. ( $^{\circ}C$ )	FF (%)
23 Measures@OPC	53,9	40,67	33,15	1,63	1,81	423	26,4	73
25 Measures@OPC	70,42	40,94	33,15	2,12	2,34	557	27,2	73
27 Measures@OPC	89,29	41,19	33,58	2,66	3,02	708	27,9	72

Tab. 4.6 Naměřené hodnoty FV modulu číslo 186 pro různé intenzity slunečního záření

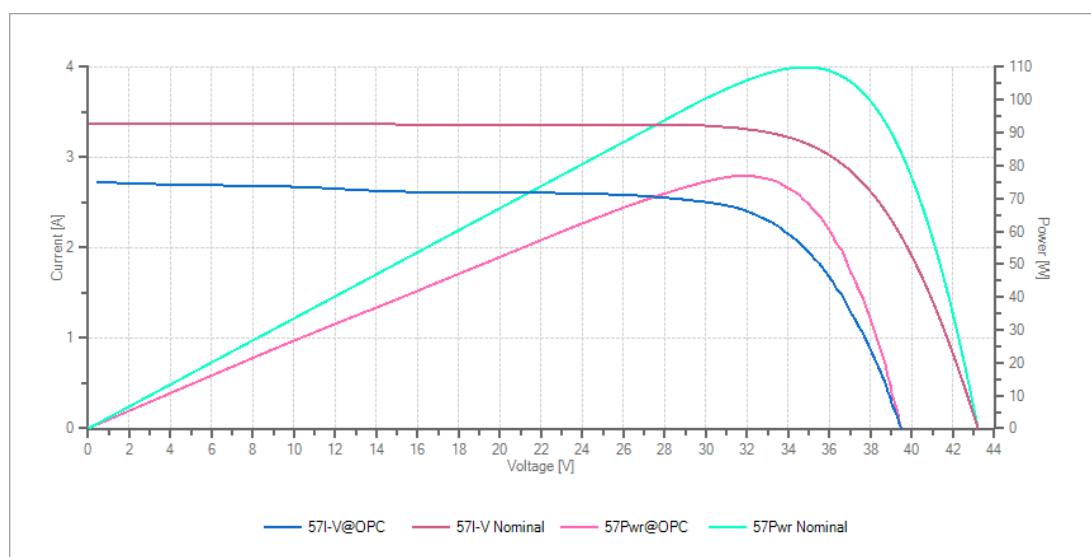


Obr. 4.18 I-V a výkonová charakteristika FV modulu číslo 20 pro různé intenzity slunečního záření

Module 20	$P_{MPP}$ (W)	$V_{OC}$ (V)	$V_{MPP}$ (V)	$I_{MPP}$ (A)	$I_{SC}$ (A)	Irradiance (W/m <sup>2</sup> )	Module Temp. (°C)	FF (%)
2 Measures@OPC	26,35	40,44	32,73	0,81	0,89	222	19,7	73
31 Measures@OPC	75,91	40,31	32,23	2,36	2,63	653	29,9	72

Tab. 4.7 Naměřené hodnoty FV modulu číslo 20 pro různé intenzity slunečního záření

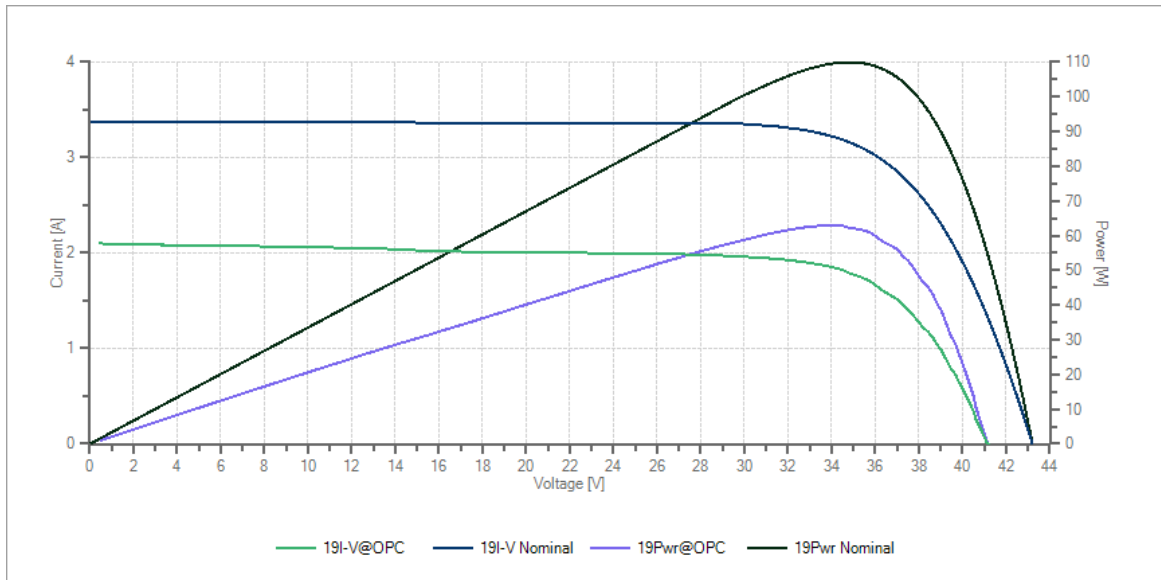
Výsledná teplota samotných FV modulů se nejvíce projevuje na jejich elektrických charakteristikách změnou napětí naprázdno  $V_{OC}$ . To lze dobře pozorovat na *Obr. 4.19* a *Obr. 4.20*, kde je změřena I-V a výkonová charakteristika FV panelu číslo 177 pro dvě různé teploty samotných modulů, a ještě k tomu porovnána s nominální charakteristikou. Na *Obr. 4.19* má modul teplotu 38,3 °C a napětí naprázdno 39,47 V. Za to na *Obr. 4.20* je teplota modulu na hodnotě 26,6 °C. Díky této nižší teplotě vzrostlo napětí naprázdno na hodnotu 41,14 V. Výkon  $P_{MPP}$  FV panelu při menší teplotě je nižší, protože hodnota slunečního ozáření není v obou případech stejná. Je velice složité nalézt vhodný den se stejnými světelnými podmínkami a na druhou stranu s velmi rozdílnou teplotou. Jestliže by se hodnoty intenzity slunečního záření shodovaly v obou případech, tak by s největší pravděpodobností měl FV panel s menší teplotou modulu vyšší výkon  $P_{MPP}$  než FV panel s větší teplotou modulu. V *Tab. 4.8* a *Tab. 4.9* jsou uvedeny všechny naměřené hodnoty pro FV panel číslo 177 pro dvě různé teploty modulů. V *Tab. 4.8* je to pro 38,3 °C a v *Tab. 4.9* pro teplotu modulů 26,6 °C. Všechny naměřené hodnoty, I-V a výkonové charakteristiky jednotlivých změřených FV modulů při různých provozních podmínkách jsou k dispozici na přiloženém CD.



Obr. 4.19 I-V a výkonová charakteristika FV panelu číslo 177 při teplotě modulu 38,3 °C

Module 177	$P_{MPP}$ (W)	$V_{OC}$ (V)	$V_{MPP}$ (V)	$I_{MPP}$ (A)	$I_{SC}$ (A)	Irradiance (W/m <sup>2</sup> )	Module Temp. (°C)	FF (%)
Measures@OPC	77	39,47	31,87	2,42	2,73	677	38,3	72
Nominal	110	43,2	34,8	3,16	3,38	1000	25	75

Tab. 4.8 Naměřené hodnoty FV panelu číslo 177 při teplotě modulu 38,3 °C



Obr. 4.20 I-V a výkonová charakteristika FV panelu číslo 177 při teplotě modulu 26,6 °C

Module 177	$P_{MPP}$ (W)	$V_{OC}$ (V)	$V_{MPP}$ (V)	$I_{MPP}$ (A)	$I_{SC}$ (A)	Irradiance (W/m <sup>2</sup> )	Module Temp. (°C)	FF (%)
Measures@OPC	63,02	41,14	33,94	1,86	2,1	515	26,6	73
Nominal	110	43,2	34,8	3,16	3,38	1000	25	75

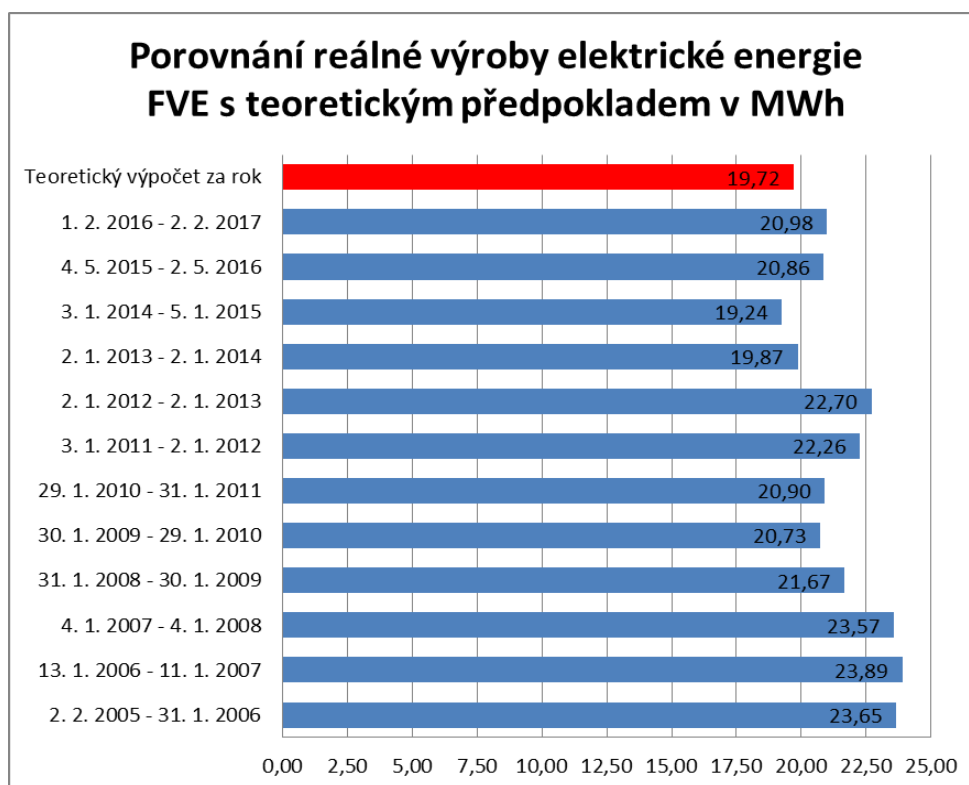
Tab. 4.9 Naměřené hodnoty FV panelu číslo 177 při teplotě modulu 26,6 °C

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

### 5.1 Zhodnocení výsledků měření zkoumané FVE

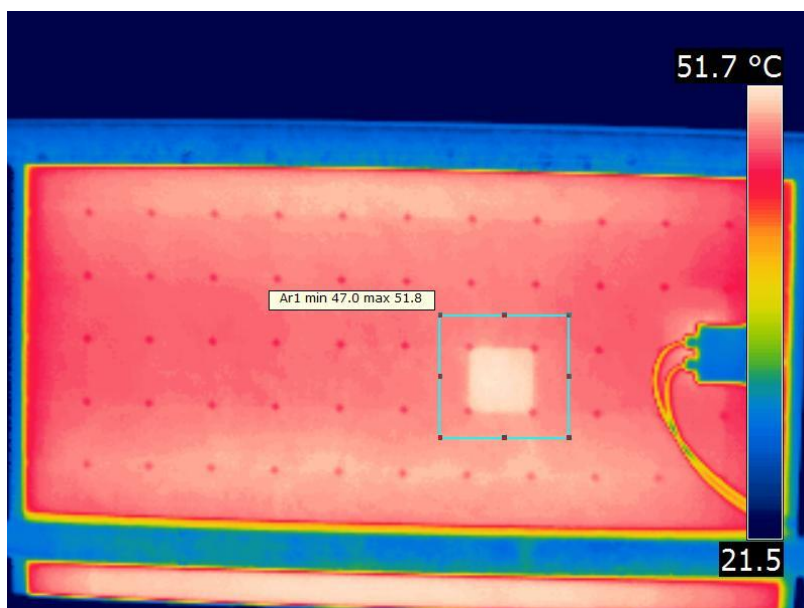
Kontrolní měření FVE malého výkonu, která se nachází na střeše budovy Elektrotechnické fakulty Západočeské univerzity v Plzni, proběhlo v několika fázích.

Nejprve jsem ověřil pomocí simulačního programu PVsyst celkový vývoj vyrobené elektrické energie FV systémem za jednotlivá roční období. Ten byl sledován od začátku spuštění FVE až po její současnost. Z výsledků simulace vyplynulo, že zkoumaná FVE je na tom se svým celkovým elektrickým výkonem dodávaným do napájecí sítě velmi dobře, protože ve všech jednotlivých ročních obdobích se celková reálná výroba elektrické energie vždy pohybovala na vyšších hodnotách, až na jeden ojedinělý případ, než teoretický předpoklad vypočtený programem PVsyst. Tyto všechny údaje jsou k vidění na *Obr. 5.1*. Z těchto výsledků lze soudit, že měřená FVE je ve velmi dobrém stavu z hlediska vyprodukovaného elektrického výkonu FV generátorem.

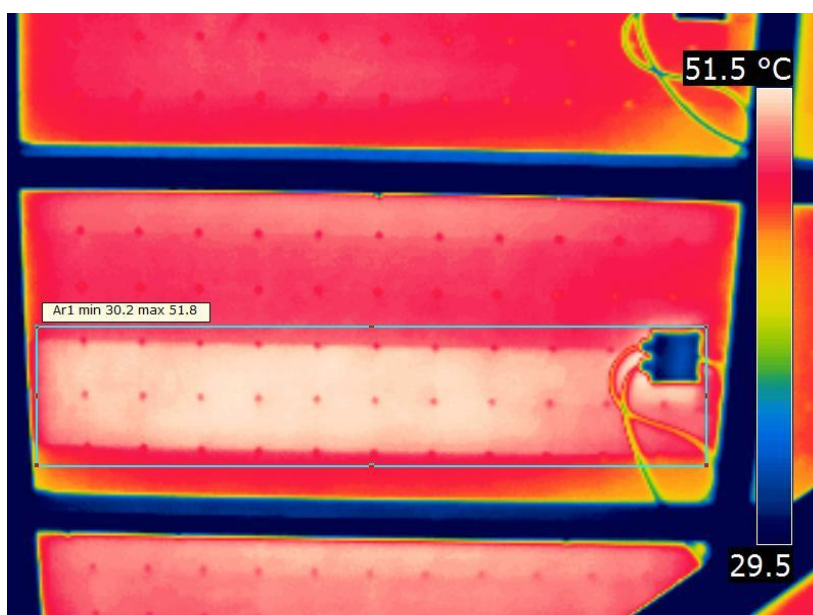


*Obr. 5.1 Srovnání hodnot reálné výroby elektrické energie FVE za jednotlivá roční období s teoretickým předpokladem*

Poté jsem kontroloval stav FVE prostřednictvím termografických snímků, které byly pořízeny termokamerou FLIR T335. Díky těmto snímkům se odhalilo několik FV modulů, na kterých se objevovaly místa s výrazně vyšší teplotou, než má jejich bezprostřední okolí. Na čtyřech FV modulech s číselným označením 17, 36, 96 a 147 se vyskytovala vždy jedna přehřátá ploška, která byla nejpravděpodobněji způsobena přehřívajícím se FV článkem. Pro ilustraci to lze vidět na *Obr. 5.2*. Dále byly objeveny na třech FV modulech s číslem 10, 109 a 143 výrazné teplotní pásy zapříčiněné nejspíše vadnou bypass diodou. Teplotní pás je pro názornost k nahlédnutí na *Obr. 5.3*.

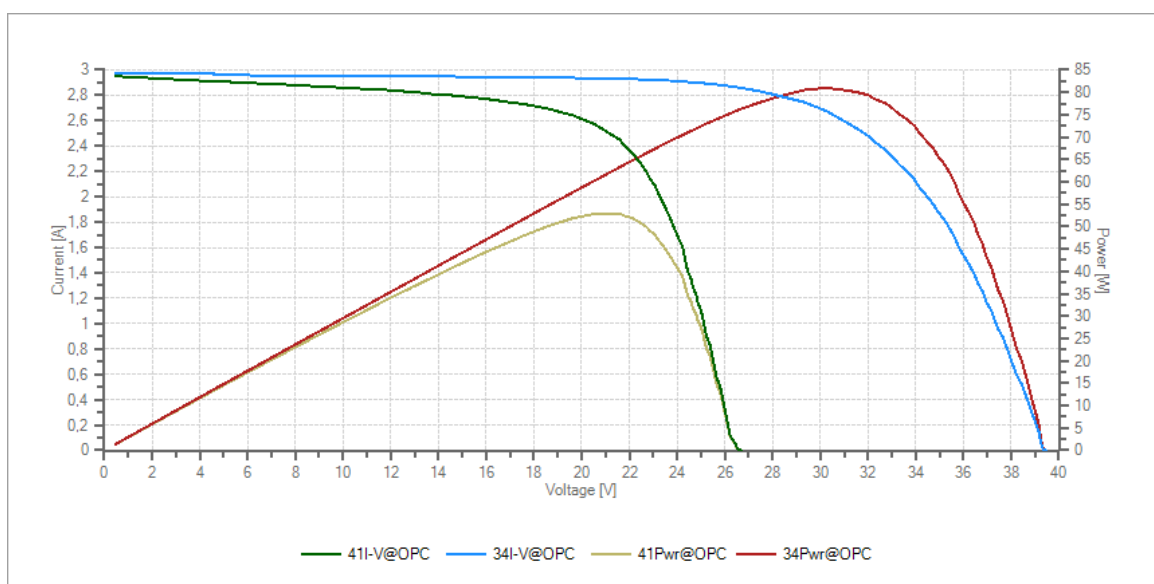


*Obr. 5.2* Termograf ze zadní strany FV modulu číslo 96 s vadným FV článkem



*Obr. 5.3* Termograf ze zadní strany FV modulu číslo 10 s vadnou bypass diodou

V poslední a zároveň nejnáročnější části kontrolního měření FVE jsem provedl proměrování V-A a výkonových charakteristik u všech 192 FV modulů. Z výsledků měření V-A a výkonových charakteristik vyplynulo, že z celkového počtu 192 FV modulů jsou jenom tři ve špatném stavu a to ty, u kterých byly na termografických snímcích k vidění teplotní pásy způsobené vadnou bypass diodou. U těchto třech poškozených FV modulů s číselným označením 10, 109 a 143 kleslo jejich napětí naprázdno  $V_{OC}$  a výkon  $P_{MPP}$  přibližně o 1/3 ve srovnání s FV moduly bez závady při stejné intenzitě slunečního záření. To lze pozorovat na *Obr. 5.4*, kde je k vidění porovnání I-V a výkonové charakteristiky FV modulu číslo 10 s vadnou bypass diodou s FV modulem číslo 141, který je zcela bez závady. V *Tab. 5.1* jsou zobrazeny všechny naměřené hodnoty pro tyto dva FV moduly. Naopak u čtyř FV modulů s číslem 17, 36, 96 a 147, u nichž byly při termovizním měření k vidění přehřáté plošky, tak se na jejich V-A a výkonových charakteristikách neukázaly žádné nežádoucí průběhy, které by naznačovaly, že jsou tyto FV moduly v nepořádku. Tyto FV moduly tak dodávají do napájecí sítě úplně stejný elektrický výkon jako FV moduly zcela bez závady. Přesto ale přehřáté plošky mohou naznačovat nějakou budoucí vadu samotného FV článku, která by se časem mohla projevit a způsobit na konkrétních FV modulech snížení jejich celkového elektrického výkonu. Z tohoto důvodu by byla nejlepší pravidelná kontrola V-A a výkonových charakteristik u těchto FV modulů po určitých časových intervalech, aby se případně včas mohla zjednat nějaká náprava.



*Obr. 5.4* I-V a výkonová charakteristika FV modulu číslo 10 s vadnou bypass diodou v porovnání s nepoškozeným FV modulem číslo 141



Module 10 and 141	$P_{MPP}$ (W)	$V_{OC}$ (V)	$V_{MPP}$ (V)	$I_{MPP}$ (A)	$I_{SC}$ (A)	Irradiance (W/m <sup>2</sup> )	Module Temp. (°C)	FF (%)
41 Measures@OPC	52,93	26,64	21,58	2,45	2,95	730	29,1	67
34 Measures@OPC	80,94	39,41	30,3	2,67	2,98	739	35,8	69

Tab. 5.1 Naměřené hodnoty FV modulu číslo 10 s vadnou bypass diodou a nepoškozeného FV modulu číslo 141

Měřená FVE je po vizuální stránce zcela v pořádku. Všechny FV moduly jsou čisté a nepoškozené. Drobnou vadou je jen mírně ztrouchnivělá izolace na připojovacích kabelech, které vedou z jednotlivých FV modulů do připojovacích skříní, ale ještě to je v přijatelných mezích, tudíž se nemusí realizovat žádná konkrétní náprava. Z jednotlivých výsledků měření zkoumané FVE vyplynulo, že z celkového počtu 192 FV modulů jsou jen tři výrazně poškozeny. To lze pokládat za velmi přijatelný výsledek, protože FVE na střeše budovy Elektrotechnické fakulty v Plzni je v provozu už dlouhých 14 let.

## 5.2 Návrh doporučení k odstranění problémů

Ze všech výsledků měření vyplývá, že pro zvýšení výkonnosti FVE by stačilo opravit tři FV moduly s číselným označením 10, 109 a 143. Tyto FV moduly mají poškozenou jednu bypass diodu, která způsobuje snížení celkového vyráběného výkonu zhruba o 1/3 oproti FV modulům zcela bez závady. Po bližším vizuálním prozkoumání vadných bypass diod nebyly nalezeny žádné známky o tom, že by byly nějak špatně připájené nebo měly nějaký viditelný defekt na první pohled. Z toho lze soudit, že pravděpodobně jde o poškození jejich vnitřních struktur. Tato vada s bypass diodou se u FV modulů vyskytuje velmi často. Nejefektivnějším a velmi levným řešením, které by vedlo k bezporuchovému stavu FV modulů by bylo takové, že by se všechny tyto vadné bypass diody odpájely a místo nich by se připájely zcela nové. Tato oprava by nejspíše postačila k tomu, aby se celková výkonnost FV modulů opět zvýšila na požadovanou optimální úroveň.

## Závěr

Tato diplomová práce se zabývala kontrolním měřením FVE malého výkonu, která se nachází na střeše budovy Elektrotechnické fakulty Západočeské univerzity v Plzni a vyrobenou elektrickou energii dodává do napájecí sítě budovy FEL.

Hlavním cílem této práce bylo zjistit, v jakém provozním stavu se nachází daná měřená FVE. Ze začátku práce jsem popsal všechny nejdůležitější parametry a jednotlivé komponenty analyzovaného systému. Poté už jsem se zaměřil na samotný stav FVE. Nejprve jsem provedl softwarovou simulaci celého FV systému v programu PVsyst. Softwarovou simulací byla vypočtena odhadovaná elektrická energie vyrobená FVE za rok. Tyto teoretické výsledky byly porovnány s jednotlivými ročními reálnými hodnotami, které vyprodukovala daná FVE od svého začátku provozu. Srovnání ukázalo, že skoro ve všech případech byla roční reálná výroba elektrické energie větší než teoretický předpoklad. Dále jsem prověřil stav FV modulů pomocí termovizního měření. Z termografických snímků vyplynulo, že na čtyřech FV modulech se objevovaly přehřáté plošky vždy u jednoho FV článku. Dále byly zjištěny na třech FV modulech výrazné teplotní pásy způsobené vadnou bypass diodou. Další kontrolní měření FV modulů proběhlo za pomoci I-V analyzátoru, díky kterému jsem zjistil u všech 192 FV modulů jejich V-A a výkonové charakteristiky. Tyto elektrické charakteristiky poukázaly na to, že nakonec jenom u třech FV modulů jsou nevyhovující průběhy daných křivek. Jednalo se o FV moduly, na kterých se při termovizním měření ukázaly výrazné teplotní pásy způsobené vadnou bypass diodou. Na těchto třech poškozených FV modulech klesl jejich výkon díky vadné bypass diodě přibližně o 1/3 oproti zbylým FV modulům bez závady. Tato vada se obecně na FV modulech objevuje velmi často. Naštěstí její případné odstranění není vůbec náročné.

Díky všem jednotlivým postupům a metodám, které vedly ke kontrolnímu měření zkoumané FVE se ukazuje, že měřená FVE na střeše budovy elektrotechnické fakulty je po 14 letech provozu ve velmi dobrém stavu. Pro zvýšení její výkonnosti by bylo jen potřeba vyměnit jednotlivé vadné bypass diody, které se nachází u třech FV modulů.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] SCHMIDT, Walter. *Analýza degradace 20 kWp FV systému*. Diplomová práce ZČU v Plzni, 2014
- [2] HASELHUHN, Ralf. *Fotovoltaika- Budovy jako zdroj proudu*. 1. české vyd. Ostrava: HEL, 2010. 176 s. ISBN 978-80-86167-33-6.
- [3] I-110/24 Solar Panel from Isofoton. [online]. Poslední změna 23.1.2017. [Cit. 23.1.2017]. Dostupné z: [http://www.posharp.com/i-11024-solar-panel-from-isofoton\\_p367821021d.aspx](http://www.posharp.com/i-11024-solar-panel-from-isofoton_p367821021d.aspx)
- [4] Fotovoltaika v podmínkách České republiky- Sluneční záření. [online]. Poslední změna 2.2.2017. [Cit. 2.2.2017]. Dostupné z: <http://www.isofenenergy.cz/Slunecni-zareni-v-CR.aspx>
- [5] KOHOUT, Jan. *Kontrolní měření FVE malého výkonu*. Diplomová práce ZČU v Plzni, 2014
- [6] LIBRA, Martin a POULEK, Vladislav. *Fotovoltaika- Teorie i praxe využití solární energie*. 1. vyd. Praha: ILSA, 2009. 160 s. ISBN 978-80-904311-0-2.
- [7] BEDNARČÍK, Petr. *Termografické měření FV elektrárny*. Diplomová práce ZČU v Plzni, 2016
- [8] Thermopile sensors = radiační pyrometry. [online]. Poslední změna 10.3.2017. [Cit. 10.3.2017]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/clanek/2005101401>
- [9] SLÁDEK, Luboš. *Metody detekce vad fotovoltaických systémů*. Diplomová práce ZČU v Plzni, 2014
- [10] HT Instruments I-V 400W. [online]. Poslední změna 4.4.2017. [Cit. 4.4.2017]. Dostupné z: <http://www.tequipment.net/HT-Instruments/I-V-400/Solar-Analyzer/>
- [11] I-V 400- Multifunkční přístroj k ověřování charakteristiky I-V u fotovoltaických řetězců a modulů. [online]. Poslední změna 4.4.2017. [Cit. 4.4.2017]. Dostupné z: [http://www.nobility.cz/files/letak\\_I\\_V400\\_cz.pdf](http://www.nobility.cz/files/letak_I_V400_cz.pdf)
- [12] Vysoké učení technické v Brně. [online]. Poslední změna 8.4.2017. [Cit. 8.4.2017]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/29030858-Vysoke-uceni-technicke-v-brne.html>
- [13] Nejpoužívanější pojmy ve fotovoltaiice- Výkonové charakteristiky článků a panelů. [online]. Poslední změna 16.4.2017. [Cit. 16.4.2017]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/11772-nejpouzivanejsi-pojmy-ve-fotovoltaice>
- [14] Photovoltaic background, technology. [online]. Poslední změna 20.4.2017. [Cit. 20.4.2017]. Dostupné z: <http://www.electrical-installation.org/enwiki/>
- [15] Solar Panel Dummy Load. [online]. Poslední změna 18.4.2017. [Cit. 18.4.2017]. Dostupné z: <https://electronics.stackexchange.com/questions/264225/solar-panel-dummy-load>

## Přílohy

### Příloha A – Výsledky softwarové simulace měřeného FV systému v programu PVsyst

PVSYST V6.53		01/03/17	Page 1/3
<b>Grid-Connected System: Simulation parameters</b>			
<b>Project :</b>	<b>Pilsen- Faculty of Electrical Engineering</b>		
<b>Geographical Site</b>	<b>Pilsen</b>	<b>Country</b>	<b>Czechia</b>
<b>Situation</b>	Latitude 49.72° N	<b>Longitude</b>	13.35° E
Time defined as	Legal Time Time zone UT+1	<b>Altitude</b>	353 m
<b>Meteo data:</b>	<b>Pilsen</b>	Meteonorm 7.1 (1996-2010), Sat=100% - Synthetic	
<b>Simulation variant :</b>	<b>Univerzitni 26, 306 14 Plzen</b>		
	Simulation date	01/03/17 13h16	
<b>Simulation parameters</b>			
<b>Collector Plane Orientation</b>	Tilt 45°	<b>Azimuth</b>	-10°
<b>Models used</b>	Transposition Perez	<b>Diffuse</b>	Perez, Meteonorm
<b>Horizon</b>	Free Horizon		
<b>Near Shadings</b>	No Shadings		
<b>PV Array Characteristics</b>			
<b>PV module</b>	Si-mono	<b>Model</b>	<b>I_ 110/24</b>
Original PVsyst database	<b>Manufacturer</b>	Isofoton	
Number of PV modules	<b>In series</b>	8 modules	
Total number of PV modules	<b>Nb. modules</b>	<b>In parallel</b>	24 strings
Array global power	<b>Nominal (STC)</b>	<b>Unit Nom. Power</b>	110 Wp
Array operating characteristics (50°C)	<b>U mpp</b>	<b>At operating cond.</b>	19.02 kWp (50°C)
Total area	<b>Module area</b>	<b>I mpp</b>	76 A
		<b>Cell area</b>	145 m <sup>2</sup>
<b>Inverter</b>	<b>Model</b>	<b>SP 2500-450</b>	
Original PVsyst database	<b>Manufacturer</b>	Sun Power	
Characteristics	<b>Operating Voltage</b>	<b>Unit Nom. Power</b>	2.50 kWac
Inverter pack	<b>Nb. of inverters</b>	<b>Total Power</b>	20 kWac
<b>PV Array loss factors</b>			
Thermal Loss factor	<b>Uc (const)</b>	20.0 W/m <sup>2</sup> K	<b>Uv (wind)</b> 0.0 W/m <sup>2</sup> K / m/s
Wiring Ohmic Loss	<b>Global array res.</b>	55 mOhm	<b>Loss Fraction</b> 1.5 % at STC
Module Quality Loss			<b>Loss Fraction</b> 5.0 %
Module Mismatch Losses			<b>Loss Fraction</b> 1.0 % at MPP
Incidence effect, ASHRAE parametrization	<b>IAM =</b>	1 - bo (1/cos i - 1)	<b>bo Param.</b> 0.05
<b>User's needs :</b>	Unlimited load (grid)		

PVsyst Evaluation mode

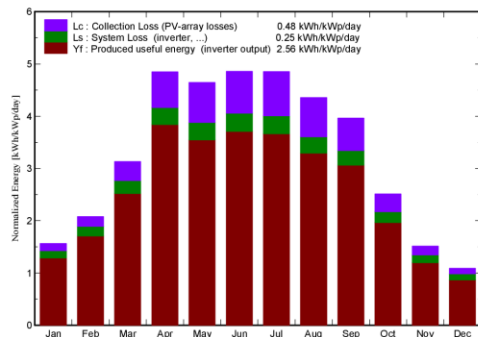
### Grid-Connected System: Main results

**Project :** Pilsen- Faculty of Electrical Engineering  
**Simulation variant :** Univerzitni 26, 306 14 Plzen

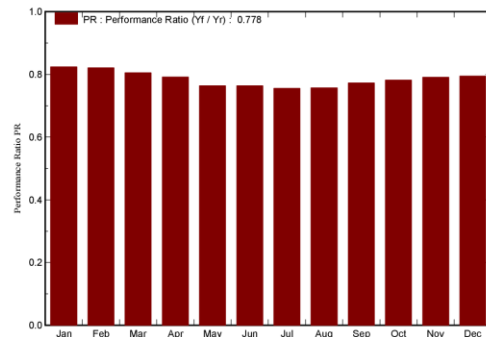
<b>Main system parameters</b>		<b>System type</b>	<b>Grid-Connected</b>
PV Field Orientation		tilt	45°
PV modules		Model	I_110/24
PV Array		Nb. of modules	192
Inverter		Model	SP 2500-450
Inverter pack		Nb. of units	8.0
User's needs		Unlimited load (grid)	
		azimuth	-10°
		Pnom	110 Wp
		Pnom total	<b>21.12 kWp</b>
		Pnom	2500 W ac
		Pnom total	<b>20.00 kW ac</b>

**Main simulation results**  
 System Production **Produced Energy 19.72 MWh/year** Specific prod. 934 kWh/kWp/year  
 Performance Ratio PR **77.79 %**

**Normalized productions (per installed kWp): Nominal power 21.12 kWp**



**Performance Ratio PR**



**Univerzitni 26, 306 14 Plzen**  
**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	24.6	14.19	-0.95	48.4	47.1	0.934	0.843	0.824
February	39.7	26.64	0.80	58.2	56.6	1.119	1.010	0.821
March	77.1	45.73	3.91	97.2	94.3	1.813	1.652	0.805
April	127.9	64.53	9.28	145.5	141.0	2.639	2.433	0.792
May	151.7	77.88	14.14	144.0	139.0	2.540	2.322	0.763
June	160.0	87.30	16.77	145.8	140.6	2.571	2.351	0.764
July	160.4	85.75	18.48	150.4	145.2	2.624	2.400	0.756
August	131.7	71.98	18.45	135.0	130.5	2.361	2.158	0.757
September	95.4	49.05	13.51	118.8	115.5	2.120	1.940	0.773
October	55.8	33.43	9.05	77.9	75.7	1.423	1.287	0.782
November	27.4	18.18	3.98	45.4	44.1	0.854	0.758	0.791
December	17.9	12.04	0.05	33.8	32.7	0.644	0.567	0.795
Year	1069.4	586.70	9.00	1200.4	1162.4	21.643	19.720	0.778

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

### Grid-Connected System: Loss diagram

**Project :** Pilsen- Faculty of Electrical Engineering  
**Simulation variant :** Univerzitni 26, 306 14 Plzen

<b>Main system parameters</b>	System type	<b>Grid-Connected</b>	
PV Field Orientation	tilt	45°	azimuth -10°
PV modules	Model	L_110/24	Pnom 110 Wp
PV Array	Nb. of modules	192	Pnom total <b>21.12 kWp</b>
Inverter	Model	SP 2500-450	Pnom 2500 W ac
Inverter pack	Nb. of units	8.0	Pnom total <b>20.00 kW ac</b>
User's needs	Unlimited load (grid)		

#### Loss diagram over the whole year

