

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektroenergetiky a ekologie**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Zhodnocení a optimalizace provozu FV elektrárny**

**Bc. Petr Trojáček**

**2018/2019**



## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na analýzu fotovoltaické elektrárny ve společnosti Daikin a předně na její produkci elektrické energie. Praktickému obsahu předcházejí teoretické informace z oblasti fotovoltaiky a jejího využití. Hlavním úkolem práce je analýza naměřených dat vyrobené energie a jejich porovnání s výpočtovými hodnotami. Z výsledků je pak odvozena návratnost fotovoltaické elektrárny a návrhy na optimalizaci.

## **Klíčová slova**

elektrická energie, fotovoltaika, modul, návrh, návratnost, optimalizace, sluneční záření, střídač, systém, termovizní měření, účinnost, zhodnocení

**Abstract**

This diploma thesis is focused on analysing of photovoltaic power plant in Daikin company and on its production of electric energy anteriorly. The practical content is preceded by theoretical information from the field of photovoltaics and its use. The main task of the thesis is to analyze the measured data of the produced energy and their comparison with calculated values. The results are then used to calculate the return of investment on photovoltaic power plant and suggestions for optimization.

**Key words**

efficiency, electrical energy, evaluation, inverter, modul, optimization, proposal, radiation, return on investment, solar photovoltaics, system, thermovision measurement

## 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 25.5.2019

Bc. Petr Trojáček

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Milanovi Bělíkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky, metodické vedení práce a poskytnutí potřebných dat. Dále bych rád poděkoval externímu konzultantovi Pavlovi Kadaněmu, DiS. za zprostředkování dat a informací o fotovoltaické elektrárně ve společnosti Daikin.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>7</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>10</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK</b> .....	<b>12</b>
<b>1 TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>14</b>
1.1 SLUNEČNÍ ZÁŘENÍ.....	14
1.1.1 Měření slunečního záření.....	14
1.2 FV ČLÁNEK.....	15
1.2.1 Přeměna sluneční energie na elektrickou.....	15
1.2.2 Výroba (polykrystalický článek).....	16
1.2.3 Texturování a antireflexní vrstva.....	16
1.2.4 Kontakty.....	17
1.2.5 STC podmínky.....	17
1.3 FV KOMPONENTY.....	18
1.3.1 FV modul.....	18
1.3.2 Střídače.....	23
<b>2 PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>24</b>
2.1 FVE-J.....	25
2.2 FVE-S.....	26
2.2.1 Měření sklonu panelů.....	26
2.3 FVE-Z.....	27
2.4 POUŽITÁ FV ZAŘÍZENÍ A MATERIÁLY.....	28
2.4.1 FV moduly.....	28
2.4.2 Střídače.....	29
2.4.3 Nosná konstrukce.....	30
2.4.4 Kabelové vedení.....	31
2.4.5 Elektroměr.....	32
2.5 VIZUÁLNÍ KONTROLA A TERMOVIZNÍ DIAGNOSTIKA.....	32
2.6 DATA VYROBENÉ ENERGIE.....	37
2.6.1 Záznam.....	37
2.6.2 Úprava a zhodnocení dat.....	38
2.7 POČETNÍ NÁVRH VÝROBY FV SYSTÉMŮ DAIKIN.....	40
2.7.1 Poloha slunce.....	40
2.7.2 Intenzita celkového záření.....	42
2.7.3 Dopadající energie na osluněnou plochu.....	45
2.7.4 Odhad produkce FVE-J.....	46
2.7.5 Porovnání naměřených a výpočtových hodnot.....	47
2.7.6 Zhodnocení výsledků.....	48
2.8 DATA SLUNEČNÍHO OSVITU.....	49
2.8.1 Zpracování a úprava dat.....	49
2.8.2 Dopadající energie na skloněnou plochu.....	50
2.8.3 Stanovení reálné účinnosti.....	52
2.8.4 Zhodnocení výsledků.....	55
2.9 EKONOMICKÁ NÁVRATNOST INVESTICE DO FVE.....	55
2.9.1 Výpočet návratnosti systému.....	57
2.10 MOŽNÉ ZPŮSOBY OPTIMALIZACE.....	58
2.10.1 Přeorientování panelů ze severní na jižní stranu.....	58
2.10.2 Koncepce FVE-Z.....	61
2.10.3 Systém pro vyhřívání FV článků.....	64
2.10.4 Údržba FV systému.....	67
2.10.5 Zhodnocení.....	67

<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>68</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>70</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH</b> .....	<b>1</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>2</b>



## Úvod

Předkládaná diplomová práce je primárně zaměřena na zhodnocení provozu fotovoltaické elektrárny ve společnosti Daikin Industries Czech republic s.r.o., která sídlí v Plzni na Borských polích. Odborný text je rozdělen ve dvou hlavních kapitolách, teoretické a praktické. Teoretická část obsahuje informace potřebné pro pochopení základní problematiky fotovoltaiky a údaje, které jsou podkladem pro postupy a závěry řešené v praktické části.

V praktické části je v první řadě představena samotná elektrárna společnosti Daikin, což zahrnuje popis jejího technického provedení, použitých zařízení, vizuální kontroly a poskytnutých dat stěžejních pro analýzu. Dále přecházím k vlastnímu početnímu návrhu odhadu výroby elektrické energie jednotlivých fotovoltaických systémů. Výsledky pak vzápětí porovnávám se skutečnou produkcí elektrické energie a také s výsledky programu PVGIS.

Další fází je porovnání produkce fotovoltaické elektrárny se skutečným denním osvitem za stejné uplynulé období a na základě výsledků stanovit účinnost celého konkrétního systému. Bylo tedy nutné provést úpravu vstupních meteorologických dat do tvaru, se kterým lze porovnávat vyrobenou elektrickou energii na výstupu systémů.

Poté se v práci zabývám určením návratnosti a možným výnosem fotovoltaické elektrárny. Závěr praktické části je věnován návrhu optimalizací stávajících systémů a výpočtu ekonomického zlepšení oproti dosavadnímu provedení. V závěru pak hodnotím dosažené výsledky a jejich přínos pro společnost Daikin.

## Seznam symbolů a zkratek

$\alpha$ .....	sklon modulů vůči vodorovné rovině (°)
$a$ .....	azimut normály modulu (°)
$a_s$ .....	azimut slunce (°)
$\delta$ .....	sluneční deklinace (°)
$\varepsilon$ .....	součinitel uvažující výšku slunce a nadmořskou výšku (-)
$\eta$ .....	účinnost (%)
$E$ .....	vyrobená elektrická energie (kWh)
$\varphi$ .....	zeměpisná šířka (°)
FVE .....	fotovoltaická elektrárna
FVE-J .....	fotovoltaická elektrárna orientovaná na jih
FVE-S .....	fotovoltaická elektrárna orientovaná na sever
FVE-Z .....	fotovoltaická elektrárna orientovaná na západ
$\gamma$ .....	úhel svírající dopadající paprsky a plochu modulu (°)
$h$ .....	výška slunce nad obzorem (°)
$H$ .....	nadmořská výška (m)
$I_0$ .....	sluneční konstanta ( $W/m^2$ )
$I$ .....	celková intenzita slunečního záření ( $W/m^2$ )
$I_D$ .....	intenzita difúzního slunečního záření ( $W/m^2$ )
$I_{DCmax}$ .....	maximální vstupní proud střídače (A)
$I_{Dh}$ .....	intenzita difúzního slunečního záření na plochu vodorovnou ( $W/m^2$ )
$I_{Dr}$ .....	intenzita slunečního záření odraženého od částic vzduchu ( $W/m^2$ )
$I_{Do}$ .....	intenzita slunečního záření reflexivního (odražené od okolí) ( $W/m^2$ )
$I_{hod}$ .....	intenzita slunečního záření platná pro danou hodinu ( $W/m^2$ )
$I_{MPP}$ .....	proud při jmenovitém výkonu (A)
$I_P$ .....	intenzita přímého slunečního záření ( $W/m^2$ )
$I_{Ph}$ .....	intenzita přímého slunečního záření na plochu vodorovnou ( $W/m^2$ )
$I_{Pn}$ .....	intenzita přímého slunečního záření na plochu kolmou k záření ( $W/m^2$ )
$I_{SC}$ .....	zkratový proud solárního pole (A)
MPP .....	maximum power point (bod maximálního výkonu)
MPPT .....	maximum power point tracker (sledovač bodu maximálního výkonu)
$n$ .....	počet
$P_{MPP}$ .....	jmenovitý výkon modulu (Wp)

PVGIS.....	Photovoltaic Geographical Information System
Q .....	dopadající sluneční energie (kWh/m <sup>2</sup> ) / (kWh)
Q <sub>D</sub> .....	dopadající sluneční energie z difúzního záření (kWh/m <sup>2</sup> )
Q <sub>P</sub> .....	dopadající sluneční energie z přímého záření (kWh/m <sup>2</sup> )
r.....	albedo – míra odrazivosti okolních ploch
SS.....	stejnoseměrný
STC.....	standardní testovací podmínky (standard test conditions)
STR.....	střídavý
S <sub>m</sub> .....	účinná plocha FV modulu (m <sup>2</sup> )
S <sub>G</sub> .....	účinná plocha FV generátoru (m <sup>2</sup> )
τ .....	poměrná doba slunečního svitu (-)
τ <sub>teor</sub> .....	teoretická doba slunečního svitu (h)
τ <sub>skut</sub> .....	skutečná doba slunečního svitu (h)
t .....	úhel určující pořadí dne v roce (°)
U <sub>OC</sub> .....	napětí naprázdno (V)
U <sub>DCmax</sub> .....	maximální vstupní napětí střídače (V)
U <sub>DCmin</sub> .....	minimální vstupní napětí střídače (V)
U <sub>MPP</sub> .....	napětí při jmenovitém výkonu (V)
Z.....	činitel znečištění atmosféry (-)

## Seznam obrázků a tabulek

### Obrázky

Obr. 1.1 - Struktura FV článku [2]

Obr. 1.2 - Kontaktní mřížka na přední straně FV článku (modulu FVE-J)

Obr. 1.3 - Struktura FV modulu [1]

Obr. 1.4 - V-A FV článku charakteristika při různé intenzitě slunečního záření

Obr. 1.5 - V-A FV článku charakteristika při různé teplotě

Obr. 1.6 - Graf definující optimální orientaci a sklon FVE [1]

Obr. 1.7 - Graf definující optimální orientaci a sklon FVE [2]

Obr. 2.1 - Areál společnosti Daikin

Obr. 2.2 - FVE orientovaná na jih

Obr. 2.3 - FVE orientovaná na sever

Obr. 2.4 - Sklon modulů FVE-S

Obr. 2.5 - FVE orientovaná na západ

Obr. 2.6 - Střídače Fronius Symo 3.0 (vlevo) a IG Plus 80-3 (vpravo) v Daikinu

Obr. 2.7 - Nosná konstrukce FVE-Z (vlevo) a FVE-J+S (vpravo)

Obr. 2.8 - Solární kabel [13]

Obr. 2.9 - Elektroměr značky Neris

Obr. 2.10 - Izolace stejnosměrného vedení

Obr. 2.11 - Ptačí exkrementy zakrývající FV články (FVE-J)

Obr. 2.12 - Ptačí exkrementy zakrývající FV články (FVE-S)

Obr. 2.13 - Ptačí exkrementy na FVE-J

Obr. 2.14 - Ptačí exkrementy na FVE-J

Obr. 2.15 - Segmentová porucha na modulu FVE-Z

Obr. 2.16 - Segmentová porucha na modulu FVE-J

Obr. 2.17 - Segmentová porucha na modulu FVE-J

Obr. 2.18 - Termovizní snímek jednoho bloku FVE-Z

Obr. 2.19 - Porovnání produkce FVE v Daikinu za rok 2017

- Obr. 2.20 - Porovnání získaných hodnot vyrobené elektrické energie
- Obr. 2.21 - Stanovení účinnosti FV systému
- Obr. 2.22 - Přesunutí modulů
- Obr. 2.23 - Schéma zapojení FV modulů FVE-Z
- Obr. 2.24 - Konfigurace modulových střídačů
- Obr. 2.25 - Konfigurace centrálního střídače + výkonové optimizéry
- Obr. 2.26 - Ekvivalentní obvod FV článku ve standardním režimu [25]
- Obr. 2.27 - Ekvivalentní obvod solárního článku v režimu vyhřívání [25]
- Obr. 2.28 - Vyhřívání skrze NiCr [25]

#### Tabulky

- Tab. 2.1 - Parametry FV panelu ZXP6-60-240Wp [11]
- Tab. 2.2 - Parametry střídačů Fronius IG Plus 80-3 a SYMO 3.0 [12]
- Tab. 2.3 - Záznam hodnot elektrické práce softwarem ProCop
- Tab. 2.4 - Vyrobená energie v jednotlivých elektrárnách za rok 2017
- Tab. 2.5 - Parametry FVE-J
- Tab. 2.6 - Parametry udávající pozici slunce v jednotlivých měsících
- Tab. 2.7 - Činitel znečištění atmosféry Z
- Tab. 2.8 - Dopadající energie na skloněnou plochu FVE-J
- Tab. 2.9 - Porovnání vypočtené a naměřené produkce FVE Daikin
- Tab. 2.10 - Měřená intenzita slunečního záření s průměrem za uplynulou hodinu
- Tab. 2.11 - Intenzita a skutečná dopadající energie na vodorovnou plochu za rok 2017
- Tab. 2.12 - Dopadající energie kolmo na skloněné moduly a FVE-J pro rok 2016
- Tab. 2.13 - Účinná plocha FV generátorů FVE-J
- Tab. 2.14 - Dopadající energie na účinnou plochu systémů v roce 2016
- Tab. 2.15 - Účinnost systémů FVE-S, FVE-J a FVE-Z v roce 2016
- Tab. 2.16 - Tabulka uspořené financí za nenakoupenou energii pro rok 2017
- Tab. 2.17 - Uspořené finance
- Tab. 2.18 - Tabulka zlepšení produkce po přeorientování 20ti modulů ze severu na jih
- Tab. 2.19 - Tabulka zvýšení výnosu po přeorientování 20ti modulů z severu na jih

# 1 Teoretická část

## 1.1 Sluneční záření

Sluneční záření je z hlediska života na Zemi nepostradatelnou formou energie. Vzhledem k délce života Slunce lze považovat zdroje na bázi slunečního záření za obnovitelné. Pod pojmem sluneční záření si můžeme představit výkon dopadající na jednotku plochy, proto jednotky  $\text{W/m}^2$ . Intenzita slunečního záření se mění v průběhu roku v závislosti na vzdálenosti mezi Sluncem a Zemí, ale pro výpočty se uvažuje stálá hodnota platná pro hranici atmosféry, označována jako solární konstanta, která činí  $1365 \text{ W/m}^2$ . Při průchodu atmosférou se tato hodnota snižuje na hodnotu přibližně  $1000 \text{ W/m}^2$ , které lze dosáhnout v poledne za ideálních klimatických podmínek. Příčinou tohoto snížení je odraz od povrchu Země, absorpce plyny (ozón, kyslík, oxid uhličitý), ale také rozptyl částicemi prachu nebo molekulami vzduchu. Výjimečně může dojít ke špičkovému osvětlení  $1400 \text{ W/m}^2$ , kdy při mírně zamračených a slunných dnech dochází k odrazům od táhnoucích se mraků. Ze součtu hodnot intenzit slunečního záření za určitý časový úsek, např. hodinu, získáme energii ve  $\text{Wh/m}^2$ , která je na rozdíl od slunečního záření velmi rozdílná pro různé oblasti. Příkladem může být rozdíl mezi energetickým potenciálem České republiky a Rakouska. V ČR dopadne maximálně za rok cca  $1100 \text{ kWh/m}^2$ , zatímco v Rakousku energetický potenciál na této hranici ČR začíná. Sluneční záření lze rozdělit na přímé a difúzní, jejichž podíl z celkové záření slunečního záření je dán stavem oblačnosti a výškou slunce nad obzorem [1, 2].

- Přímé sluneční záření dopadá směrem od Slunce přímo na osluněnou plochu bez rozptylu v atmosféře. Jeho intenzita je závislá na úhlu dopadu paprsků.
- Difúzní sluneční záření nemá na rozdíl od přímého žádný směr vlivem rozptylu v atmosféře, označujeme ho tedy izotropické (všesměrové).

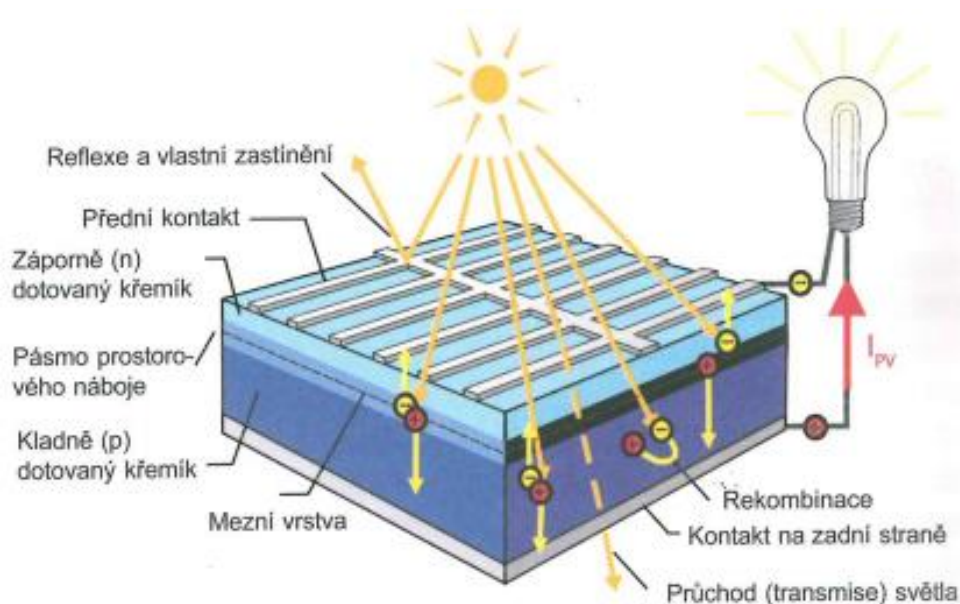
### 1.1.1 Měření slunečního záření

Pro měření slunečního záření se používá přístroj zvaný pyranometr nebo též solarimetr. Jeho princip je založený na termoelektrickém jevu, kdy diferenční termočlánek porovnává teplotu dvou povrchů, z nichž jeden absorbuje dopadající záření a druhý ho nepohlcuje. Některé přístroje pracují na bázi fotoelektrického jevu [29].

## 1.2 FV článek

### 1.2.1 Přeměna sluneční energie na elektrickou

Přeměnou sluneční energie na elektrickou se zabývá obor fotovoltaika. Tuto transformaci energie zajišťuje FV článek na principu fotoelektrického jevu, který probíhá bez hluku, spotřeby látek v aktivním materiálu a také bez emisí. Nejčastěji používaný materiál pro výrobu FV článků je krystalický křemík, jenž má z hlediska pásové struktury polovodičový charakter a může se tak stát vodivým po přívodu energie. Aby se dosáhlo cílené funkce fotoelektrického jevu, je třeba do velmi čistého křemíku se stabilní krystalovou vrstvou přidat dotované atomy. Dotovanými atomy jsou atomy fosforu a boru. Atomy fosforu obsahují jeden elektron navíc oproti křemíku, zatímco bor má navíc jednu díru (o elektron méně). Tyto přebytečné elektrony, resp. díry, způsobují v materiálu příměsovou vodivost. Spojíme-li polovodičový materiál typu N (dotování fosforem) a P (dotování borem), vytvoříme tak PN přechod, díky němuž získá příměsová vodivost směr, jelikož dochází k difúzi přebytečných elektronů z materiálu typu N do typu P. Tento jev však trvá jen dočasně kvůli orientaci vzniklého elektrického pole proti pohybu nosičů náboje. Pokud ale na polovodič s PN přechodem začne dopadat sluneční záření (fotony), mohou být elektrony díky přísunu energie uvolněny z elektronových vazeb v atomové mřížce a přitahovány elektrickým polem do oblasti N. Naopak do oblasti P se přesouvají vzniklé díry. Při aplikaci elektrod na polovodič můžeme na FV článku naměřit napětí, jelikož nosiče náboje difundují až k elektrodám. Připojíme-li na obvod zátěž, začne protékat proud [1, 2].



Obr. 1.1 Struktura FV článku [2]

### 1.2.2 Výroba (polykrystalický článek)

Křemík je po kyslíku druhý nejrozšířenější prvek na Zemi a jeho zásoby jsou téměř neomezené. V přírodě se však vyskytuje jenom ve formě křemene nebo písku jako chemická sloučenina s kyslíkem. Pro fotovoltaický průmysl je ale zapotřebí dosáhnout u křemíku stupně procentuální čistoty alespoň 8 N, kdy N označuje počet devítek (99,999999 %). Toho se docílí řadou chemických procesů, jejichž výstupem je polykrystalický křemík, též označovaný jako polykřemík. Při výrobě polykrystalického článku, se vysokou teplotou (1600 °C) rozpuštěný polykřemík nejdříve dotuje bórem a poté se nechá vytvořit litý blok o rozměrech 40 x 40 cm a výšce 30 cm vychladnutím v kvádrové formě. Při tomto tuhnutí vznikají homogenní krystaly, typické pro polykrystalické články. Litý křemíkový blok, nebo také ingot, se následně řeže pásovými pilami na tyče a ty pak drátovými pilami na destičky tloušťky 0,16 až 0,24 mm. Pak už jen zbývá vyrobené plátky očistit, dotovat fosforem a nanést antireflexní vrstvu. Pro generování napětí na článku je ještě třeba přidat elektrické kontakty. Napětí naprázdno bývá u polykrystalických článků mezi 0,6 až 0,7 V. Účinnost takových článků se pohybuje v rozmezí 13 až 17,1 %. Při fotoelektrickém jevu může na PN přechodu docházet k rekombinaci nosičů, což představuje svázání volného elektronu s atomem s chybějícím elektronem. Oproti monokrystalickým článkům je účinnost u polykrystalických článků o trochu nižší právě vlivem zvýšené rekombinace nosičů na mezích zmíněných homogenních krystalů. Nicméně jejich výroba je jednodušší, levnější a odpad při řezání je menší než u monokrystalických [1, 2].

### 1.2.3 Texturování a antireflexní vrstva

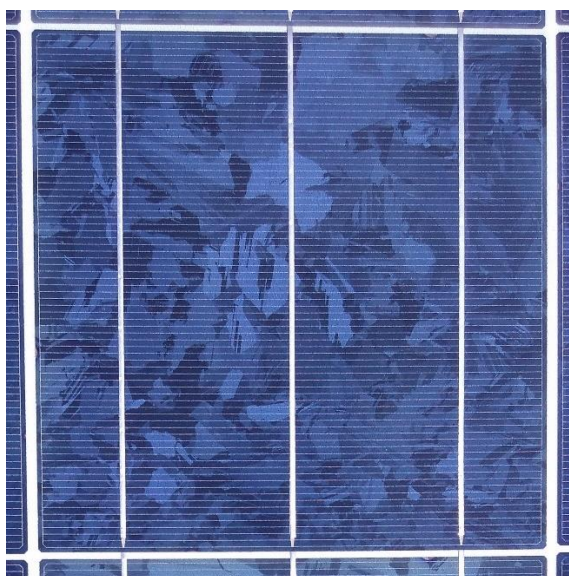
Z hlediska požadavků na minimalizaci odrazivosti a zlepšení spektrální citlivosti je nezbytné vytvořit na povrchu článku mikroskopicky malé struktury ve tvaru inverzních pyramid, které zajišťují malé ztráty odrazem. Pro polykrystalické články se používá metoda s kyselým texturováním a je možné tak dosáhnout o 0,5 % vyšší účinnosti.

Na článek se též nanáší antireflexní vrstva z nitridu křemičitého, který jednak snižuje ztráty odrazem, a také funguje jako pasivace pro krystalové defekty, tj. zabraňuje rekombinaci nosičů náboje. Tloušťkou vrstvy lze modifikovat barevný odstín článků, z hlediska výnosnosti je však u polykrystalických článků nejžádanější modré zbarvení [1].



### 1.2.4 Kontakty

Aby mohl FV článek generovat proud, je třeba jej pomocí elektrických kontaktů zařadit do elektrického obvodu. Na přední straně FV článku, na kterou dopadají sluneční paprsky, je požadavek co nejmenšího zastínění, proto se na čelní část FV článku umísťuje jemná kovová mřížka. Mřížka se skládá z kontaktních plošek širokých zhruba 0,1 až 0,2 mm a ze dvou nebo tří sběrnic o tloušťce 1,5 až 2,5 mm přes ně probíhající. Na *Obr. 1.2* je zobrazený FV článek modulů, které jsou součástí FV elektrárny ve společnosti Daikin. Zadní kontakty nemusejí být na rozdíl od čelních průhledné (využívá se např. při integraci do budov). Pro udržení vysoké účinnosti se většinou na celou plochu tisknou sítotiskové kontakty se šířkou 2,5 až 6 mm [1].



*Obr. 1.2 Kontaktní mřížka na přední straně FV článku (modulu FVE-J)*

### 1.2.5 STC podmínky

STC podmínky (angl.: standard-test-condition) definují, při jakých podmínkách platí elektrické parametry FV článků. Slouží k porovnání různých typů FV článků. Těmito podmínkami jsou:

- Intenzita slunečního záření  $I = 1000 \text{ W/m}^2$  dopadající na kolmou plochu FV článku
- Teplota článku  $T_C = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$
- Definované spektrum světla s AM (Air Mass) = 1,5

Veličina AM značí hmotnost vzduchu, kterou musí sluneční paprsek projít mezi vstupem do atmosféry a dosažením fotovoltaického pole. Stejně jako intenzita slunečního záření a teplota, se i tato veličina mění v průběhu dne a v závislosti na umístění projektu [1].

## 1.3 FV komponenty

Mezi komponenty FVE, která spotřebovává vyrobenou elektrickou energii na místě bez využití akumulace a také je připojena k distribuční síti, patří:

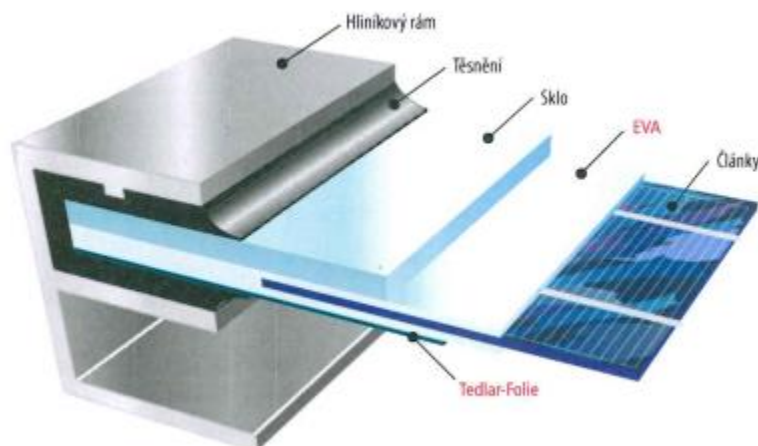
- FV generátor (více FV modulů)
- Rozvaděč generátoru
- Stejnoseměrná kabeláž
- Hlavní DC vypínač
- Střídač
- Střídavá kabeláž
- Elektroměřová skříň s rozvodem a domovní přípojka

Pro účely této diplomové práce se budu zabývat blíže popisem pouze hlavních komponentů, tedy FV modulu a střídače [1].

### 1.3.1 FV modul

#### 1.3.1.1 Konstrukce

FV modul se skládá z většího počtu FV článků zapojených v sérii. Celkový počet článků, většinou 36 až 72 v jednom modulu, je rozdělen ve 4 až 6 řadách, označovaných též řetězce. Kvůli ochraně před klimatickými faktory působícími na moduly (např. vítr, déšť, kroupy, vlhkost) se FV články zapouzdřují do tzv. bílého skla, které má nízký obsah oxidu železa, pro vysokou propustnost slunečního záření. Jelikož je modul během své činnosti vystavován vysokému tepelnému namáhání, je třeba jej vybavit předpjatým bílým sklem. Takové sklo se pak nazývá solární a dosahuje až 96 % propustnosti. Pro oboustranné zapouzdření FV článků se používá materiál etylen-vinyl-acetát (EVA), který je průhledný a články elektricky izoluje. Pro modulové rámy se s velkou výhodou využívá hliník. Je vhodný z hlediska snadné montáže, zlepšení statiky modulů a také chrání citlivé hrany skla. Hrana rámu by neměla vrhat stín na FV článek. Těsnění mezi hliníkovým rámem a sklem je zajištěno pomocí silikonu nebo gumy [1, 2].

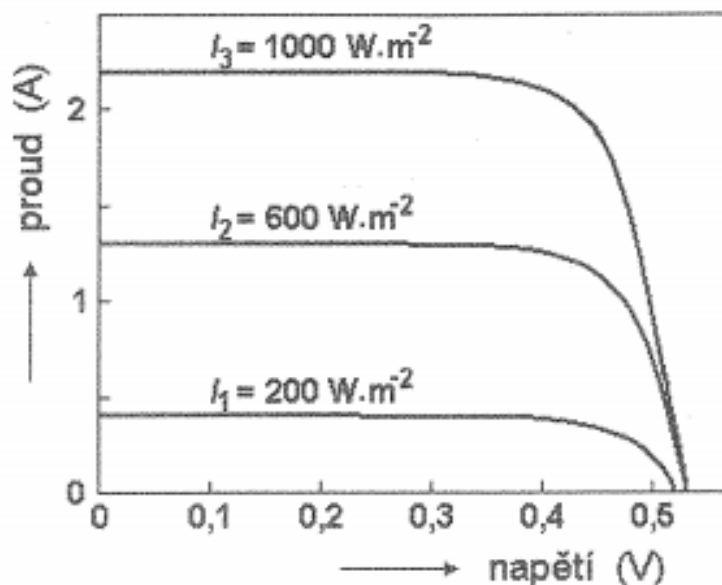


Obr. 1.3 Struktura FV modulu [1]

### 1.3.1.2 Závislost V-A charakteristiky na intenzitě slunečního záření a teplotě

V-A charakteristika vykazuje jmenovité hodnoty proudu a napětí pouze za předpokladu STC podmínek. V reálných podmínkách, kdy se ozáření i teplota během dne mohou značně měnit, dochází k viditelným změnám výkonu na V-A charakteristice.

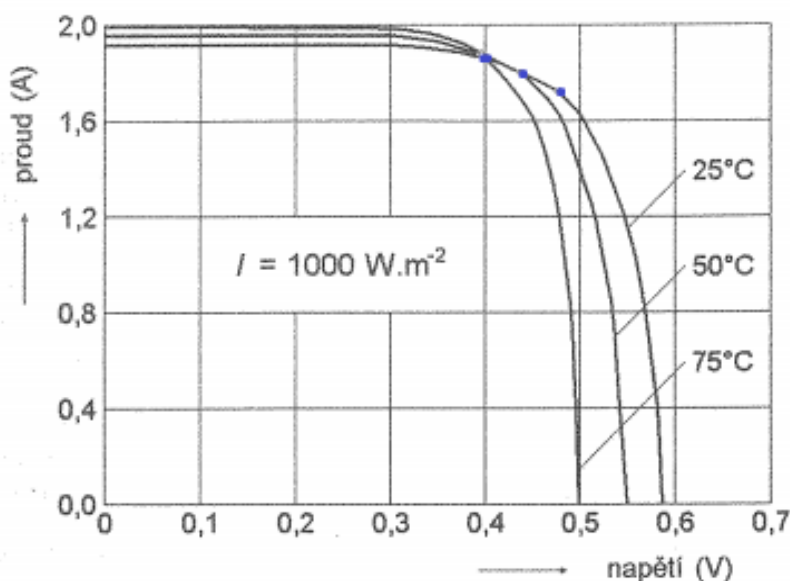
Velikost proudu je přímo úměrná intenzitě slunečního záření. Na obrázku *Obr. 1.4* lze vidět, že při poklesu intenzity slunečního záření zhruba na polovinu, klesne ve stejné míře i proud. Napětí se sice mění v případě modulu maximálně o 5 V, ale při sériovém spojení modulů, kdy se napětí sčítá, může dojít ke změnám až o 50 V.



Obr. 1.4 V-A charakteristika FV článku při různé intenzitě slunečního záření [6]

Větší napěťové změny lze zaznamenat při změně teploty, viz *Obr. 1.5*. Takové změny napětí mohou být u více zapojených modulů v sérii až 100 V, a při takových změnách může dojít k narušení napěťové pevnosti dalších prostředků v systému. Při změně teploty dochází jen k malým změnám proudu. [1]

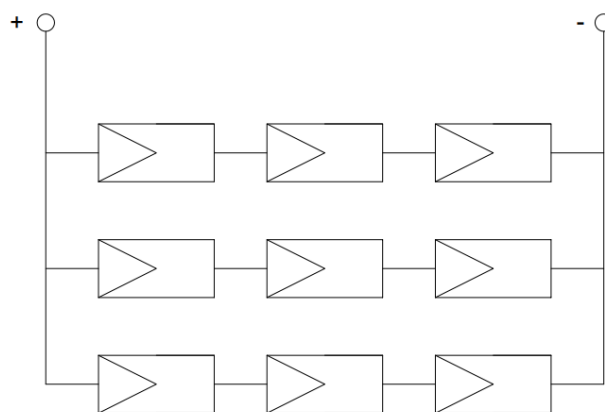
Na štítkách FV modulů je uveden maximální výkon  $P_{MPP}$ , který je dán součinem  $U_{MPP}$  a  $I_{MPP}$  a na V-A charakteristice bývá označen jako MPP. Tento bod je též závislý na velikosti ozáření a teplotě, na obrázku *Obr. 1.6* lze změnu bodu pozorovat v ohybu křivek [2].



*Obr. 1.5* V-A charakteristika FV článku při různé teplotě [6]

### 1.3.1.3 Zapojení FV modulů

Více sériově (resp. paralelně) pospojovaných FV modulů tvoří FV generátor. FV generátor může tvořit i jediný FV modul, zpravidla je to však označení pro větší počet FV modulů. Z hlediska snížení výkonových ztrát je vhodné zapojovat moduly stejného typu a ideálně i se stejným sklonem a orientací. Na obrázku *Obr. 1.6* je schéma klasického rozložení FV modulů ve FV generátoru. Výsledné napětí jednoho řetězce modulů (anglicky string) je dáno součtem napětí na jednotlivých FV modulech, proud zůstává konstantní. Při paralelním spojení je naopak napětí konstantní a sčítají se proudy z jednotlivých FV modulů, resp. stringů.



Obr. 1.6 - Typické sérioparalelní zapojení modulů [1]

Tyto výsledné údaje napětí a proudu FV generátoru je třeba brát v potaz kvůli vstupním parametrům střídače, jako jsou maximální a minimální vstupní napětí, a také maximální vstupní proud. Při projektování se tedy definuje maximální a minimální počet modulů v jednom stringu. Maximální počet modulů je stanoven dle rovnice (1.1), který představuje poměr maximálního vstupního napětí střídače ku napětí naprázdno při teplotě  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Takové napětí nebývá na štítcích modulů uvedeno, proto se uvažuje, že napětí naprázdno při teplotě  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  se zvýší o 13 % vzhledem k napětí naprázdno při STC podmínkách [1, 2].

$$n_{max} = \frac{U_{DC\ max}}{1,13 \cdot U_{0C}} \quad (-) \quad (1.1)$$

Minimální počet modulů ve stringu je stanoven dle rovnice (1.2), zde vycházíme z minimálního vstupního napětí střídače a napětí při teplotě  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Obecně se takové napětí určí poklesem o 20 % vůči jmenovitému napětí při STC podmínkách.

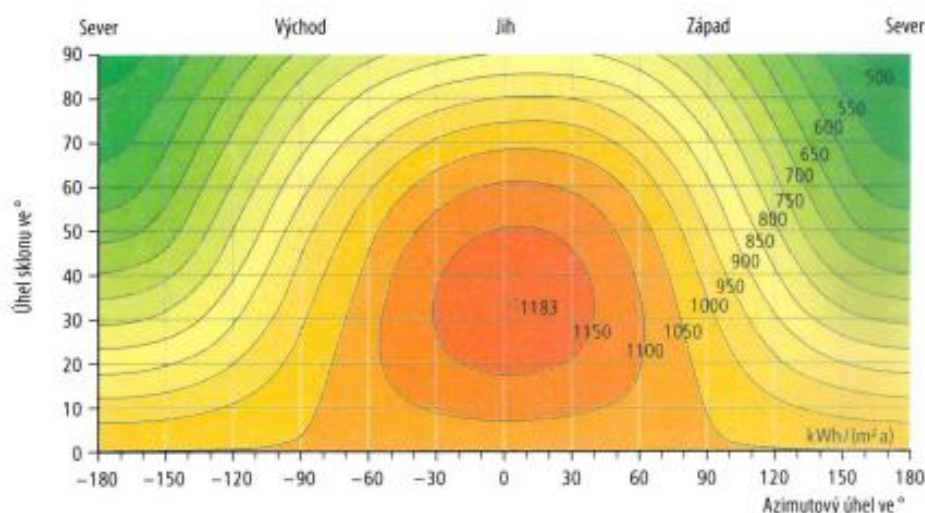
$$n_{min} = \frac{U_{DC\ min}}{0,8 \cdot U_{mpp}} \quad (-) \quad (1.2)$$

Na závěr se určuje počet stringů, který je dán maximálním proudem modulu (proud je na stringu i s více moduly konstantní) a maximálním vstupním proudem střídače dle rovnice (1.3). Maximálním proudem modulu je stanoven jmenovitý proud vynásobený konstantou 1,25, která zahrnuje možnou nárazovou intenzitu slunečního záření nad  $1000\text{ W/m}^2$ .

$$n_{string} = \frac{I_{DC\ max}}{1,25 \cdot I_{mpp}} \quad (-) \quad (1.3)$$

### 1.3.1.4 Orientace a sklon

Pro určení množství dopadající energie na určitý modul slouží diagramy ozáření (Obr. 1.7). Dopadající energie je v těchto diagramech definována azimutem a sklonem modulů. Při orientaci modulu na jižní světovou stranu je azimut roven  $0^\circ$ , hodnoty azimutu jsou v rozmezí od  $-180^\circ$  do  $180^\circ$ , přičemž záporným hodnotám odpovídá orientace k východu a kladným hodnotám orientace k západu. V našich podmínkách je pro největší energetický zisk udávána orientace FV modulů na jih se sklonem  $35^\circ$ . Při odchýlení FV modulů od jihu kolem  $\pm 45^\circ$  dochází k přijatelné ztrátě ročního výnosu o 5 %, až při odchýlení o  $\pm 70^\circ$  je výnos snížený o 10 %. Na vodorovných střeších administrativních budov či výrobních hal bývají panely umístěny i paralelně k vodorovné střeše, i při nulové sklonu se ztráty na výnosu pohybují do 15 % oproti optimálnímu sklonu. V takovém případě je ale třeba počítat s údržbou FV modulů, jelikož odpadá samočistící schopnost [2, 7, 8, 9].



Obr. 1.7 Graf definující optimální orientaci a sklon FVE [2]

### 1.3.1.5 Účinnost

FV modul se skládá z většího počtu FV článků s danou účinností. Účinnost FV modulu je nicméně nižší vlivem různých parametrů. Velkou roli hraje využití plochy FV modulu FV články a použité krycí sklo. Dále pak může být účinnost snížena teplotou, znečištěním a kosinovým ztrátami (ztráty způsobené šikmým dopadem slunečního záření) [1].

### 1.3.2 Střídače

Vyrobená elektrická energie ze solárního systému je stejnosměrného charakteru. Z tohoto důvodu do FV systému patří i měnič napětí, který mění stejnosměrné napětí na střídavé, použitelné pro střídavé spotřebiče a střídavou rozvodnou síť. Ve střídačích, nebo také invertorech, v dnešní době probíhá přeměna energie s nepatrnými ztrátami. Mezi hlavní funkce střídače patří:

- Přeměna SS proudu na STŘ proud
- Přizpůsobení se na MPP bod FV generátoru (MPP tracker)
- Sběr provozních dat
- Bezpečnostní prvky
- Ochrana sítě

Střídače bývají vybaveny zařízením zvaným MPP tracker (MPPT), které sleduje pracovní bod MPP FV modulu a snaží se mu přizpůsobit tak, aby stále pracoval v oblasti maximálního výkonu [1, 20].

#### 1.3.2.1 Účinnost přeměny $\eta_{UM}$

Účinnost přeměny střídače zahrnuje ztráty transformátorem, výkonovým spínačem, filtrem, vlastní spotřebou na řízení, regulaci a sběrem provozních dat. Hlavním parametrem udávajícím účinnost přeměny je vstupní výkon [1].

$$\eta_{UM} = \frac{P_{AC} \text{ činný výstupní výkon}}{P_{DC} \text{ činný vstupní výkon}} \quad (-) \quad (1.4)$$

#### 1.3.2.2 Účinnost přizpůsobení $\eta_{AN}$

Moderní střídače díky zařízení na sledování pracovního bodu MPP FV generátoru (pomocí MPP-trackerů) mohou reagovat na jeho změny vlivem rozdílného slunečního záření. Účinnost přizpůsobení pracovního bodu střídače pracovnímu bodu FV generátoru je dána vztahem [1]:

$$\eta_{AN} = \frac{P_{DC} \text{ okamžitý činný výstupní výkon}}{P_{PV} \text{ maximální okamžitý výkon generátoru}} \quad (-) \quad (1.5)$$

### 1.3.2.3 Statický stupeň účinnosti $\eta_{AN}$

Tato účinnost je dána součinem předchozích dvou účinností, účinnosti přeměny a účinnosti přizpůsobení [1].

$$\eta_{AN} = \eta_{UM} \cdot \eta_{AN} (-) \quad (1.6)$$

### 1.3.2.4 Evropská účinnost $\eta_{Euro}$

Evropská účinnost vznikla kvůli požadavku na možnost porovnání různých střídačů. Pro stanovení takové účinnosti bylo třeba vzít v potaz, že účinnost střídače se mění v závislosti na vstupním výkonu, který se mění s intenzitou slunečního záření na FV generátor. Následující vztah (1.7) tedy představuje průměrnou účinnost zohledňující výkonové úrovně dodávané FV generátorem. Účinnost při jmenovitém výkonu ( $\eta_{100\%}$ ) je dosažena zhruba ve 20% provozní doby. S účinností při polovičním jmenovitém výkonu se pracuje při 48% provozní doby. Obdobně jsou určeny i další případy.

$$\eta_{Euro} = \eta_{5\%} \cdot 0,03 + \eta_{10\%} \cdot 0,06 + \eta_{20\%} \cdot 0,13 + \eta_{30\%} \cdot 0,1 + \quad (1.7)$$
$$+ \eta_{50\%} \cdot 0,48 + \eta_{100\%} \cdot 0,2 (-)$$

Současné střídače pracují s euroúčinností mezi 92 % až 98,5 %. Vedle zmíněného slunečního záření má na účinnost střídače vliv také teplota v okolí střídače a vstupní napětí [1].

## 2 Praktická část

Fotovoltaická elektrárna, která je předmětem mé diplomové práce, se nachází v areálu společnosti Daikin Industries Czech Republic s.r.o. (dále jen Daikin). Plzeňská pobočka, sídlící na adrese U Nové hospody 1155/1, Skvrňany, je zaměřena na vývoj a výrobu klimatizačních jednotek pro domácnosti. Založena byla již roku 2003, kdy se postavila hlavní budova pro výrobu jednotek. Roku 2012 se společnost rozrostla o budovu vývojového oddělení. Na střeších zmíněných budov se nachází mnou hodnocené FVE. První záměr výstavby FVE byl probírán v únoru roku 2013, technická dokumentace projektu FVE pak byla vydána k měsíci listopadu v roce 2013. Montáž systému provedla firma WNE-CZ s.r.o.



a uvedla jej do provozu v září roku 2014. Účelem stavby byla výroba elektrické energie ze sluneční energie, která bude spotřebovávána na místě a přebytky budou prodávány do distribuční sítě ČEZ. Vzhledem k tomu, že elektrická energie z FVE pokrývá pouhý zlomek z celkové spotřeby společnosti Daikin, je veškerá energie spotřebována na místě. V roce 2017 byla postavena další FVE na střeše parkoviště, ta ale již není obsahem této práce. Rozdělení FVE dle provedení a umístění je uvedeno v následujících odstavcích [5].



Obr. 2.1 Areál společnosti Daikin

## 2.1 FVE-J

Jedná se o největší a zároveň nejvýkonnější fotovoltaickou elektrárnu (Obr. 2.2). Skládá se z 60ti FV modulů umístěných na budově vývojového centra, orientovaných na jižní světovou stranu s odklonem  $2^\circ$  na západ. Sklon modulů od vodorovné plochy je dle technické dokumentace  $18^\circ$ . Celkový výkon je dán součinem počtu modulů a jejich jmenovitým výkonem dle rovnice (2.1). Přeměnu stejnosměrné energie na střídavou obstarávají dva totožné střídače, na každý z nich je vedena energie z 30ti FV modulů [5].

$$P_{FVJ} = n_{\text{modulů}} \cdot P_{\text{modulu}} = 60 \cdot 240 = 14400 \text{ (Wp)} \quad (2.1)$$



Obr. 2.2 FVE orientovaná na jih

## 2.2 FVE-S

Souběžně s FVE-J je postavena nejmenší FVE orientovaná na sever. Oproti FVE-J je pootočená o  $180^\circ$ , azimut tedy činí  $-178^\circ$ . Tvoří ji 20 FV modulů a jejich sklon byl změřen na  $56^\circ$ . Dle vztahu v rovnici (2.1) je celkový výkon 4,8 kWp [5].



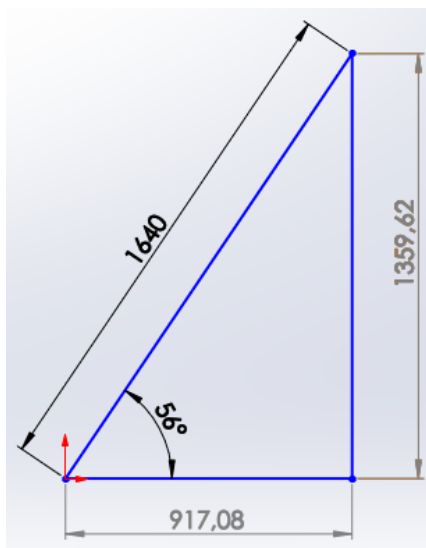
Obr. 2.3 FVE orientovaná na sever

### 2.2.1 Měření sklonu panelů

Na rozdíl od předchozí FVE-J, nebyl sklon panelů u FVE-S v technické dokumentaci uveden. Proto bylo třeba sklon panelů manuálně změřit. Na obrázku *Obr. 2.4* je známá pouze černě označená kóta, kterou je délka modulu včetně rámu. Zbývající dvě šedě označené kóty

bylo třeba přibližně změřit, a poté dle rovnice (2.2) určit hledaný úhel. Stejný postup bylo třeba aplikovat i na systém FVE-Z, jejichž rozměry jsou zobrazeny v příloze 12.

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{\text{protilehlá strana}}{\text{přepona}}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{1359,62}{1640}\right) = 56^\circ \quad (2.2)$$



Obr. 2.4 Sklon modulů FVE-S

## 2.3 FVE-Z

Vzhledově nejzajímavější elektrárnou je systém umístěný na budově výrobní haly orientovaný na západ, azimut normály modulů je roven  $92^\circ$ . Systém se skládá z celkem 40ti FV modulů, přičemž moduly se nachází na třech blocích plexisklového krytu ve čtyřech různých sklonech (pro názornost viz schéma v příloze 15). Čtyři nejvýše umístěné moduly mají sklon  $20^\circ$ , zbytek je ve třech různě skloněných řadách po 12ti modulech, sklony jsem změřil a vypočítal jako  $25^\circ$ ,  $65^\circ$  a  $90^\circ$ . Celkový výkon je 9,6 kWp [5].



Obr. 2.5 FVE orientovaná na západ

## 2.4 Použitá FV zařízení a materiály

### 2.4.1 FV moduly

Pro přeměnu sluneční energie na elektrickou byly na všechny elektrárny použity panely ZXP6-60-240/P. Jedná se o polykrystalické panely od společnosti ZNSHINESOLAR, jež jsou složeny z 60ti FV článků s rozměry 156 x 156 mm a rozměry samotného modulu (včetně rámu) tedy činí 1640 x 992 x 40 mm. Rám tvoří hliníková slitina. Hmotnost jednoho modulu je 19,5 kg. Důležitou informací je garance výkonu panelu, po dobu prvních deseti provozu je garantováno, že výkon panelu neklesne pod 90 % jmenovitého výkonu a po dalších 15 let pod 80 %. Elektrické parametry jsou shrnuty v tabulce *Tab. 2.1* [5, 11].

ZXP6-60-240/P	
jmenovitý výkon $P_{\max}$	240 Wp
tolerance výstupního výkonu $P_{\max}$	0 ~ +3 %
maximální napětí $U_{\text{mpp}}$	29.75 V
maximální proud $I_{\text{mpp}}$	8.07 A
napětí naprázdno $U_{\text{oc}}$	37.55 V
proud nakrátko $I_{\text{sc}}$	8.47 A
účinnost modulu $\eta_{\text{m}}$	14.75 %
účinnost článku $\eta_{\text{c}}$	16.64 %
pracovní teplota článků $T_{\text{c}}$	45 °C
maximální systémové napětí $U_{\text{s}}$	1000 V DC
maximální sériové jistění	15 A

Tab. 2.1 Parametry FV modulu ZXP6-60-240/P [11]

## 2.4.2 Střídače

FV moduly vyrábí stejnosměrné napětí, které je třeba převést střídači na napětí vhodné pro stávající elektroinstalaci, tedy střídavé. Celkem jsou v provozu čtyři střídače. Dva střídače s vysokofrekvenčním transformátorem FRONIUS IG Plus 80 V-3 jsou připojeny k FVE-J a jeden beztransformátorový střídač FRONIUS SYMO 3.0-3-S je připojen k FVE-S. Uvedené střídače jsou umístěny společně v technologické místnosti v prvním patře budovy vývojového oddělení, která splňuje požadavky na umístění střídačů, a těmi jsou rozpětí teplot, vlhkost, nízká prašnost a také blízké umístění k FV generátoru pro snížení nákladů na vedení stejnosměrného proudu. Čtvrtý střídač, také FRONIUS IG PLUS 80 V-3, je připojený k FVE-Z a je umístěný v přízemí výrobní haly. Přesné parametry střídačů značky FRONIUS jsou uvedeny v tabulce *Tab. 2.2* [5, 12].

Vstupní údaje DC		
Parametr	IG Plus 80 V-3	SYMO 3.0-3-S
maximální DC výkon při $\cos\varphi = 1$ $P_{DC\ max}$	7 360 W	6000 W
maximální vstupní proud $I_{DC\ max}$	32 A	16 A
maximální zkratový proud pole panelů $I_{SC}$	48 A	24 A
minimální vstupní napětí $U_{DC\ min}$	230 V	150 V
startovací napětí dodávky $U_{DC\ start}$	260 V	200 V
jmenovité vstupní napětí $U_{DC,r}$	370 V	595 V
maximální vstupní napětí $U_{DC\ max}$	600 V	1000 V
rozsah napětí MPP $U_{MPP\ min} - U_{MPP\ max}$	230 - 500 V	200 - 800 V
počet DC přípojek	6	3
počet MPP trackerů	1	1
Výstupní údaje AC		
jmenovitý AC výkon $P_{AC,r}$	7000 W	3000 W
maximální výstupní výkon $P_{AC\ max}$	7000 VA	3000 VA
maximální výstupní proud $I_{AC\ max}$	10.2 A	9.0 A
síťové připojení $U_{AC,r}$	3-NPE 400/230 V	
frekvence $f_r$	50-60 Hz	
rozsah frekvence $f_{min} - f_{max}$	45-65 Hz	
činitel zkreslení	< 3 %	
účinnost $\cos\varphi_{AC,r}$	0.7 - 1 ind./cap.	
Evropská účinnost $\eta_{Euro}$	95.1 %	96.2 %
maximální účinnost $\eta_{max}$	95.9 %	98 %

*Tab. 2.2 Parametry střídačů Fronius IG Plus 80-3 a SYMO 3.0 [12]*





Obr. 2.6 Střídače Fronius Symo 3.0 (vlevo) a IG Plus 80-3 (vpravo) v Daikinu

Nižší účinnost střídače FRONIUS IG Plus 80 V-3 je způsobena právě zabudovaným vysokofrekvenčním transformátorem, na kterém vznikají ztráty. S tím souvisí i větší konstrukční velikost, hmotnost a vyšší cena střídače. Transformátor však poskytuje střídači galvanické oddělení, což znamená zvýšenou ochranu před poškozením [1].

### 2.4.3 Nosná konstrukce

Nosná konstrukce je provedena z nerezových hliníkových profilů a její dimenzování a statické posouzení střechy objektu bylo zajištěno montážní organizací. V případě FVE-J a FVE-S byla konstrukce postavena na vodorovné ploše střechy, což umožňovalo vlastní určení sklonu panelů, stanovený s ohledem na povětrnostní podmínky a také na zatížení střechy. Za to u FVE-Z byl nosnou konstrukcí pro FV panely obestaven tří blokový kryt z plexiskla, pod kterým vyrobené klimatizační jednotky putují na dopravním páse z výrobních linek k odběrnému místu pro expedování. Sklony modulů se tedy přizpůsobily zaoblení plexisklového krytu pro získání dobrého vizuálního dojmu [5].



Obr. 2.7 Nosná konstrukce FVE-Z (vlevo) a FVE-J+S (vpravo)

#### 2.4.4 Kabelové vedení

Pro instalaci jsou použité měděné vodiče, a to jak jednožilové na stejnosměrné straně, tak i vícežilové na straně střídavé [5].

##### 2.4.4.1 DC vedení

Jednotlivé FV moduly jsou mezi sebou propojeny solárními kabely, které jsou dále vedeny ke střídači. Tyto kabely jsou speciálně vyvinuté pro FV systémy, jsou odolné vůči teplotním změnám vnějšího prostředí, nešíří oheň a jsou samozhášivé. Jejich použití sahá do oblasti, kde je nutná odolnost vůči UV záření. Pro zvýšení ochrany proti UV záření se používá trubice, kudy jsou kabely vedeny. Jádrem tvoří pocínovaná měděná lanka, izolaci zesíťované XLPE a plášť je z bezhalogenového materiálu. Životnost může dosáhnout až 30 let, při dodržení podmínek instalace a provozu. Pro instalaci byl použit kabel o průřezu 6 mm<sup>2</sup> [13].



Obr. 2.8 Solární kabel [13]

#### 2.4.4.2 AC vedení

Za střídačem je elektrický proud veden pomocí silových kabelů CYKY-J 5x4. Kabel je dále veden přes jističe, elektroměry a svodiče přepětí do stávající elektroinstalace. Jádrem je tvořeno mědí, izolace je z PVC typu TI a plášť je PVC typu TM [5].

#### 2.4.5 Elektroměr

Měření získané střídavé elektrické energie zajišťuje třífázový podružný úředně cejchovaný elektroměr, který se nachází v technologické místnosti spolu se střídači. Jedná se o elektroměr značky NERIS a typ DVH5161-M. Tento typ elektroměru spadá do nové generace, jež je vhodná pro měření napětí s horší kvalitou na výstupu střídačů [14].

- proudový rozsah 10 – 100 A
- náběhový proud 40 mA
- třída přesnosti 1



Obr. 2.9 Elektroměr značky Neris

### 2.5 Vizuální kontrola a termovizní diagnostika

Ke zhodnocení FVE nesporně patří i kontrola stavu, v jakém se dané systémy nachází. Kontrolu jsem započal shlédnutím střídačů, které jsou na dostupných místech pro zaměstnance. Zde snad jenom lze upozornit na vyskytující se prach na střídačích, který by mohl být v pravidelných intervalech odstraňován.

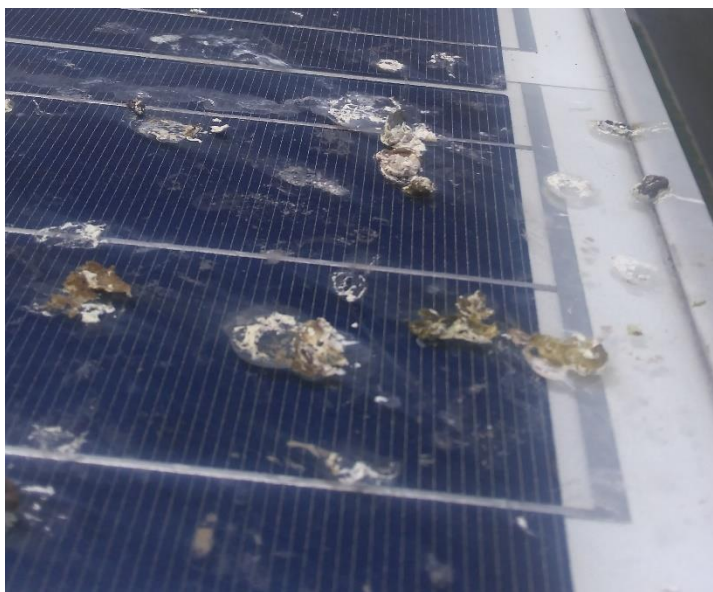
Komplexnější kontrolu jsem provedl na FV generátorech, umístěných na střeše. Kde jsem nejdříve vizuálně prohlédl veškeré moduly a přístupné kabely. Na obrázku *Obr. 2.10* můžeme vidět již znatelné poškození trubice, která kryje stejnosměrného vedení, způsobené převážně UV zářením. Toto poškození se vyskytuje na všech krytech kabelů FVE v Daikinu.





*Obr. 2.10 Izolace stejnosměrného vedení*

Na dalším obrázku *Obr. 2.11*. lze pozorovat ptačí exkrementy, které takto zakrývají horní část modulů umístěných v nejvýše umístěné řadě FVE-J. Stejný případ je viditelný i na modulech FVE-S na obrázku *Obr. 2.12*.



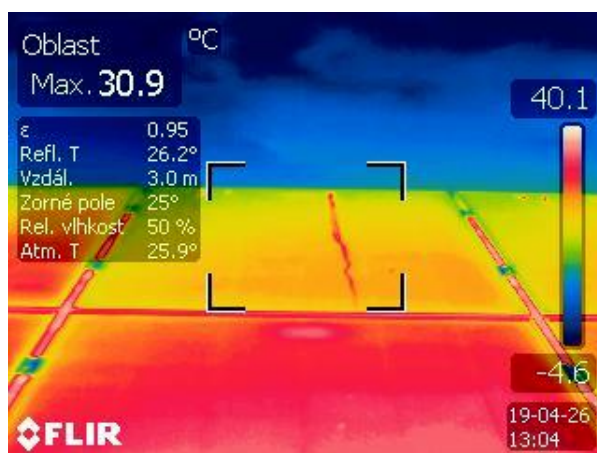
*Obr. 2.11 Ptačí exkrementy zakrývající FV články (FVE-J)*



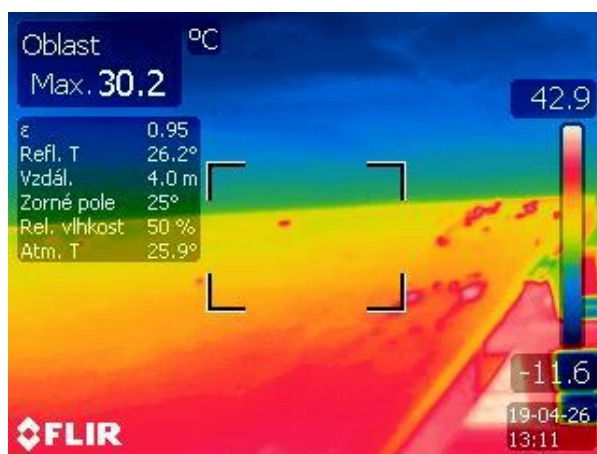
Obr. 2.12 Ptačí exkrementy zakrývající FV články (FVE-S)

Druhá část vizuální kontroly spočívala v termovizní diagnostice modulů na střeše. Termovizní kontrola je nejefektivnější způsob pro nalezení skrytých poruch u FV modulů. Pro tento způsob diagnostiky je zapotřebí specifických podmínek, z nichž nejdůležitější je slunečné počasí s intenzitou slunečního záření minimálně  $500 \text{ W/m}^2$ . Na výslednou podobu snímků má vliv intenzita záření, ochlazování větrem, úhel snímání, prach a jiné nečistoty na povrchu. Měření se musí realizovat pod úhlem  $70^\circ$  až téměř  $90^\circ$  k rovině modulu. Měření ruční kamerou bývá při takových požadavcích velmi časově a technicky náročné, pro zefektivnění měření se využívá dronu, který poskytuje letecké snímky pod požadovaných úhlem. Při termovizní kontrole je zapotřebí si všimnout hlavně rozložení teplot na FV modulu, tvaru a rozmístění teplotních výkyvů. Provozovatelé menších, např. FV systémů instalovaných na střeše, často takové kontroly zanedbávají. Převážně proto, že FV systémy jsou mnohdy při prodeji prezentovány jako bezúdržbové. Doporučuje se však provádět kontrolní měření alespoň jednou ročně a pokud data vyrobené energie vykazují nějaké výraznější odchylky, mělo by se kontrolní měření provést v dohledné době. Nejčastějšími vadami na termovizních snímcích jsou tzv. hotspots, což je jeden nebo více poškozených segmentů s vyšší teplotou než zbylá část FV modulu. Hotspot může být zapříčiněn mikrotrhlinami v článku způsobené mechanickým namáháním během výroby, přepravy, nebo také instalací. Další příčinou může být zastínění (listy, tráva, nečistoty) a opětovné odstínění FV článku [1, 15, 16].

Na prvních dvou snímcích *Obr. 2.13* a *Obr. 2.14* je vyobrazené teplotní působení ptačích exkrementů.



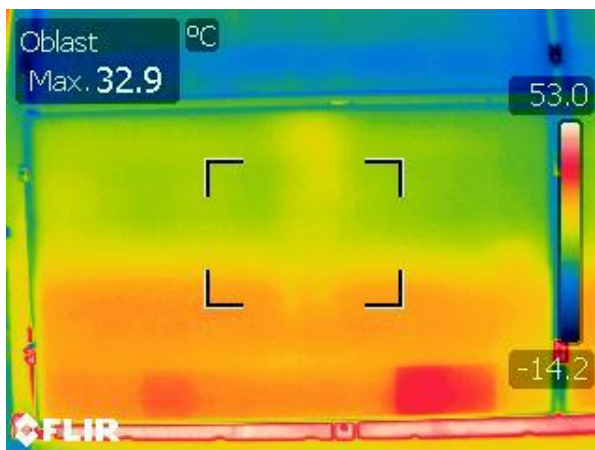
*Obr. 2.13* Ptačí exkrementy na FVE-J



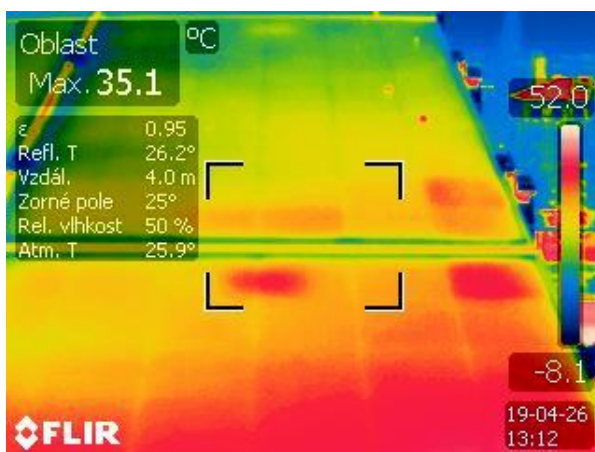
*Obr. 2.14* Ptačí exkrementy na FVE-J

Na dalších třech snímcích *Obr. 2.15 až Obr. 2.17* jsou vyobrazené segmentové poruchy (hot spoty), kdy FV články nevyrábí elektrickou energii, a naopak se chovají jako spotřebič. Hot spot snižuje výkon modulu jen nepatrně, pokud se však zastínění bude opakovat, může poškozený segment ohrozit i okolní segmenty a poškodit tak celý modul. Ne však každý teplotní rozdíl musí znamenat vadu segmentu, někdy je teplotní rozdíl kvůli rozptylu v třídách článků běžný. A také je třeba odlišit hotspoty od teplotního působení zezadu nainstalovaných přípojovacích skříní, které jsou zpravidla uprostřed kratší strany modulu. Na všech snímcích je patrný vliv nedokonalého měření, kdy se ve výsledném snímku zobrazuje okolní odražené teplo nebo měření není provedeno pod úhlem 90°. To se dá eliminovat zmíněným použitím dronu a dosáhnout tak kvalitnějších snímků celé FVE. I přesto jsou ale zahřátější segmenty, které by mohly vést k poškození, z následujících snímků

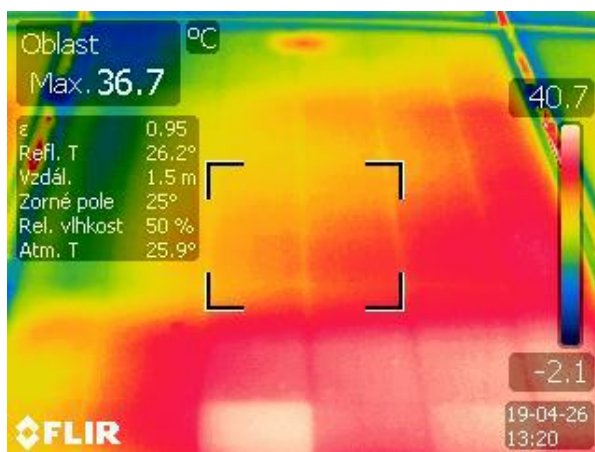
patrné. Zda se však jedná o citelné snížení výkonu modulu, to prokáže až měření V-A charakteristik. Kontrolu lze provést i na další prvky elektroinstalace, např. špatně aplikované svorky nebo poddimenzované provozní prostředky (ochranné prvky) [1, 24].



Obr. 2.15 Segmentová porucha na modulu FVE-Z



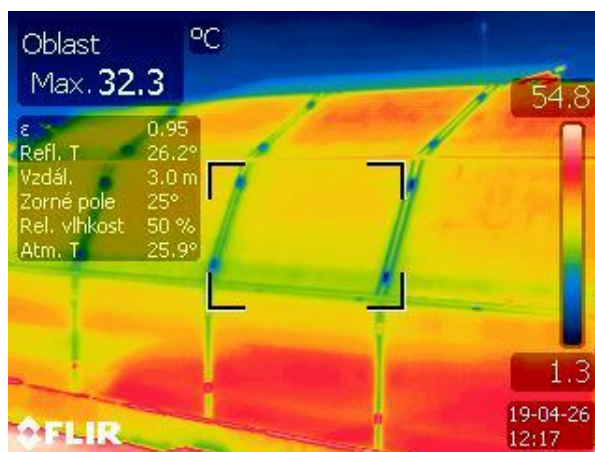
Obr. 2.16 Segmentová porucha na modulu FVE-J



Obr. 2.17 Segmentová porucha na modulu FVE-J



Poslední snímek na *Obr. 2.18* ukazuje odlišné vyšší zahřátí spodní řady modulů. V tomto případě je však pravděpodobné, že se jedná o odraz samotné rozehřáté střechy z asfaltových pásů. Do vyhodnocení také vstupuje úhel, pod kterým jsem provedl změření. Nicméně není vyloučené, že na moduly spodní řady působí vyšší teplota vlivem blízkého umístění střechy, která v letním období může být značně zahřátá.



*Obr. 2.18* Termovizní snímek jednoho bloku FVE-Z

## 2.6 Data vyrobené energie

### 2.6.1 Záznam

Hodnoty množství vyrobené energie FV systémy byly stěžejní pro splnění zadání diplomové práce. Požadovaná data mi byla poskytnuta externím konzultantem. Společnost Daikin si dodanou energii z FVE pečlivě sleduje monitorovacím a vizualizačním systémem ProCop od společnosti Siemens, který poskytuje komfortní sledování a zobrazování hodnot technologických veličin, jejich archivaci, signalizaci chyb a alarmních stavů. Sběr hodnot je prováděn ve střídačích. Z tabulky *Tab. 2.3* je zřejmé, že nárůst produkce elektrické energie se zaznamenává každých 10 minut. Hodnoty, které jsou rovné nule demonstrují, že sluneční záření v daném okamžiku je příliš nízké na to, aby dopadající energie překonala ztráty ve FV modulech, střídačích a kabelových rozvodech. V okamžiku překonání těchto ztrát se začne výroba elektrické vizuálně zaznamenávat. V tabulce *Tab. 2.3* je produkce FVE-J rozdělena do dvou sloupců, jelikož FV generátor FVE-J se vlastně skládá ze dvou stejně velkých FV polí o 30ti modulech, přičemž každé pole má svůj střídač a v něm zaznamenávanou vyrobenou elektrickou energii. Od kapitoly 2.2 již uvažuji FVE-J jako jeden celek pro přehlednější výpočty [17].

Datum	Čas	FVE-S $E_s$ (kWh)	FVE-J1 $E_{j1}$ (kWh)	FVE-Z $E_z$ (kWh)	FVE-J2 $E_{j2}$ (kWh)
1.7.2017	4:30:00	0	0	0	0
1.7.2017	4:40:00	0	0	0	0
1.7.2017	4:50:00	0	0	0	0
1.7.2017	5:00:00	6556,7	24114,4	0	24033,0
1.7.2017	5:10:00	6556,7	24114,4	17524,0	24033,0
1.7.2017	5:20:00	6556,7	24114,4	17524,0	24033,0
1.7.2017	5:30:00	6556,8	24114,4	17524,0	24033,0

Tab. 2.3 Záznam hodnot elektrické práce softwarem ProCop

## 2.6.2 Úprava a zhodnocení dat

Z obdržených dat bylo mým prvním cílem vytvořit tabulku Tab. 2.4, ve které bude zobrazen přehled vyprodukované elektrické energie jednotlivými FVE za každý měsíc a celkové energie za rok. Toho jsem dosáhl jednoduchým postupem, kdy jsem v programu MS Excel aplikoval na jednotlivé sloupce záznamu vyrobené energie funkci, která vypočítala rozdíl vyrobené energie k poslednímu dni v měsíci a prvnímu dni v měsíci, resp. rozdíl mezi posledním a prvním dnem v roce. Roční produkci jsem pak mohl určit i součtem vyrobených energií v jednotlivých měsících.

V průběhu let docházelo občasným výpadům systému ProCop a po dobu těchto výpadů nebyly hodnoty výroby zaznamenávány. Kvůli těmto skutečnostem nebylo možné určit vyrobenou energii v některých měsících výše uvedeným způsobem, proto jsem pro určení chybějících hodnot (v tabulce Tab. 2.4 červeně značené) postupoval jedním z následujících dvou postupů:

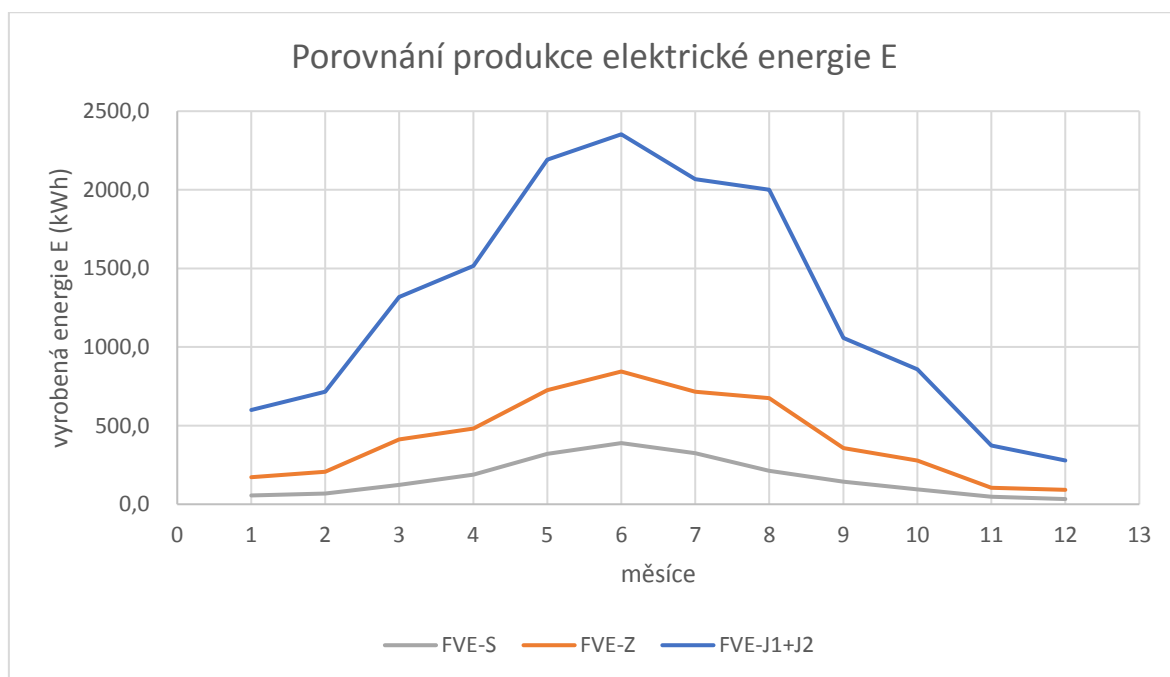
- 1) Pokud za daný měsíc bylo měření v chodu alespoň po určitou dobu, např. v měsíci lednu 2017 byl změřen nárůst energie od 1.1. do 20.1., bylo možné spočítat průměrnou vyrobenou energii za 1 den v intervalu 20 dnů. Následně jsem vyrobenou energii za 1 den mohl vynásobit počtem zbývajících nezaznamenaných dní a přičíst tak k změřené produkci za 20 dní. Tímto způsobem jsem se snažil co nejvíce přiblížit reálné produkci.
- 2) Jestliže výpadek systému trval po dobu delší než celý měsíc, zbývalo mi pouze jediné, a to zjistit hledanou hodnotu pomocí průměrování vyrobené energie v měsících v dalších letech. Jelikož jsem měl k dispozici celkem 4 roky zaznamenaných hodnot elektrické produkce, dosáhl jsem zjištění chybějící

nenaměřené vyrobené elektrické energie v daném měsíci pomocí průměrné výroby v totožných měsících v ostatních letech, kdy systém ProCop byl v provozu. Uvedené postupy korekce chybějících hodnot představují pro následující výpočty jistou chybu, kterou je třeba zohlednit ve výsledcích dalších výpočtů.

měsíc	FVE-S $E_S$ (kWh)	FVE-J1 $E_{J1}$ (kWh)	FVE-Z $E_Z$ (kWh)	FVE-J2 $E_{J2}$ (kWh)
leden	56,3	299,3	172,0	299,3
únor	67,3	358,1	205,8	358,1
březen	123,5	660,4	411,5	657,2
duben	188,9	759,7	481,1	756,3
květen	321,5	1100,4	725,4	1091,8
červen	389,1	1178,9	844,3	1174,2
červenec	325,0	1036,9	715,3	1031,6
srpen	213,3	1005,1	675,1	994,8
září	144,4	534,5	356,5	523,1
říjen	95,0	434,1	278,1	423,9
listopad	48,2	189,3	104,3	184,3
prosinec	33,0	139,0	91,8	139,4
<b>celkem</b>	<b>2005,5</b>	<b>7695,6</b>	<b>5061,2</b>	<b>7634,0</b>

Tab. 2.4 Vyrobená energie v jednotlivých elektrárnách za rok 2017

Z grafu na Obr. 2.19 je patrný poměr mezi produkcí jednotlivých systémů. Zhruba 68 % celkové produkce FVE v Daikinu pokrývá součet FVE-J1 a FVE-J2, 23 % náleží FVE-Z a nejmenší podíl na výrobě elektrické energie má s 9 % FVE-S.



Obr. 2.19 Porovnání produkce FVE v Daikinu za rok 2017

## 2.7 Početní návrh výroby FV systémů Daikin

V následující kapitole bude proveden výpočet pro odhad výroby elektrické energie všech FVE ve společnosti Daikin. Cílem je tedy nejprve určit průměrnou intenzitu slunečního záření dopadající na skloněnou plochu v dané lokalitě a pak přejít k určení celkové energie dopadající na skloněnou plochu, kterou můžeme následně přeměnit na elektrickou energii. Vzorový výpočet, do kterého spadají níže uvedené rovnice i tabulky, budu demonstrovat pro soustavu panelů umístěných na budově vývojového centra situovaných na jih (FVE-J). Pro zahájení výpočtu je nutné stanovení výchozích parametrů FVE-J, které charakterizují daný systém (viz Tab. 2.5). Údaje jako sklon panelů a jejich azimut jsem našel v projektové dokumentaci, zeměpisnou šířku a nadmořskou výšku jsem spolehlivě stanovil z aplikace Google Earth. Konkrétní hodnoty dosazené do rovnic jsou platné pro den 21. června a čas 15:00. Veškeré rovnice a údaje k nim uvedené v této kapitole jsou převzaty z literatury číslo [3] a [18].

sklon panelů $\alpha$	18°
azimut modulů $a$	2°
nadmořská výška $H$	367 m
zeměpisná šířka $\varphi$	49,73°

Tab. 2.5 parametry FVE-J

### 2.7.1 Poloha slunce

Poloha slunce se mění v závislosti na čase a v každý okamžik tak lze definovat jeho proměnou výškou nad obzorem  $h$  a azimut  $a_s$ . Tyto dvě veličiny lze definovat rovnicemi (2.3) a (2.4). Pro dosazení je třeba dopočítat sluneční deklinaci dle rovnice (2.5), která značí zeměpisnou šířku, při níž je v daný den v poledne slunce kolmo nad obzorem. Změna sluneční deklinace je způsobena vlivem precesního pohybu během rotace Země. Hodnotu úhlu „ $t$ “, určující pořadí dne v roce, zjistíme z rovnice (2.6). Veličina  $\tau$  představuje časový (hodinový) úhel, jenž značí zdánlivý posun slunce vlivem rotace Země. Při úplném otočení Země kolem své osy za 24 hodin můžeme konstatovat, že jedné hodině odpovídá 15°, přičemž přesně v poledne (12:00) je úhel  $\tau$  roven 0°. Pokud tedy budeme uvažovat libovolnou hodinu před polednem, bude úhel  $\tau$  záporný, a naopak po poledni bude kladný.



Výška slunce na obzorem  $h$ :

$$\sin h = \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \tau \quad (2.3)$$

$$\sin h = \sin 23,45 \cdot \sin 49,73 + \cos 23,45 \cdot \cos 49,73 \cdot \cos 45 = 0,72$$

$$h = \arcsin 0,72 = 46,30 \text{ (}^\circ\text{)}$$

Azimut slunce  $a_s$ :

$$\sin a_s = \frac{\cos \delta}{\cos h} \cdot \sin \tau \quad (2.4)$$

$$\sin a_s = \frac{\cos 23,45}{\cos 46,29} \cdot \sin 45 = 0,94$$

$$a_s = \arcsin 0,939 = 69,87 \text{ (}^\circ\text{)}$$

Úhel určující pořadí dne v roce  $t$  ( $D$  – den,  $M$  – měsíc)

$$t = 0,98 \cdot D + 29,7 \cdot M \quad (2.5)$$

$$t = 0,98 \cdot 21 + 29,7 \cdot 6 = 198,78 \text{ (}^\circ\text{)}$$

Sluneční deklinace  $\delta$ :

$$\delta = 23,45 \cdot \sin(t - 109) \quad (2.6)$$

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \sin(198,8 - 109) = 23,45 \text{ (}^\circ\text{)}$$

Úhel dopadu slunečních paprsků na obecně položenou plochu  $\gamma$ :

$$\cos \gamma = \sin h \cdot \cos \alpha + \cos h \cdot \sin \alpha \cdot \cos(a - a_s) \quad (2.7)$$

$$\cos \gamma = 0,72 \cdot \cos 18 + \cos 46,30 \cdot \sin 18 \cdot (69,87 - 2) = 0,77$$

$$\gamma = \arccos \gamma = 39,83 (^\circ)$$

Tabulka *Tab. 2.6* ukazuje přehled hodnot zjištěných výše uvedeným způsobem, které platí pro 21. den v 15:00 hodin pro každý měsíc. Výsledné hodnoty sluneční deklinace se uvažují jako průměrné pro každý den v daném měsíci. Úhel  $\gamma$ , který svírají dopadající paprsky a plocha modulu, je kromě denní doby a ročním obdobím závislý i na sklonu modulů.

měsíc	slun. deklinace $\delta$ ( $^\circ$ )	výška slunce $h$ ( $^\circ$ )	azimut slunce $a_s$ ( $^\circ$ )	úhel dopadu záření $\gamma$ ( $^\circ$ )
leden	-20,04	9,67	42,37	66,93
únor	-11,38	17,31	46,56	60,45
březen	0,28	27,44	52,82	52,30
duben	11,86	37,17	60,27	45,25
květen	20,32	43,92	67,00	41,08
červen	23,45	46,30	69,87	39,83
červenec	20,41	43,99	67,08	41,05
srpen	12,01	37,29	60,38	45,16
září	0,46	27,59	52,92	52,18
říjen	-11,22	17,45	46,64	60,33
listopad	-19,95	9,75	42,41	66,86
prosinec	-23,44	6,66	40,78	69,54

*Tab. 2.6 Parametry udávající pozici slunce v jednotlivých měsících*

## 2.7.2 Intenzita celkového záření

Přímé sluneční záření představuje hlavní složku celkového slunečního záření, která dopadá od slunce na povrch Země bez rozptylu v atmosféře. Její intenzita je směrově závislá. Intenzita slunečního záření stanovená na hranici atmosféry Země  $I_0$ , též označována jako „sluneční konstanta“, je průměrně  $1360 \text{ W/m}^2$ . Tato hodnota je při průchodu atmosférou snížena. Míru toho snížení udává součinitel znečištění atmosféry  $Z$ , který je závislý na lokalitě a vzdušných příměsích. Hodnoty součinitele  $Z$  uvedené v tabulce *Tab. 2.7*, mi byly poskytnuty vedoucím diplomové práce, který je získal z měření. Jedná se o průměrné měsíční hodnoty, měřené v Plzni v Tylově ulici. Naměřené hodnoty shledávám

nadprůměrně přívětivými, vzhledem k tomu, že tabulkové hodnoty pro města s průmyslovými exhalacemi v literatuře [3] udávají průměrnou hodnotu  $Z=4$ .

měsíc	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.
Z (-)	3,15	3,21	3,04	3,10	3,07	3,02	3,11	3,09	3,10	3,05	3,09	3,14

Tab. 2.7 - Činitel znečištění atmosféry Z

Intenzita přímého slunečního záření  $I_{pn}$ :

$$I_{pn} = I_0 \cdot \exp\left(-\frac{Z}{\varepsilon}\right) \quad (2.8)$$

$$I_{pn} = 1360 \cdot \exp\left(-\frac{3,02}{7,95}\right) = 930,40 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

Součinitel  $\varepsilon$ , který závisí na výšce slunce nad obzorem a na nadmořské výšce daného místa:

$$\varepsilon = \frac{9,38076[\sin h + (0,003 + \sin^2 h)^{0,5}]}{2,0015 \cdot (1 - H \cdot 10^{-4})} + 0,91018 \quad (2.9)$$

$$\varepsilon = \frac{9,38076 \cdot [0,72 + (0,003 + 0,723^2)^{0,5}]}{2,0015 \cdot (1 - 367 \cdot 10^{-4})} + 0,91018 = 7,96 \text{ (-)}$$

Intenzita přímého slunečního záření na obecně položenou plochu  $I_p$ :

$$I_p = I_{pn} \cdot \cos \gamma \quad (2.10)$$

$$I_p = 930,40 \cdot 0,77 = 714,53 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

Difúzní záření zahrnuje záření rozptýlené odrazem o různé částice ve vzduchu a také přímé záření odražené od okolních ploch (reflexivní). Hodnota „ $r$ “ představuje míru odrazivosti okolních ploch. Po domluvě s vedoucím práce jsme ji stanovili jako 0,25.

Difúzní sluneční záření  $I_D$ :

$$I_D = I_{D_o} + I_{D_r} \quad (2.11)$$

$$I_D = 0,5 \cdot (1 + \cos \alpha) \cdot I_{D_h} + 0,5 \cdot r \cdot (1 - \cos \alpha) \cdot (I_{P_h} + I_{D_h})$$

$$I_D = 0,5 \cdot (1 + \cos 18) \cdot 102,49 + \\ + 0,5 \cdot 0,25 \cdot (1 - \cos 18) \cdot (672,64 + 102,49)$$

$$I_D = 104,73 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

Intenzita přímého slunečního záření na vodorovnou plochu  $I_{P_h}$ :

$$I_{P_h} = I_{P_n} \cdot \sin h \quad (2.12)$$

$$I_{P_h} = 930,4 \cdot 0,72 = 672,64 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

Intenzita difúzního záření na vodorovnou plochu  $I_{D_h}$ :

$$I_{D_h} = 0,33 \cdot (I_0 - I_{P_n}) \cdot \sin h \quad (2.13)$$

$$I_{D_h} = 0,33 \cdot (1360 - 930,4) \cdot 0,72 = 102,49 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

Intenzita celkového záření  $I$ :

$$I = I_P + I_D \quad (2.14)$$

$$I = 714,53 + 104,73 = 819,26 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

### 2.7.3 Dopadající energie na osluněnou plochu

Následujícími výpočty je určeno množství energie, které dopadne na skloněnou plochu modulů FVE-J. Nejdříve se vypočte teoretické množství dopadající energie platné pro situaci, kdy slunce svítí nepřetržitě celý den, tedy od východu do západu slunce. Pro reálnou dopadající energii je třeba definovat pro jednotlivé měsíce poměrnou dobu slunečního svitu  $\tau$ , která je poměrem skutečné a teoretické doby slunečního svitu. Hodnoty teoretické doby svitu jsem získal z tabulek na stránkách meteogram.cz [26], kde jsou uvedeny časy východů a západů slunce pro každý den v roce. Rozdílem těchto časů jsem získal teoretickou dobu svitu pro každý den. Skutečnou průměrnou dobu svitu v Plzni pro daný měsíc jsem převzal z literatury [27]. Poměrem hodnot dle rovnice (2.17), jsem zjistil poměrnou dobu svitu, potřebnou k určení energie skutečně dopadající na osluněnou plochu (tabulka viz příloha 2-A a 2-B). Výsledky množství dopadající energie na plochu FVE-J jsou uvedeny v tabulce *Tab. 2.8*.

Teoreticky možné množství dopadající energie za den  $Q_{S \text{ den teor}}$ :

$$Q_{S \text{ den teor}} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} I_{hod} d\tau \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (2.15)$$

Energie difúzního záření dopadající za den  $Q_{D \text{ den}}$

$$Q_{D \text{ den}} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} I_{D \text{ hod}} d\tau \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (2.16)$$

Poměrná doba slunečního svitu  $\tau^-$ :

$$\tau^- = \frac{\tau_{skut}}{\tau_{teor}} \text{ (-)} \quad (2.17)$$

Skutečné množství dopadající energie za den  $Q_{S \text{ den}}$ :

$$Q_{S \text{ den}} = \tau^- \cdot Q_{S \text{ den teor}} + (1 - \tau^-) \cdot Q_{D \text{ den}} \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (2.18)$$

Skutečné množství dopadající energie za měsíc  $Q_{S \text{ mes}}$ :

$$Q_{S \text{ mes}} = n_{\text{dní}} \cdot Q_{S \text{ den}} \quad (2.19)$$

Skutečné množství dopadající energie za rok  $Q_{S \text{ rok}}$ :

$$Q_{S \text{ rok}} = \sum_{\text{leden}}^{\text{prosinec}} Q_{S \text{ mes}} = 967,61 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (2.20)$$

měsíc	$Q_{S \text{ den teor}}$ (kWh/m <sup>2</sup> )	$Q_{D \text{ den}}$ (kWh/m <sup>2</sup> )	$\tau$ (-)	$Q_{S \text{ mes}}$ (kWh/m <sup>2</sup> )
leden	2,61	0,52	0,12	23,68
únor	4,04	0,72	0,20	38,63
březen	6,09	0,94	0,32	79,99
duben	7,81	1,18	0,34	102,17
květen	8,95	1,34	0,41	137,98
červen	9,35	1,38	0,41	139,50
červenec	8,93	1,36	0,40	136,44
srpen	7,83	1,18	0,45	129,99
září	6,08	0,95	0,36	83,16
říjen	4,17	0,70	0,26	49,55
listopad	2,66	0,51	0,17	26,20
prosinec	2,05	0,42	0,15	20,33
<b>celkem/průměr</b>	<b>70,56</b>	<b>11,19</b>	-	<b>967,61</b>

Tab. 2.8 Dopadající energie na skloněnou plochu FVE-J

## 2.7.4 Odhad produkce FVE-J

Při znalosti dopadající energie na osluněnou plochu lze určit odhadovanou produkci elektrické energie. K tomu je třeba znát počet modulů daného systému, jejich účinnost a účinnou plochu, a také účinnost střídače. Ztráty na kabelech, které jsou minimální, jsou v tomto případě zanedbány. Účinná plocha panelu je stanovena počtem a rozměry FV článků dle rovnice (2.21). Účinnost panelů a střídačů lze zjistit ze štítků zařízení v tabulkách *Tab. 2.1* a *Tab. 2.2*.

Účinná plocha panelu:

$$S_m = a \cdot a \cdot n_{\text{článků}} = 0,16 \cdot 0,16 \cdot 60 = 1,46 \text{ (m}^2\text{)} \quad (2.21)$$

Celková účinnost:

$$\eta = \eta_{\text{modulu}} \cdot \eta_{\text{Euro}} = 0,15 \cdot 0,95 = 0,14 \text{ (-)} \quad (2.22)$$

Množství vyrobené energie FVE-J  $E_J$ :

$$E_J = Q_{S \text{ rok}} \cdot \eta \cdot S_m \cdot n_{\text{modulů}} \quad (2.23)$$

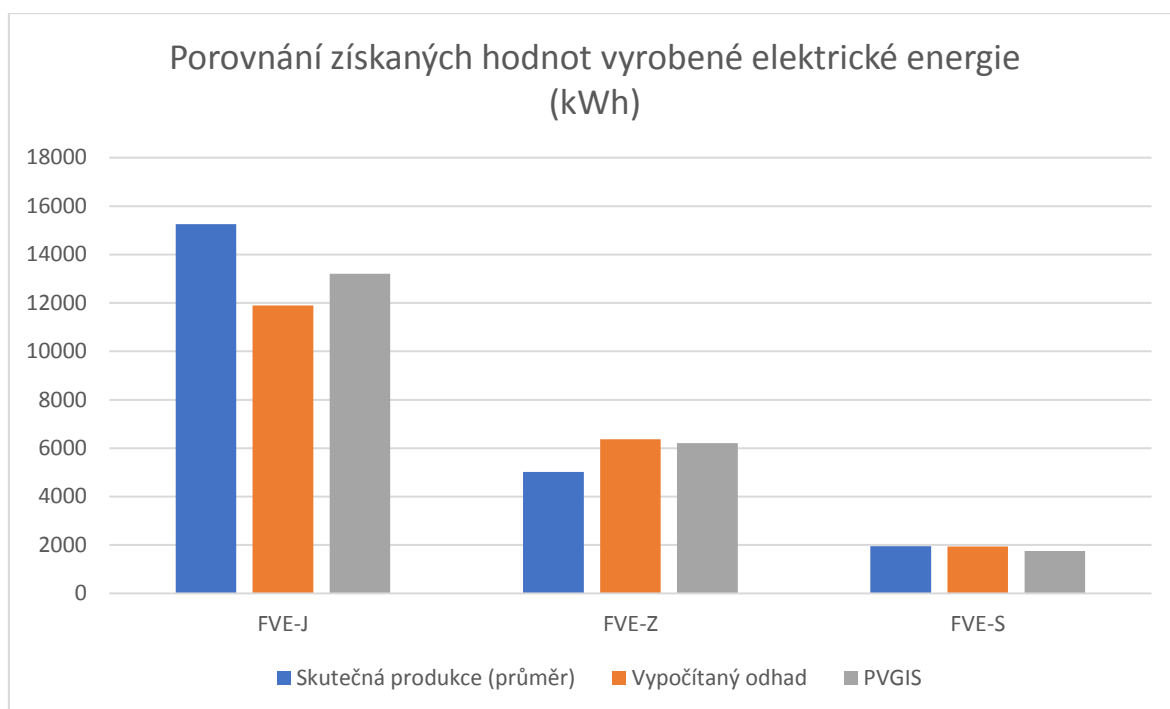
$$E_J = 967,61 \cdot 0,14 \cdot 1,46 \cdot 60 = 11891,21 \text{ (kWh)}$$

## 2.7.5 Porovnání naměřených a výpočtových hodnot

Třetím bodem zadání diplomové práce bylo porovnat naměřené a vypočtené hodnoty výroby elektrické energie. V následující tabulce *Tab. 2.9* jsou shrnuty naměřené hodnoty výroby všech FVE ve společnosti Daikin za roky 2015-2018. S nimi lze porovnat mnou navržené odhady výroby, které by měly být platné pro FVE v Daikinu za průměrných ročních klimatických podmínek, a navíc jsem připojil i odhad výroby určený pomocí programu PVGIS. Program PVGIS byl poskytnut veřejnosti zdarma on-line od vývojového centra Evropské komise za účelem kalkulace výroby elektřiny z FVE kdekoli v Evropě a Africe. Počítá na základě dat ze satelitních měření, ale i pozemních stanic [19].

rok	Skutečná produkce E (kWh)				Výpočet E (kWh)	PVGIS (kWh)
	2015	2016	2017	2018	-	-
FVE-J1+J2	15554,90	14578,10	14867,80	16034,60	11891,21	13200,00
FVE-Z	5052,30	4868,00	5029,60	5136,00	6376,84	6204,00
FVE-S	2002,60	1940,80	1978,40	1900,60	1941,93	1750,00

*Tab. 2.9 Porovnání vypočtené a naměřené produkce FVE Daikin*



Obr. 2.20 Porovnání získaných hodnot vyrobené elektrické energie

### 2.7.6 Zhodnocení výsledků

Mé výpočty odhadované produkce elektrické energie se ve dvou případech liší od skutečné produkce. V případě FVE-J1+J1 je můj odhad zhruba o 23% nižší než skutečná produkce, na tento rozdíl může mít vliv spousta parametrů a různých proměnných, které jsem použil ve výpočtech. Při kontrolních výpočtech jsem ale shledal nejdůležitější veličinou na změnu celkové produkce hodnotu poměrné doby osvitů  $\tau$ , kterou jsem se snažil určit co nejpřesněji dle meteorologických zdrojů. Výsledné hodnoty poměrné doby osvitů z těchto zdrojů ale mohou být pesimistické, jako příklad mohu uvést, že celková skutečná doba slunečního svitu pro Plzeň, se kterou počítám činí za rok 1441 h, avšak v literatuře [3] je pro území našeho státu uvedena celková doba slunečního svitu mezi 1700 až 2200 h/rok. V případě FVE-S se výpočtem velmi blíží skutečné produkci, což je dáno tím, že v dopadající energii na FVE-S je v mnohem větší míře, oproti dopadající energii na FVE-J, zastoupeno difúzní záření, a tak nemá horší poměrná doba osvitů tak velký vliv. U FVE-Z dosahují naopak vyšších hodnot odhadované produkce, stejně tak i v programu PVGIS. Zde mohu s jistotou tvrdit, že vyšší výpočtové hodnoty jsou převážně důsledkem postupu vztaženého na ideální případ, kdy výsledná vypočtená produkce je dána součtem vyrobené energie všech různě skloněných řad modulů zvlášť. V takovém vlastně uvažuji, že každé řadě modulů náleží jeden střídač přizpůsobený MPP dané řady modulů. Reálné provedení je však jiné, a to by se mělo projevit i na celkové účinnosti systému počítané v následující kapitole.



## 2.8 Data slunečního osvětlení

Dalším úkolem bylo zjistit reálnou účinnost FVE v Daikinu. Pro tuto analýzu bylo třeba zajistit meteorologická data, jež obsahují hodnoty sluneční intenzity za dané období a pro danou oblast. V našem případě bylo třeba zajistit data za stejné období, během kterého je zkoumaná FVE Daikin v provozu, tedy od listopadu 2014 až do prosince 2018. Potřebná data mi obstaral vedoucí diplomové práce z meteorologické stanice nacházející se na FEL ZČU. Samotná meteorologická data obsahovaly daleko více dat, než bylo potřeba. Vedle hodnot teploty vzduchu, rychlosti větru a jeho směru atd., bylo třeba najít intenzitu slunečního záření, jež byla označena jako „*solar radiation*“. Vytvořil jsem tedy v MS Excel tabulku obsahující datum a čas s příslušnou intenzitou. Tabulka *Tab. 2.10.* je ilustrací kompletní tabulky obsahující čtyřletý záznam hodnot. V tabulce je navíc určena průměrná intenzita za uplynulou hodinu, kterou se kterou pracuji dále v kapitole 2.3.2. Je třeba zmínit, že hodnoty intenzity slunečního záření byly změřeny pyranometrem a představují záření dopadající na vodorovnou plochu.

datum	čas	I (W/m <sup>2</sup> )
17.5.2016	6:00	10
17.5.2016	6:05	13
17.5.2016	6:10	17
17.5.2016	6:15	18
17.5.2016	6:20	21
17.5.2016	6:25	25
17.5.2016	6:30	30
17.5.2016	6:35	35
17.5.2016	6:40	37
17.5.2016	6:45	44
17.5.2016	6:50	49
17.5.2016	6:55	47
17.5.2016	7:00	54
<b>průměr</b>	-	<b>30,77</b>

*Tab. 2.10 Měřená intenzita slunečního záření s průměrem za uplynulou hodinu*

### 2.8.1 Zpracování a úprava dat

Za účelem zjištění kvality dat byly mezi prvními výpočty určeny průměrné intenzity slunečního záření a skutečné dopadající energie na vodorovnou plochu pro daný měsíc (*Tab. 2.11.*). Výsledné hodnoty průměrné měsíční intenzity slunečního záření pro daný měsíc jsou dány průměrem denních intenzit z intervalu od východu do západu slunce, tedy od

okamžiku, kdy byla změřená intenzita vyšší než  $0 \text{ W/m}^2$  až do opětovného poklesu intenzity záření na  $0 \text{ W/m}^2$ . Použil jsem pro to funkci „AVERAGEIF“, kde jsem zadal rozpětí řádků pro daný měsíc a podmínku, kdy funkce zprůměruje čísla rozdílná od nuly. Skutečná dopadající energie je dána součtem hodnot průměrných intenzit slunečního záření pro jednotlivé hodiny (průměrná intenzita viz. tabulka Tab. 2.10). V průběhu těchto výpočtů jsem zjistil, že stejně jako u dat vyrobené energie v tabulce Tab. 2.4, nějaká období nebyla zaznamenána. Pro určení chybějících hodnot jsem použil stejný postup jako v kapitole 2.6.2.

měsíc	I ( $\text{W/m}^2$ )	$Q_{S \text{ mes}}$ ( $\text{kWh/m}^2$ )
leden	104,77	25,43
únor	137,36	37,64
březen	217,75	79,10
duben	249,91	101,40
květen	353,59	166,39
červen	384,84	186,33
červenec	338,93	163,65
srpen	322,50	141,93
září	192,07	71,37
říjen	166,23	55,52
listopad	83,10	20,98
prosinec	70,36	17,05
<b>celkem</b>	-	<b>1066,78</b>

Tab. 2.11 Intenzita a skutečná dopadající energie na vodorovnou plochu za rok 2017

## 2.8.2 Dopadající energie na skloněnou plochu

Cílem následujících výpočtů je převést intenzitu slunečního záření dopadající na metr čtvereční vodorovné plochy na sluneční energii, která dopadá na konkrétní skloněnou plochu FVE s definovanou účinnou plochou. Výpočtové algoritmy v této kapitole jsem aplikoval ve vývojovém prostředí VBA (Visual Basic for Application), které je součástí MS Excel. Tento program mi umožňoval vytvářet příkazy pro opakující se (cyklické) početní operace, což je žádoucí vzhledem k velmi rozsáhlému množství dat. Pro lepší představu doporučuji předem zhlédnout přílohu 7, v níž je názorná tabulka hodnot zjišťovaných následujícím postupem.

Počáteční hodnotou pro výpočet je vždy průměrná intenzita slunečního záření za uplynulou hodinu  $I_{\text{cik}}$  (zjištěná dle tabulky Tab. 2.10). Pro přesnější určení výsledných hodnot je třeba pracovat zvlášť s přímým a zvlášť s difúzním slunečním zářením. Tyto veličiny ale nelze z poskytnutých naměřených hodnot celkové intenzity přesně určit. Kvůli této skutečnosti se pokusím nahradit skutečné difúzní záření, které představuje menší část

vedle přímého záření, mnou vypočítaným difúzním zářením na vodorovnou plochu (příloha 5), které jsem již určil pro všechny měsíce v daných hodinách dle rovnice ( 2.13 ). Přímé záření na vodorovnou plochu je pak určeno rozdílem celkového a difúzního slunečního záření dle vztahu (2.24). Příkaz pro přiřazení  $I_{dh}$  z tabulky k odpovídající změřené celkové intenzitě záření v konkrétní hodině je příloze 8.

$$I_{clk} = I_{Ph} + I_{Dh} \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (2.24)$$

Pro další úpravy hodnot přímého a difúzního slunečního záření bude třeba znát výšku slunce nad obzorem  $h$  pro každou hodinu v průběhu dne, a stejně tak úhel  $\gamma$ , který svírá normála osluněné plochy a dopadající paprsky. Tyto parametry udávající polohu slunce jsem také již spočítal v kapitole 2.7.1. Hodnoty výšky slunce nad obzorem jsou totožné pro každý systém, úhel  $\gamma$  je pro každý systém odlišný (příloha 4).

Znám-li přímé záření dopadající na vodorovnou plochu a parametry polohy slunce  $\sin h$  a  $\cos \gamma$  pro každou hodinu dne, mohu dle vztahů (2.25) a (2.26) docílit přímého záření dopadající na skloněnou plochu. Odpovídající příkazy cyklických početních operací jsou v přílohách 9 a 10, které zajistí přiřazení odpovídajících parametrů  $\sin h$  a  $\cos \gamma$  konkrétní hodnotě  $I$  v konkrétní hodině.

Přímé sluneční záření na plochu kolmou ke směru paprsků:

$$I_{Pn} = \frac{I_{Ph}}{\sin h} \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (2.25)$$

Přímé sluneční záření na skloněnou plochu:

$$I_P = I_{Pn} \cdot \cos \gamma \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (2.26)$$

Dopadající energii na skloněnou plochu z přímého záření:

$$Q_{Pmes} = \sum I_{Phod} \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad (2.27)$$

Pro určení dopadající energie z difúzního záření je nutné určit intenzitu difúzního záření dle vztahu (2.28).

Intenzita difúzního záření:

$$I_D = 0,5 \cdot (1 + \cos \alpha) \cdot I_{Dh} + 0,5r \cdot (1 - \cos \alpha) \cdot (I_{Ph} + I_{Dh}) \quad (W/m^2) \quad (2.28)$$

Dopadající energii na skloněnou plochu z difúzního záření:

$$Q_{Dmes} = \sum I_{D \text{ hod}} \quad (kWh/m^2) \quad (2.29)$$

Celková dopadající energie na skloněnou plochu:

$$Q_{mes} = Q_{Pmes} + Q_{Dmes} \quad (kWh/m^2) \quad (2.30)$$

V tabulce *Tab. 2.12* je zobrazena energie, která dopadla na metr čtvereční plochy kolmo na FV moduly FVE-J v roce 2016.

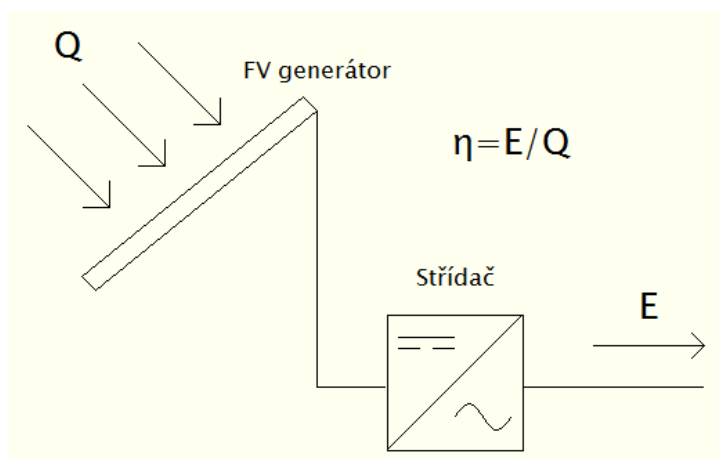
měsíc	Q <sub>i</sub> (kWh/m <sup>2</sup> )
leden	44,43
únor	38,46
březen	86,14
duben	117,63
květen	147,98
červen	149,74
červenec	153,95
srpen	156,69
září	129,57
říjen	68,68
listopad	37,70
prosinec	20,96
<b>celkem</b>	<b>1151,92</b>

*Tab. 2.12 Dopadající energie kolmo na skloněné moduly a FVE-J pro rok 2016*

### 2.8.3 Stanovení reálné účinnosti

Reálnou účinností je myšlena účinnost celého systému, do kterého spadají FV moduly, stejnosměrné vedení a střídače, v nichž je zaznamenávána produkce elektrické energie. V tomto případě se účinnost určí podílem výkonu ku příkonu (viz. *Obr. 2.21*). Příkon jsem

vypočítal v předchozí kapitole a můžeme si jej představit jako sluneční energii dodávanou v průběhu dne. Na výstupu je pak elektrická energie, která byla vyráběna napříč roky a je uvedena v tabulce *Tab. 2.4* (případně příloha 14). Dopadající energie v tabulce *Tab. 2.12* je však vztažená na jeden metr čtvereční, v následujících výpočtech ji proto převedu na energii dopadající na účinnou plochu konkrétní FVE. Účinnou plochu panelu jsem již vypočítal rovnicí ( 2.21 ), tuto hodnotu tedy pouze vynásobím počtem panelů daného systému, abych zjistil účinnou plochu FV generátoru.



Obr. 2.21 Stanovení účinnost FV systému

Účinná plocha FV generátoru:

$$S_G = S_m \cdot n_{\text{modulů}} \text{ (m}^2\text{)} \quad (2.31)$$

FV systém	FVE-J
počet modulů $n$	60
účinná plocha modulu $S_m$	1,46
účinná plocha FV generátoru $S_g$	<b>87,61</b>

Tab. 2.13 Účinná plocha FV generátorů FVE-J

Celková dopadající energie na účinnou plochu generátoru

$$Q = Q_{\text{mes}} \cdot S_G \quad (2.32)$$

Výsledky jsou zobrazeny v tabulce (Tab. 2.14). Dopadající energie na FVE-Z je určena součtem dopadajících energií na všechny čtyři různé skloněné řady modulů zvlášť.

měsíc	Q <sub>s</sub> (kWh)	Q <sub>J</sub> (kWh)	Q <sub>Z</sub> (kWh)
leden	322,87	3892,32	1618,69
únor	407,96	3369,80	1604,08
březen	687,96	7546,33	3891,66
duben	1131,75	10305,47	7563,43
květen	2345,06	12964,81	9963,00
červen	2746,53	13118,59	10151,38
červenec	2465,56	13487,11	10420,19
srpen	1355,91	13727,22	10213,34
září	731,49	11351,19	6958,17
říjen	477,02	6017,41	2851,38
listopad	333,20	3302,70	1376,00
prosinec	239,10	1836,41	967,27
<b>celkem</b>	<b>13244,43</b>	<b>100919,37</b>	<b>67578,57</b>

Tab. 2.14 Dopadající energie na účinnou plochu systémů v roce 2016

Výpočet účinnosti systému:

$$\eta = \frac{E}{Q} \cdot 100 (\%) \quad (2.33)$$

měsíc	η FVE-S (%)	η FVE-J (%)	η FVE-Z (%)
leden	16,29	12,34	8,53
únor	15,08	16,67	10,06
březen	19,62	13,25	8,99
duben	17,88	15,72	7,19
květen	12,87	15,28	6,96
červen	13,47	15,16	7,32
červenec	13,44	14,97	6,37
srpen	14,62	15,07	6,71
září	16,94	13,92	6,92
říjen	13,16	11,00	7,12
listopad	15,86	14,50	10,00
prosinec	13,80	15,16	9,76
<b>průměr</b>	<b>15,25</b>	<b>14,42</b>	<b>7,99</b>

Tab. 2.15 Účinnost systémů FVE-S, FVE-J a FVE-Z v roce 2016

## 2.8.4 Zhodnocení výsledků

Výsledná účinnost systémů FVE-S a FVE-J pro měsíce roku 2016 vychází přibližně dle reálných možností. Nicméně se najde pár hodnot, kdy v určitém měsíci přesahuje účinnost 16 %, v takovém případě už by FV systém vyžadoval dobré klimatické podmínky, kterými jsou nižší teplota spolu s dostatečným slunečním zářením. V měsíci březnu však dosahuje účinnost FVE-S hodnoty 19,62 %, v takovém případě jsem již hledal chybu ve výpočtech a došel jsem k závěru, že patřičný vliv na výpočty má právě to, že počítám s teoretickými hodnotami difúzního záření. Vlivem toho může docházet při výpočtech k situacím, kdy teoretické difúzní záření je nižší než skutečné pro danou oblast, tím pádem dle rovnice ( 2.24 ) připadá větší podíl z celkového záření přímému záření. Když se ale podíváme na tabulku v příloze 13 je zřejmé, že v měsících od září do března je příspěvek přímého záření na FVE-S prakticky nulový, kvůli orientaci modulů na severní stranu. Tudíž v těchto měsících je systém FVE-S odkázán plně na difúzní záření a pokud je použita teoretická hodnota nižší než skutečná, projeví se to na zvýšení vypočtené účinnosti, zejména v měsících březen, duben, srpen a září. Obdobných výkyvů jsem dosáhl i v letech 2015 a 2017. Při zhodnocení výsledné účinnosti FVE-Z jsou patrné nižší hodnoty účinnosti než u FVE-S a FVE-J, což odpovídá i výsledkům v kapitole 2.7.5, kde bude pravděpodobnou příčinou konfigurace zapojení, kterou blíže probírám v nadcházející kapitole 2.10.2.

Uvedené výpočty vedou s určitou tolerancí k určení účinnosti FV systému, a proto lze předpokládat, že při použití přesných hodnot přímého a difúzního záření je možné dosáhnout přesnějších výsledků. Výpočet účinnosti FV systémů vyžadoval vytvoření příkazů pro cyklické operace (v přílohách 8, 9 a 10). Jejich proces počítání je velmi časově náročný, a proto jsem se rozhodl (i z hlediska praktického přínosu) prezentovat výsledky účinností FV systémů pouze pro rok 2016.

## 2.9 Ekonomická návratnost investice do FVE

V této části diplomové práce se zaměřuji na výpočet návratnosti investice do FVE jako celku. Výpočet návratnosti v našem případě zcela zásadně ovlivňují tři veličiny, kterými jsou veškeré investiční náklady do FVE, cena elektrické energie, kterou lze ušetřit výrobou vlastní energie, a nakonec samotná produkce FVE. Další faktor, který bude také zohledněn ve výpočtu, je pokles účinnosti panelů, způsobený jejich degradací. V České republice jsou provozovatelé obnovitelných zdrojů podporováni formou investičních dotací a provozních

dotací, tj. formou výkupních cen a tzv. „zelených bonusů“. Obnovitelné zdroje energie na bázi slunečního záření jsou podporovány formou výkupních cen a zelených bonusů, jestliže byly projekty uvedeny do provozu v období mezi 31.12.2005 až 31.12.2013. Pro FVE zprovozněné po datumu 21.10.2015 je zajištěna podpora formou investičních dotací, která pokryje část nákladů na zřízení projektu. Ačkoliv byl první záměr na výstavbu FVE ve společnosti Daikin v únoru 2013, tak k jejímu zprovoznění došlo až v říjnu roku 2014. Tudíž se na ní nevztahuje žádná z výše uvedených státních podpor [21, 22, 23].

Do nákladů na FVE můžeme zahrnout cenu panelů, střídačů, střešní konstrukce, instalačního materiálu a taky náklady na samotnou instalaci. Na produkci elektrické energie mají významný vliv použité technologie u panelů a střídačů. Modernější technologie se může vyplatit z hlediska vyšší účinnosti a také pomalejší degradace panelů. Celková cena FVE ve společnosti Daikin, ve které jsou zahrnuty všechny výše uvedené aspekty, je 1 362 000 Kč. Při instalovaném výkonu 28,8 kWp činí náklady na 1 kWp 47 291,67 Kč [20].

V případě ceny elektrické energie platí, že čím dražší elektrickou energii podnik nakupuje, tím dříve se mu investice do FVE vrátí. Při výpočtu budu vycházet z ceny, kterou společnost platila měsíčně za spotřebovanou elektrickou energii v období 2015 až 2018, viz příloha 11. Cena silové elektřiny je stanovena energetickou burzou a také smlouvou s místním distributorem. Pro návratnost by bylo ideální zahrnout i očekávaný budoucí vývoj ceny, nicméně tento údaj se obtížně predikuje, a proto budu návratnost pro období po roce 2018 počítat s průměrnou cenou, kterou společnost platila mezi lety 2015 až 2018 [21, 22].

Výrobce modulů je zákazníkovi poskytnuta záruka na jejich účinnost i na konstrukční části. U použitých modulů ZXP6-60-240W/P je výrobcem ZNSHINESOLAR zaručeno, že účinnost panelů neklesne po dobu prvních 10ti let provozu pod 90% a dalších 15 let pod 80%. Na konstrukční části je záruka 10 let. Ze záruk poskytovaných výrobcem lze uvažovat, že míra snižování účinnosti modulů je každý rok zhruba o 1 %, což v rovnici (2.35) představuje konstanta 0,887 [1, 21].



### 2.9.1 Výpočet návratnosti systému

V tabulce *Tab. 2.16* jsou vypočítané uspořené finance pro rok 2017 za nenakoupenou energii dle rovnic (2.34) a (2.35). Stejným postupem jsem zjistil uspořené finance i pro roky 2015, 2016 a 2018. Cenu elektřiny jsem stanovil na základě údajů uvedených ve fakturách, kde byla celková spotřebovaná elektrická energie společnosti za daný měsíc a částka k zaplacení za spotřebovanou energii, jejich podílem jsem zjistil, kolik Kč stála 1 kWh.

$$\text{úspora}_{\text{leden}} = E_{\text{celkem}} \cdot \text{cena}_{\text{ele.}} (\text{Kč}) \quad (2.34)$$

$$\text{úspora}_{\text{leden}} = 826,82 \cdot 1,59 = 1311,61 (\text{Kč})$$

$$\text{úspora}_{\text{rok}} = \sum_{\text{leden}}^{\text{prosinec}} \text{úspora} = 36\,452,00 (\text{Kč}) \quad (2.35)$$

měsíc	FVE-S E <sub>s</sub> (kWh)	FVE-J E <sub>j</sub> (kWh)	FVE-Z E <sub>z</sub> (kWh)	E celkem (kWh)	cena ele. (Kč)	úspora (Kč)
leden	56,26	598,56	172,00	826,82	1,59	1311,61
únor	67,32	716,18	205,80	989,31	1,68	1663,24
březen	123,50	1317,60	411,50	1852,60	1,61	2976,15
duben	188,90	1516,00	481,10	2186,00	1,64	3575,51
květen	321,50	2192,20	725,40	3239,10	1,58	5128,78
červen	389,10	2353,10	844,30	3586,50	1,54	5538,09
červenec	325,00	2068,50	715,30	3108,80	1,60	4965,09
srpen	213,30	1999,90	675,10	2888,30	1,76	5070,82
září	144,40	1057,60	356,50	1558,50	1,70	2647,98
říjen	95,00	858,00	278,10	1231,10	1,61	1981,73
listopad	48,20	373,60	104,30	526,10	1,63	859,77
prosinec	33,00	278,35	91,80	403,15	1,82	733,23
<b>celkem</b>	<b>2005,49</b>	<b>15329,59</b>	<b>5061,20</b>	<b>22396,28</b>	-	<b>36452,00</b>

*Tab. 2.16 Tabulka uspořených financí za nenakoupenou energii pro rok 2017*

Pro určení návratnosti jsem vycházel z hodnoty průměrné roční úspory financí v období 2015-2018 dle tabulky (*Tab. 2.16*).

Rok	2015	2016	2017	2018	Průměr
ušetřené finance (Kč)	50 494,01	38 566,66	36 452,00	43 478,51	<b>42 247,79</b>

*Tab. 2.17 Uspořené finance*

Hrubou návratnost investice tedy lze určit podílem počátečních investičních nákladů a zjištěného průměrného výnosu za uplynulé období mezi roky 2015 až 2018 s ohledem na degradaci modulů dle rovnice (2.35).

$$\text{návratnost} = \frac{\text{počáteční investice}}{\text{výnos} \cdot \text{konst.}} = \frac{1\,362\,000}{42\,247,79 \cdot 0,887} = 36,35 \text{ let} \quad (2.36)$$

Výsledek návratnosti 36,35 let lze považovat za velmi dlouhou dobu, vzhledem k tomu, že návratnost investice do FVE se běžně pohybuje kolem 10ti let a méně. Ve výpočtu je počítáno s degradací účinnosti modulů na 80 % do 25 let, tudíž při návratnosti 36,35 let lze předpokládat, že se doba návratnosti ještě prohloubí. Nehledě na možné opotřebení či poškození součástí, jež by vyžadovalo výměnu, a tudíž další přídavné finanční náklady.

## 2.10 Možné způsoby optimalizace

Poslední kapitola je věnována optimalizacím stávajících FVE. Vzhledem k vysoké návratnosti investičních nákladů je na místě řešit nějaké opatření pro zvýšení produkce FVE. Při návrhu jednotlivých opatření na vylepšení efektivity výroby elektrické energie jednotlivých FV systémů jsem se zaměřil na místa, která jsem shledal nedostatečně naplňujícími svůj potenciál. Na základě konzultace s externím konzultantem jsem provedl výpočet u prvního návrhu v následující podkapitole 2.5.1, jehož provedení bylo reálně zvažováno. V dalších kapitolách navrhuji optimalizace pouze z teoretického hlediska.

### 2.10.1 Přeorientování panelů ze severní na jižní stranu

V tomto případě jsem se zaměřil na nejméně výnosnou FVE v areálu společnosti Daikin, kterou je FVE orientovaná na sever. FVE-S se skládá ze 20ti modulů a její sklon činí 56°. Návrhem je těchto 20 modulů otočit směrem jižní stranu, ideálně se sklonem symetrickému k současné FVE-J. Nová lokace modulů je patrná z obrázku, kde červeně značená oblast je současné umístění a v modrém značení budou přesunuté moduly ve stejné konfiguraci jako FVE-J.



Obr. 2.22 Přesunutí modulů

Náklady na tuto změnu by zahrnovaly cenu nové nosné konstrukce pro nově otočené moduly a také provedení samotné změny instalace elektromontéry. Stejnoseměrné vedení nebude třeba rozšiřovat, jelikož nové umístění modulů bude dokonce blíže DC rozvaděči, umístěného u střídače. Současný střídač by též mohl být zachován, jeho maximální DC výkon činí 6000 W (výkon 20ti modulů je 4800 W). Společnost Daikin uvolní na tuto změnu rozpočet ve výši 250 000 Kč, tudíž budu tuto částku považovat za maximální přídatnou investici a přičtu ji k celkové investici do FVE.

Navýšení produkce elektrické energie je zřejmé z tabulky *Tab. 2.18*. V tabulce je uvedena průměrná produkce elektrické energie FVE-J napříč roky 2015-2018, kterou produkuje 60 modulů spojených do dvou střídačů. Z této hodnoty lze jednoduše hrubě odhadnout, že produkce 20ti modulů bude třetinová, a takovou lze předpokládat pro nově otočené panely. V posledním sloupci je naznačené procentuální zlepšení nově orientovaného systému FVE-J-20 oproti předchozímu uspořádání FVE-S.

Změnou orientace panelů na jih a jejich sklonu na  $18^\circ$  lze navýšit produkci zhruba průměrně o 64 %, což lze považovat za vysoké zvýšení efektivity produkce. Otázka, zda se tento krok finančně vyplatí, zodpoví tabulka *Tab. 2.19* a následující výpočty.

měsíc	FVE-J (kWh)	FVE-J-20 (kWh)	FVE-S (kWh)	zlepšení (%)
leden	435,29	145,10	43,45	70,06
únor	718,05	239,35	74,36	68,93
březen	1178,83	392,94	136,18	65,34
duben	1769,43	589,81	196,41	66,70
květen	2092,63	697,54	308,53	55,77
červen	2068,75	689,58	369,23	46,46
červenec	2148,80	716,27	338,20	52,78
srpen	1987,69	662,56	200,04	69,81
září	1433,86	477,95	131,12	72,57
říjen	842,35	280,78	78,76	71,95
listopad	443,79	147,93	48,48	67,22
prosinec	278,35	92,78	33,00	64,43
<b>celkem/průměr</b>	<b>15397,80</b>	<b>5132,60</b>	<b>1957,76</b>	<b>64,34</b>

Tab. 2.18 Tabulka zlepšení produkce po přeorientování 20ti modulů ze severu na jih

V tabulce Tab. 2.19 je zhodnocení finanční stránky optimalizace. Cena elektrické energie je průměrem cen za období 2015-2018 (příloha 11).

měsíc	cena ele. (Kč/kWh)	úspora FVE-S (Kč)	úspora FVE-J-20 (Kč)	rozdíl (Kč)
leden	1,89	82,26	274,72	192,46
únor	1,90	141,48	455,40	313,92
březen	1,85	251,96	727,03	475,06
duben	1,86	365,80	1098,47	732,68
květen	1,86	574,06	1297,89	723,83
červen	1,84	678,60	1267,39	588,79
červenec	1,83	619,84	1312,74	692,90
srpen	2,07	414,23	1371,98	957,75
září	1,88	246,20	897,45	651,25
říjen	1,83	144,45	514,93	370,48
listopad	1,86	90,36	275,68	185,32
prosinec	2,02	66,75	187,69	120,93
<b>celkem</b>	-	<b>3675,99</b>	<b>9681,36</b>	<b>6005,37</b>

Tab. 2.19 Tabulka zvýšení výnosu po přeorientování 20ti modulů z severu na jih

Navýšení ročních úspor za nenakoupenou elektrickou energii oproti předchozímu stavu činí dle hrubého odhadu 6005,37 Kč. Nyní lze dle vztahu (2.36) určit, o kolik let se zlepší návratnost, pokud vezmeme v potaz navýšení ročních úspor za elektrickou energii, ale zároveň taky navýšení celkových nákladů o novou nosnou konstrukci a vykonanou práci.

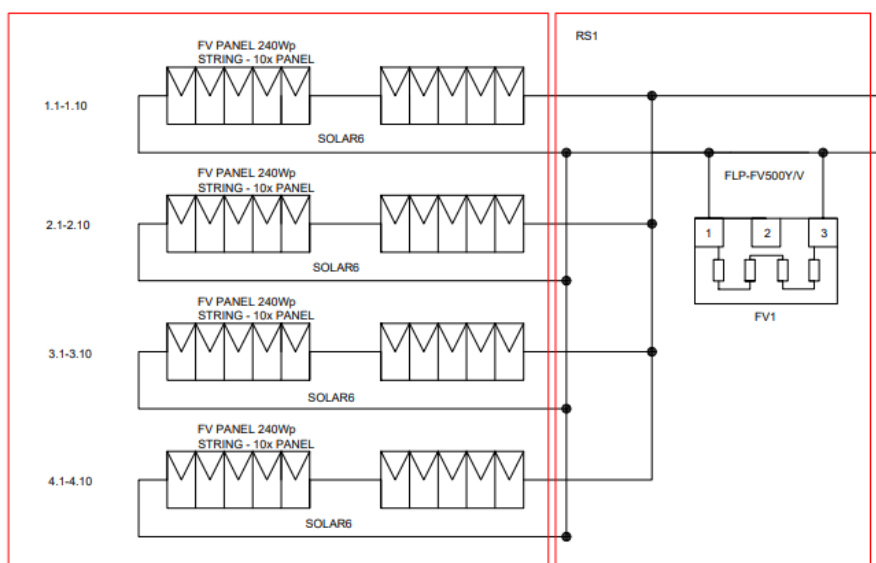
$$\text{návratnost} = \frac{\text{počáteční investice} + \text{přidané náklady}}{(\text{průměrný výnos} + \text{navýšení úspor}) \cdot \text{konst.}} \quad (2.37)$$

$$\text{návratnost} = \frac{1\,362\,000 + 250\,000}{(42\,247,79 + 6005,37) \cdot 0,887} = 37,66 \text{ let}$$

Z výsledku je zřejmé, že při využití celého rozpočtu o hodnotě 250 000 Kč na přeorientování modulu ze severní na jižní stranu se optimalizace nevyplatí, ba naopak se návratnost ještě prodlouží. Pokud by náklady na novou nosnou konstrukci a vykonání práce činily 100 000 Kč, zlepšila se návratnost o 2 roky. Zda se tedy optimalizace vyplatí, záleží na dohodě s firmou, která by poskytla potřebný materiál a provedla instalaci.

### 2.10.2 Koncepce FVE-Z

Vypočítaný odhad produkce systému FVE-Z (kapitola 2.7.5) v idealizovaném případě je zhruba o 20 % vyšší než reálná produkce systému. Stejně tak výsledná účinnost udává nižší hodnoty než další dva systémy. Proto jsem se zabíral příčinou a možným vylepšením stávajícího provedení systému. FVE-Z se skládá ze 40ti modulů nacházejících se ve čtyřech řadách s různým sklonem. Ze schématu na *Obr. 2.23* převzatého z technické dokumentace je patrné schéma zapojení FV modulů. FV moduly jsou připojeny sériově ve čtyřech řetězcích (4 stringy) po 10ti modulech, které jsou pak spojeny paralelně a jejich výstupní energie je vedena přes rozvaděč do střídače.



Obr. 2.23 Schéma zapojení FV modulů FVE-Z

Pro zjištění, zda zapojení splňuje požadavky parametrů střídače (kapitola 1.3.1.3) jsem provedl následující kontrolní výpočty. Prvním je kontrola, zda maximální napětí na stringu nepřesahuje maximální vstupní napětí střídače.

$$U_{dc\ max} = 1,13 \cdot U_{oc} \cdot n_{modulů} \ (V) \quad (2.38)$$

$$U_{dc\ max} = 1,13 \cdot 37,55 \cdot 10 = 424,32 \ (A)$$

Maximální vstupní napětí střídače činí 600 V, v tomto případě je tedy podmínka zapojení modulů splněna. Dále porovnávám minimální napětí na stringu.

$$U_{dc\ min} = 0,8 \cdot U_{mpp} \cdot n_{modulů} \ (V) \quad (2.39)$$

$$U_{dc\ min} = 0,8 \cdot 29,75 \cdot 10 = 238,24 \ (V)$$

Pokud výslednou hodnotu porovnám s minimálním vstupním napětím střídače (230 V), při kterém se střídač zapne a se startovacím napětí dodávky definující hranici, při kterém střídač začne dodávat elektrickou energii do elektroinstalace (260 V), je zřejmé poddimenzování systému. Tímto zapojením dochází k tomu, že střídači trvá déle, než se spustí při svítání a stejně tak dojde k dřívějšímu vypnutí během západu slunce. Nakonec kontroloji maximální proud ze všech stringů.

$$I_{dc\ max} = 1,25 \cdot I_{mpp} \cdot n_{modulů} \ (A) \quad (2.40)$$

$$I_{dc\ max} = 1,25 \cdot 8,07 \cdot 4 = 40,35 \ (A)$$

Maximální hodnotou proudu, kterou střídač vydrží bez poškození, je maximální zkratový proud pole panelů  $I_{SC}$  rovnající se 48 A. Vypočítaná hodnota 40,35 A je tedy v přijatelných mezích. Vypočítaný proud se vyskytne v opravdu ojedinělých případech za intenzity slunečního záření  $1250 \text{ W/m}^2$ .

I přes splněné výkonové požadavky střídače na konfiguraci zapojení modulů v solárním poli je třeba upozornit na jeho nesystematické provedení, viz dále. Použitý střídač vyžaduje, aby v každém řetězci byly aplikovány stejné typy modulů, se stejnou orientací a stejným

sklonem. A to jednak kvůli získání stejného napětí na každém řetězci, ale také kvůli optimálnímu přizpůsobení MPP trackeru. V tomto případě, kdy moduly jsou reálně umístěny ve třech různě skloněných řadách po 12ti modulech a zbývající čtyři moduly jsou v řadě čtvrté, je patrné, že v každém stringu se nachází různě skloněné moduly. To má za následek zhoršené přizpůsobení střídače poskytovanému výkonu FV generátorem. Aplikovaný střídač disponuje jedním MPP trackerem, který se nastaví na MPP modulu, jenž vykazuje nejnižší výkon z celého FV generátoru. V tomto případě se bude pravděpodobně jednat o nějaký modul (v závislosti na znečištění, vadách a výrobní toleranci) z první řady se sklonem  $90^\circ$ , a tudíž výkonový potenciál lépe skloněných modulů zůstane nevyužit. Výsledkem je nižší výnos a finanční ztráty vlivem toho, že střídač nikdy nepracuje s optimálním výkonem. V neposlední řadě je třeba dodat, že střídač FVE-Z je umístěn v přízemí výrobní haly, od FV generátoru umístěného na střeše (10-12m) je tedy poměrně vzdálený, což způsobuje vyšší úbytek napětí na stejnosměrném vedení. V následujících prvních dvou bodech navrhuji možné způsoby optimalizace, které by vedly k eliminaci stávajících nedostatků FVE-Z a dosažení tak vyšší produkce. Další dvě možnosti představují sofistikovanější řešení, které by sice řešilo stávající nedostatky, ale systém by se mohl již jevit jako předdimenzovaný. [1]

- Jako prvním a nejefektivnějším krokem se jeví srovnání sklonu všech modulů solárního pole a ideálně jej nasměrovat na jižní světovou stranu. Bylo by tak dosaženo optimální orientace a umístění, které by vedlo k maximálnímu zisku.
- Druhou možností je použití takzvaného stringového střídače. Tento koncept představuje zapojení, kdy každému stringu náleží jeden střídač. To představuje několik výhod oproti klasickému centrálnímu střídači. U FV systému s různě skloněnými stringy umožňuje lepší výkonové přizpůsobení podmínkám slunečního záření. Dále pak je možné umístit stringové střídače do bezprostřední blízkosti FV generátoru, čímž odpadá rozvaděč FV generátoru a stejnosměrné vedení. A hlavní výhodou je, že není požadováno stejné napětí na každém stringu, tudíž by bylo možné navrhnout stringy s ohledem na reálné umístění modulů FVE-Z (3 x string o 12ti modulech a 1x string o 4 modulech). [1, 28]
- Další variantou je využití modulového střídače, kdy každý jednotlivý FV modul (nebo dvojice modulů) je vybaven malým modulovým střídačem, též mikroinvertorem. Tímto se docílí eliminace nedostatků klasických střídačů jako

závislost na orientaci, počtu a typu modulů ve stringu, dále odpadá stejnosměrná instalace (včetně rozvaděče), a navíc umožnění odpojit modul v případě požáru. Hlavní výhodou je, že je využit plně výkonový potenciál všech modulů. Při aplikaci této koncepce je však zapotřebí přizpůsobit ochranná opatření ve střídavé části, obzvláště v elektrickém obvodu spotřebiče, jelikož proud při paralelním spojení FV modulů znatelně stoupá. Znatelnou nevýhodou však je vyšší cena, nižší životnost a spolehlivost vlivem většího počtu součástek [1, 28].

- Jde o hybridní systém skládající se z centrálního střídače a výkonových optimizérů u jednotlivých modulů. Výkonový optimizér je malé zařízení, které se umísťuje na modul. Optimizér reguluje napětí modulu tak, aby celkové napětí na stringu vykazovalo stabilní hodnotu. Střídač pak plní optimálně svojí funkci při každé hodnotě intenzity slunečního záření. Mezi výhody patří zvýšení produkce elektrické energie o 25 %, monitorování stavu jednotlivých modulů, různé sklony i orientace modulů nemají vliv na výrobu a stejně jako v předchozí koncepci je i možné odpojení jednotlivých modulů při požáru. Výkonovými optimizéry je možno vylepšit i stávající systémy, je však důležité zajištění kompatibility optimizérů s typem střídače. Nevýhodou jsou vyšší investiční náklady, která jsou však vykompenzována vyšším výnosem a také delšími zárukami (střídače 12 let, optimizéry 25 let) [1, 28].

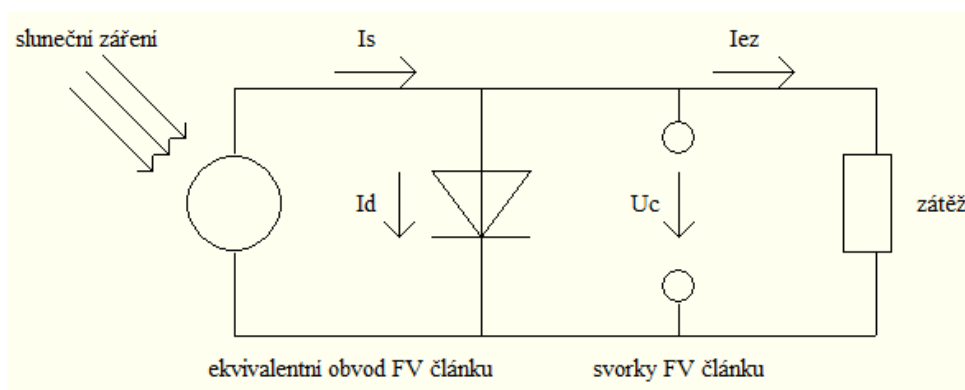
### 2.10.3 System pro vyhřívání FV článků

Produkce elektrické energie v zimních měsících je velmi omezená vlivem krátké doby slunečního záření, úhlem dopadu paprsků a klimatickými podmínkami. I přesto, že bude obloha jasná po celý den, není vyloučené, že teplota se bude držet pod 0°C. V takovém případě může napadnutý sníh zabránit slunečním paprskům dosažení FV modulů a během tohoto pokrytí sněhem není vyráběna žádná elektrická energie. K řešení tohoto faktoru limitujícího výrobu elektrické energie s nabízí níže popsany systém pro vyhřívání FV článků, který splňuje požadavky, jako jsou jednoduchost, nízká cena, jednoduchá instalace do stávající FVE, bezpečnost a spolehlivost.



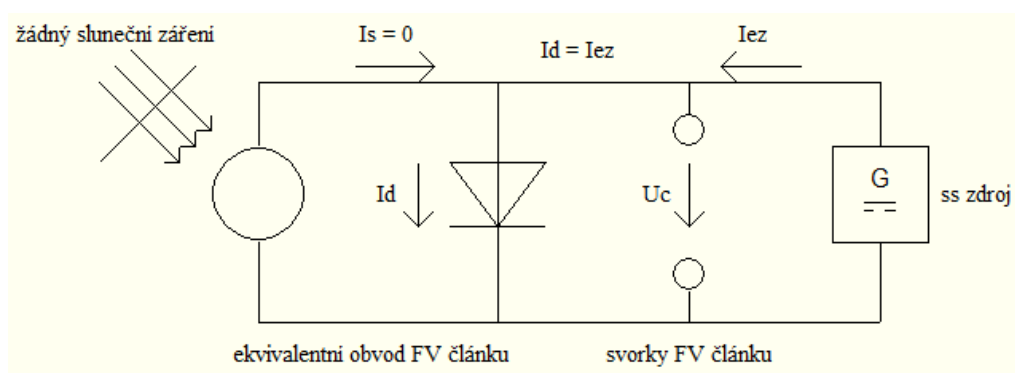
Tento způsob by bylo výhodné aplikovat na FVE-J, která má sklon  $18^\circ$  a horní dvě řady modulů ve FVE-Z se sklony  $25^\circ$  a  $20^\circ$ . Na vybraných modulech bylo i možné v zimním období pozorovat déle setrvávající sněhovou pokrývku.

Myšlenka návrhu je založena na vnitřní diodové struktuře FV článku. V režimu výroby elektrické energie dopadající paprsky generují proud  $I_S$ , výkon FV článku je dán součinem napětí  $U_C$  a proudu  $I_{EZ}$ . Aby bylo získáno výstupní napětí  $U_C$ , musí přes diodu téct určitý proud  $I_D$ .



Obr. 2.24 Ekvivalentní obvod FV článku ve standardním režimu [25]

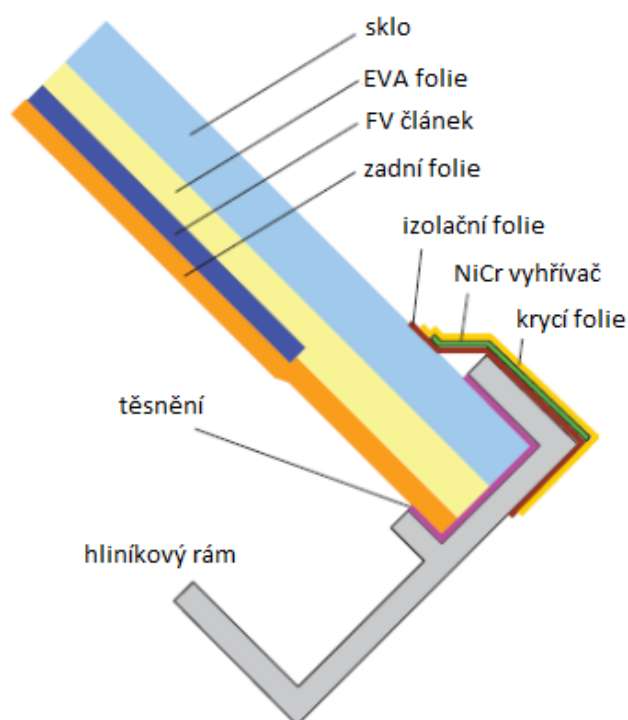
V režimu vyhřívání FV článků je třeba zapojit místo zátěže stejnosměrný zdroj, který obvodem protlačí proud  $I_{EZ}$ . Parametry stejnosměrného zdroje jsou adekvátně přizpůsobeny FV článku, modulu, nebo celému generátoru.



Obr. 2.25 Ekvivalentní obvod solárního článku v režimu vyhřívání [25]

Při tomto řešení lze vyhřát moduly na teplotu zhruba 35 °C, což zajistí rozpuštění pevné struktury sněhu a jeho pomalý sesuv po modulu směrem dolů. Ale to nemusí být vždy dostatečné řešení, jelikož moduly jsou opatřeny hliníkovým rámem, který zůstává stále chladný a když se k němu dostane sesouvající se sníh, stane se zase pevný.

Řešením je správně navržená kovová folie (materiál NiCr). Hliníkový rám je nejdříve pokryt izolační folií, která snese vysoké teploty. Na tuto folii je pak umístěn NiCr vyhříváč s vyvedenými konci mimo hliníkový rám, které jsou pak napájeny pro vyhřátí. Toto opatření zajistí kompletní sesuv sněhové pokrývky z FV modulu.



Obr. 2.26 Vyhřívání skrze NiCr [25]

Optimalizace FV systémů zajištěná vyhříváním FV modulů a kovové folie poskytuje spolehlivé odstranění sněhové pokrývky, kterého lze dosáhnout do zhruba 15 minut. [25]

#### 2.10.4 Údržba FV systému

Návratnost FVE jsem vypočítal na zhruba 36 let. Při takové návratnosti by měl provozovatel FVE zvláště dbát na zvýšenou údržbu pro zvýšení životnosti systému a dosažení tak investovaných nákladů a nějakého zisku. FV zařízení vyžaduje minimální údržbu, avšak pravidelnou rutinní kontrolou a údržbou se může předejít větším poškozením, která potom vyžadují opravy a výměnu zařízení. Dochází tak k nadbytečným výdajům a prodloužené doby mimo provoz, čímž se snižuje vyprodukovaná energie. Na denní bázi by se měla kontrolovat chybová indikace na střídačích a jednou za měsíc by se měla kontrolovat provozní výnosnost. Pravidelně jednou za půl roku je doporučeno provést kontrolu celého FV generátoru – znečištění, upevnění modulů, mechanické pnutí. Dále pak zkontrolovat stav pojistek a funkčnost přepětových ochran (svodičů), obzvláště po bouřkové činnosti. Znečištění na FV modulech je vhodné čistit pomocí velkého množství vody a následně šetrně čistit houbou bez čistících prostředků, aby nedošlo k poškrábání modulů. Vizuálně také lze kontrolovat porušené izolace, seškvařená místa, uchycení kontaktů. Pro důkladnější hledání nedostatků a poškození na modulech jsou k dispozici měřicí přístroje, které mohou měřit V-A charakteristiky s ohledem na ozáření a teplotu, izolační odpor pro detekci poškozeného vedení nebo chybného kontaktu, a jako velmi užitečné se jeví měření termokamerou, kdy velké teplotní rozdíly FV článků mohou poukazovat na závadu. Díky veškerým těmto úkonům lze předejít finančním ztrátám způsobených nižším výnosem, případně vzniklým poškozením [1, 2].

#### 2.10.5 Zhodnocení

Potenciál optimalizací jako je přeorientování modulů ze severu na jih nebo nová konfigurace střídačů FVE-Z lze považovat pouze jako ukázkou, jak dosáhnout vyšší produkce elektrické energie. Z praktického hlediska by však přeorientování nebo náhrada stávajícího střídače nebylo rentabilní vzhledem k možným zvýšeným výnosům. Fotovoltaická elektrárna společnosti Daikin slouží spíše jako vizuální prvek, kterým společnost informuje veřejnost o tom, že je pro šetření životního prostředí použitím obnovitelného zdroje energie. Proto bych se spíše stavěl k ušetření dalších investic do FVE a ubíral se směrem k vylepšení údržby, kdy pouze stačí stanovení odpovědnosti za pravidelnou vizuální kontrolu prvků systému a zajištění odborné firmy, která bude provádět v určených intervalech (např. ročních) technická měření na zařízeních, která mohou prokázat skryté závady, jež by bylo možné efektivně vyřešit.

## Závěr

V závěru diplomové práce bych rád obecně shrnul provedené úkony a dosažené výsledky, které mohou být výchozím bodem pro společnost Daikin k provedení adekvátních opatření.

V diplomové práci jsem na teoretické úrovni představil základní principy, prvky a možnosti fotovoltaických systémů. Údaje z teoretické části jsem následně zužitkoval v praktické části obsahující návrh výroby elektrické energie, stanovení účinnosti fotovoltaických systémů, určení návratnosti celé fotovoltaické elektrárny a v neposlední řadě možné způsoby optimalizace.

Hlavním cílem bylo zhodnocení produkce elektrické energie fotovoltaické elektrárny ve společnosti Daikin. Pro tento úkon jsem zkoumal projektovou dokumentaci a následně vizuálně shlédl konkrétní prvky systémů. Pro důkladnější posouzení stavu jsem provedl termovizní měření na dostupných fotovoltaických modulech a zjistil jejich aktuální stav. Tyto kroky jsem provedl za účelem zjištění, z čeho vlastně poskytnutá data elektrické energie vychází a čím jsou jejich hodnoty ovlivněny.

Dále jsem pak provedl analýzu a korekci poskytnutých dat vyrobené elektrické energie, jelikož data nebyla úplná. Následně jsem porovnával data s vlastním výpočtem odhadu. Pro výpočet jsem se snažil získat co nejpřesnější hodnoty poměrné doby slunečního osvětlení z meteorologických stanic, přesto se v případě skutečné doby osvětlení jednalo pouze o teoretické hodnoty. Výsledky lze s jistou tolerancí uvažovat za přesvědčivé, vzhledem k podobnosti se skutečnou produkcí elektrické energie.

Nejrozsáhlejší částí praktické stránky diplomové práce hodnotím stanovení účinnosti fotovoltaických systémů. Výsledky potvrdily závěry z vypočteného odhadu produkce, kdy jednak FVE-Z dosahuje předpokládané nižší účinnosti, ale také dosahují přibližně reálných možností. Nicméně bych výsledky bral pouze jako orientační a také jako ukázkou toho, jak se dá taková účinnost fotovoltaického systému stanovit. K přesnějšímu určení by bylo třeba znát exaktní hodnoty přímého a difúzního slunečního záření, které nejsou meteorologickou stanicí na FEL zprostředkovány. A pak také je nutné disponovat kompletními daty intenzit slunečního záření a daty vyrobené elektrické energie.

Přínosnější informací pro společnost Daikin bude určení návratnosti investic do celé fotovoltaické elektrárny. Doba návratnosti investic dosahuje dle hrubého odhadu závratných 36ti let. Příčinou takového výsledku je skutečnost, že společnost nezískala žádné dotace, neprodává vyrobenou elektrickou energii za výkupní cenu a ani nečerpá zelený bonus. V neposlední řadě je třeba přihlídnout k tomu, že u fotovoltaické elektrárny je na první pohled upřednostněn vizuální dojem z provedení oproti maximálnímu výnosu elektrické energie.

Mnou navržené způsoby zvýšení produkce by sice splnily svůj účel - zvýšit produkci, nicméně jsou to kroky, které se měly učinit v zárodku instalace. Nyní by dodatečné náklady k současnému systému, který zatím nevykazuje žádné poškození, vedly pouze k prodloužení návratnosti. Proto, jak jsem již navrhoval, bych se zaměřil na zefektivnění údržby systému popsaného v kapitole 2.10.4. Bylo by vhodné provést i důkladnější měření termovizní kamerou, případně měření V-A charakteristik, která by mohla odhalit skryté vady systémů, obzvláště i FVE-Z, kde je bezesporu energetický výnos nižší a na vině by nemusel být výhradně způsob zapojení.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

### Odborná literatura

- [1] HASELHUHN, Ralf a MAULE, Petr. *Fotovoltaické systémy*. 1. č. vyd. Plzeň: Vydavatel Česká fotovoltaická asociace, 2017.
- [2] HASELHUHN, Ralf. *Fotovoltaika*. 1. č. vyd. Ostrava: Vydavatel nakladatelství HEL, 2010.
- [3] CIHELKA, Jaromír. *Solární tepelná technika*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství T. Malina, 1994. 207 str.
- [4] BERANOVSKÝ Jiří, TRUXA, Jan. *Alternativní energie pro váš dům*. 2. aktualizované vydání, rok vydání: 2004. 152 str.
- [5] REMSA Jaromír. *Projektová dokumentace k FVE Daikin*, rok vydání: 2013
- [6] LIBRA Martin, POULEK Jaroslav. *Fotovoltaika, teorie i praxe využití solární energie*. 1. vydání, rok vydání: 209, 160 stran.

### Internetové zdroje

- [7] V-A charakteristika. TZB info [online]. Poslední změna 23.4.2019. [Cit. 23.4.2019]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/9667-fotovoltaicke-systemy-s-vychodo-zapadni-orientaci-a-pouze-jednim-stridacem>
- [8] Obnovitelná energie. TZB info. [online]. Poslední změna 23.6.2014. [Cit. 16.4.2019]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/114865-optimalni-orientace-a-sklon-fotovoltaickych-panelu>
- [9] Solární experti. [online]. Poslední změna 17.9.2015. [Cit. 16.4.2019]. Dostupné z: <https://www.solarniexperti.cz/jak-umistit-na-dum-solarni-panely/>
- [10] KARAMANOLIS, Stratis. Sluneční energie. Praha: Sdružení MAC, s.r.o. 1996. 238str
- [11] Zonnepanelen. Product Documentation. [online]. Poslední změna 10.4.2019. [Cit. 10.4.2019]. Dostupné z: [https://www.zonnepanelen.net/nl/pdf/panels/ZXP6-60-235-255W\\_V1405\\_EN1\\_LQ.pdf](https://www.zonnepanelen.net/nl/pdf/panels/ZXP6-60-235-255W_V1405_EN1_LQ.pdf)
- [12] Solarhome. Product Documentation. [online]. Poslední změna 10.4.2019. [Cit. 10.4.2019]. Dostupné z: <https://www.solarhome.cz/sitova-solarni-elektrarna/>
- [13] Obchodsolar. Technická dokumentace solárního kabelu [online]. Poslední změna 10.4.2019. [Cit. 10.4.2019]. Dostupné z: <https://www.obchodsolar.cz/solarni-kabel-6mm?tab=download#anch1>
- [14] Elektromery. Údaje o elektroměru [online]. Poslední změna [1.5.2019]. [cit. 1.5.2019]. Dostupné z: [http://www.elektromery.com/product/trifazove-elektromery-na-listu-din-uredn/elektromer-dvh-5161-m-10\\_100a-cz-cejch\\_-/32](http://www.elektromery.com/product/trifazove-elektromery-na-listu-din-uredn/elektromer-dvh-5161-m-10_100a-cz-cejch_-/32)
- [15] Fotovoltaika - detekce vad. TZB info. [online]. Poslední změna 10.12.2018. [Cit. 1.5.2019]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/18366-detekce-vad-u-fotovoltaickych-panelu>
- [16] Termovizní kamera. FLY VISION. [online]. Poslední změna 1.5.2019. [Cit. 1.5.2019] Dostupné z: <http://www.fly-vision.cz/solar>
- [17] Alfamik. [online]. Poslední změna 16.4.2019. [Cit. 16.4.2019]. Dostupné z: [http://www.alfamik.cz/?p\\_procop2.htm](http://www.alfamik.cz/?p_procop2.htm)
- [18] Sluneční energie. Prezentace. [online]. Poslední změna 10.4.2019. [Cit. 10.4.2019]. Dostupné z: [http://users.fs.cvut.cz/tomas.matuska/wordpress/wp-content/uploads/2015/02/AZE-P1-slunecni\\_energie.pdf](http://users.fs.cvut.cz/tomas.matuska/wordpress/wp-content/uploads/2015/02/AZE-P1-slunecni_energie.pdf)

- [19] PVGIS. Modely pro výpočet. [online]. Poslední změna 11.4.2019. [Cit. 11.4.2019]. Dostupné z: <http://fotovoltaika.ekowatt.cz/pvgis.php>
- [20] Fotovoltaika. TZB info. [online]. Poslední změna 22.1.2018. [Cit. 22.4.2019]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/16839-ekonomicka-navratnost-investice-do-fotovoltaicke-elektrarny-k-pokryti-vlastni-spotreby-podniku-2-cast>
- [21] Návratnost a výnosy. Isofenenergy [online]. Poslední změna 22.4.2019. [Cit. 22.4.2019]. Dostupné z: <http://www.isofenenergy.cz/navratnost-fotovoltaicke-elektrarny.aspx>
- [22] Dotace pro bydlení. Nová zelená úsporám [online]. Poslední změna 22.4.2019. [Cit.22.4.2019]. Dostupné z: <https://www.novazelenausporam.cz/dokumenty/>
- [23] Dotace. Silektro [online]. Poslední změna 22.4.2019. [Cit. 22.4.2019]. Dostupné z: <https://www.silektro.cz/solarni-elektrarny/provozovatel-fve/postup-pro-priznani-podpory>
- [24] Pojmy ve fotovoltaike. TZB info. [online]. Poslední změna 29.9.2014. [Cit.24.4.2019]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/11772-nejpouzivanejsi-pojmy-ve-fotovoltaike>
- [25] Vyhřívání FV článků. IEEE explore [online]. Poslední změna 23.3.2017. [Cit.27.4.2019]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7884484>
- [26] Časy východů a západů slunce. Meteogram [online]. Poslední změna 1.5.2019. [Cit.1.5.2019]. Dostupné z: <https://www.meteogram.cz/vychod-zapad-slunce/ceska-republika/plzen/>
- [27] Průměrná doba slunečního svitu. TZB info [online]. Poslední změna 13.5.2019. [Cit.13.5.2019]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/99-prumerne-mesicni-doby-slunecniho-svitu-ve-vybranych-lokalitach-cr>
- [28] Střídač. TZB info [online]. Poslední změna 11.2.2013. [Cit. 5.5.2019]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/9555-stridac-pro-fotovoltaickou-elektrarnu-jakou-technologie-zvolite>
- [29] Pyranometr. Meteorologické přístroje [online]. Poslední změna 9.5.2019. [Cit. 9.5.2019]. Dostupné z: <https://pocasimeteoaktuality.wordpress.com/meteorologie/meteorologicke-pristroje/>

## Seznam příloh

- 1 - A - Výpočet celkové intenzity slunečního záření pro FVE-J (první část)
- 1 - B - Výpočet celkové intenzity slunečního záření pro FVE-J (druhá část)
- 2 - A - Zjištění poměrné doby svitu pro Plzeň (první půlka roku)
- 2 - B - Zjištění poměrné doby svitu pro Plzeň (druhá půlka roku)
- 3 - A - Produkce FVE-J (Teoretické množství energie a energie difúzního záření dopadající na FVE-J)
- 3 - B - Produkce FVE-J (elektrická energie)
- 4 - Vygenerované tabulky  $\cos\gamma$  a  $\sinh$  pro FVE-J ( $\sinh$  shodné pro všechny FVE)
- 5 - Difúzní záření  $I_{DH}$  pro FVE-J (shodné pro všechny FVE)
- 6 - Příkaz pro vygenerování tabulky  $\cos\gamma$  (obdobný i pro  $I_{dh}$  a  $\sinh$ )
- 7 - Ilustrace tabulky pro výpočet dopadající energie na skloněnou plochu FVE-J za uplynulou hodinu pro jeden metr čtvereční
- 8 - Příkaz pro stanovení  $I_{dh}$  pro každou hodinu v daném období (v příkaze pro jeden rok)
- 9 - Příkaz pro vypočtení  $I_{pn}$  pro každou hodinu v daném období
- 10 - Příkaz pro vypočtení  $I_p$  pro každou hodinu v daném období
- 11 - Cena elektrické energie
- 12 - Naměřené sklony modulů FVE-Z (1. řada (nejníže umístěná) je pod úhlem  $90^\circ$ .)
- 13 - Úhel dopadu paprsků slunečního záření na moduly FVE-S v průběhu roku  $\cos\gamma$  (při záporných hodnotách nedopadá žádné přímé záření na moduly)
- 14 - Naměřená vyrobená energie v letech 2015, 2016 a 2018 (tabulky řazeny vzestupně, zprůměrovaná energie označena červeně)



## Přílohy

## Příloha 1-A - Výpočet celkové intenzity slunečního záření pro FVE-J (první část)

sklon $\alpha$ (°)	azimut $as$ (°)	nadm. výška $H$ (m)	měsíc $M$	den $D$	zem. šířka $\varphi$ (°)	$t$	sl. deklinace $\delta$ (°)	čas. úhel $\tau$ (°)	$\sinh$	výš. slunce $h$ (°)	$\sin a$	azm. slun. $a$ (°)	azm. preproc. $a$ (°)	$\cos y_l$
18	2	367	1	21	49,73	50,3	-20,04	45	0,168	9,666	0,674	42,365	42,365	0,392
18	2	367	2	21	49,73	80,0	-11,38	45	0,298	17,313	0,726	46,561	46,561	0,493
18	2	367	3	21	49,73	109,7	0,28	45	0,461	27,437	0,797	52,817	52,817	0,611
18	2	367	4	21	49,73	139,4	11,86	45	0,604	37,165	0,868	60,272	60,272	0,704
18	2	367	5	21	49,73	169,1	20,32	45	0,694	43,918	0,921	67,003	67,003	0,754
18	2	367	6	21	49,73	198,8	23,45	45	0,723	46,299	0,939	69,873	69,873	0,768
18	2	367	7	21	49,73	228,5	20,41	45	0,694	43,987	0,921	67,082	67,082	0,754
18	2	367	8	21	49,73	258,2	12,01	45	0,606	37,292	0,869	60,383	60,383	0,705
18	2	367	9	21	49,73	287,9	0,46	45	0,463	27,591	0,798	52,922	52,922	0,613
18	2	367	10	21	49,73	317,6	-11,22	45	0,300	17,451	0,727	46,641	46,641	0,495
18	2	367	11	21	49,73	347,3	-19,95	45	0,169	9,750	0,674	42,410	42,410	0,393
18	2	367	12	21	49,73	377,0	-23,44	45	0,116	6,656	0,653	40,782	40,782	0,349

## Příloha 1 - B - Výpočet celkové intenzity slunečního záření pro FVE-J (druhá část)

úhl. gama	clk. záření	přímý kolm.	přímé	difúzní	přím. vod.	dif. vod.	sl. konstanta	čin. zneč.
$\gamma(^{\circ})$	$I (W/m^2)$	$I_{pn} (W/m^2)$	$\epsilon (-)$	$IP (W/m^2)$	$ID (W/m^2)$	$I_{ph} (W/m^2)$	$I_{0} (W/m^2)$	$Z (-)$
66,934	210,147	402,362	2,586	157,644	52,502	67,560	53,063	1360
60,447	365,613	588,267	3,830	290,146	75,467	175,061	75,787	
52,303	563,559	775,322	5,410	474,103	89,456	357,244	88,902	
45,247	707,607	862,135	6,801	606,989	100,618	520,831	99,254	
41,084	791,636	911,413	7,670	686,972	104,664	632,185	102,681	
39,827	819,259	930,400	7,955	714,534	104,726	672,635	102,492	
41,046	789,852	907,075	7,679	684,100	105,752	629,962	103,803	
45,162	709,963	864,390	6,818	609,485	100,478	523,718	99,093	
52,184	562,185	768,646	5,433	471,282	90,903	356,003	90,383	
60,332	378,387	616,191	3,853	304,997	73,391	184,793	73,611	
66,862	215,138	414,389	2,600	162,835	52,303	70,174	52,844	
69,543	146,247	304,431	2,098	106,398	39,848	35,285	40,374	
								3,15
								3,21
								3,04
								3,1
								3,07
								3,02
								3,11
								3,09
								3,1
								3,05
								3,09
								3,14

## Příloha 2 - A - Zjištění poměrné doby svitu pro Plzeň (první půlka roku)

	leden		únor		bře		dub		kvě		čvn	
	8:03 16:16	8:13	7:38 17:01	9:23	6:48 17:48	11:00	6:42 19:37	12:55	5:43 20:24	14:41	5:03 21:05	16:02
	8:03 16:17	8:14	7:37 17:03	9:26	6:46 17:50	11:04	6:40 19:39	12:59	5:41 20:25	14:44	5:02 21:06	16:04
	8:03 16:18	8:15	7:35 17:04	9:29	6:44 17:51	11:07	6:38 19:40	13:02	5:39 20:27	14:48	5:01 21:07	16:06
	8:03 16:19	8:16	7:34 17:06	9:32	6:42 17:53	11:11	6:36 19:42	13:06	5:37 20:28	14:51	5:01 21:08	16:07
	8:03 16:20	8:17	7:32 17:08	9:36	6:40 17:55	11:15	6:34 19:44	13:10	5:36 20:30	14:54	5:00 21:09	16:09
	8:02 16:22	8:20	7:31 17:09	9:38	6:38 17:56	11:18	6:32 19:45	13:13	5:34 20:31	14:57	5:00 21:10	16:10
	8:02 16:23	8:21	7:29 17:11	9:42	6:36 17:58	11:22	6:30 19:47	13:17	5:32 20:33	15:01	4:59 21:10	16:11
	8:01 16:24	8:23	7:28 17:13	9:45	6:34 18:00	11:26	6:27 19:48	13:21	5:31 20:34	15:03	4:59 21:11	16:12
	8:01 16:25	8:24	7:26 17:15	9:49	6:32 18:01	11:29	6:25 19:50	13:25	5:29 20:36	15:07	4:59 21:12	16:13
	8:01 16:27	8:26	7:24 17:16	9:52	6:30 18:03	11:33	6:23 19:51	13:28	5:28 20:37	15:09	4:58 21:13	16:15
	8:00 16:28	8:28	7:22 17:18	9:56	6:28 18:04	11:36	6:21 19:53	13:32	5:26 20:38	15:12	4:58 21:13	16:15
	7:59 16:29	8:30	7:21 17:20	9:59	6:25 18:06	11:41	6:19 19:54	13:35	5:25 20:40	15:15	4:58 21:14	16:16
	7:59 16:31	8:32	7:19 17:21	10:02	6:23 18:08	11:45	6:17 19:56	13:39	5:23 20:41	15:18	4:58 21:15	16:17
	7:58 16:32	8:34	7:17 17:23	10:06	6:21 18:09	11:48	6:15 19:57	13:42	5:22 20:43	15:21	4:57 21:15	16:18
	7:57 16:34	8:37	7:15 17:25	10:10	6:19 18:11	11:52	6:13 19:59	13:46	5:21 20:44	15:23	4:57 21:16	16:19
	7:56 16:35	8:39	7:14 17:26	10:12	6:17 18:12	11:55	6:11 20:01	13:50	5:19 20:46	15:27	4:57 21:16	16:19
	7:56 16:37	8:41	7:12 17:28	10:16	6:15 18:14	11:59	6:09 20:02	13:53	5:18 20:47	15:29	4:57 21:16	16:19
	7:55 16:38	8:43	7:10 17:30	10:20	6:13 18:16	12:03	6:07 20:04	13:57	5:17 20:48	15:31	4:57 21:17	16:20
	7:54 16:40	8:46	7:08 17:32	10:24	6:10 18:17	12:07	6:05 20:05	14:00	5:15 20:50	15:35	4:58 21:17	16:19
	7:53 16:41	8:48	7:06 17:33	10:27	6:08 18:19	12:11	6:03 20:07	14:04	5:14 20:51	15:37	4:58 21:17	16:19
	7:52 16:43	8:51	7:04 17:35	10:31	6:06 18:20	12:14	6:01 20:08	14:07	5:13 20:52	15:39	4:58 21:18	16:20
	7:51 16:44	8:53	7:02 17:37	10:35	6:04 18:22	12:18	5:59 20:10	14:11	5:12 20:53	15:41	4:58 21:18	16:20
	7:50 16:46	8:56	7:00 17:38	10:38	6:02 18:23	12:21	5:57 20:11	14:14	5:11 20:55	15:44	4:58 21:18	16:20
	7:49 16:48	8:59	6:58 17:40	10:42	6:00 18:25	12:25	5:55 20:13	14:18	5:10 20:56	15:46	4:59 21:18	16:19
	7:47 16:49	9:02	6:56 17:42	10:46	5:57 18:26	12:29	5:53 20:14	14:21	5:09 20:57	15:48	4:59 21:18	16:19
	7:46 16:51	9:05	6:54 17:43	10:49	5:55 18:28	12:33	5:52 20:16	14:24	5:08 20:58	15:50	5:00 21:18	16:18
	7:45 16:52	9:07	6:52 17:45	10:53	5:53 18:30	12:37	5:50 20:18	14:28	5:07 21:00	15:53	5:00 21:18	16:18
	7:44 16:54	9:10	6:50 17:47	10:57	5:51 18:31	12:40	5:48 20:19	14:31	5:06 21:01	15:55	5:01 21:18	16:17
	7:42 16:56	9:14			6:49 19:33	12:44	5:46 20:21	14:35	5:05 21:02	15:57	5:01 21:18	16:17
	7:41 16:58	9:17			6:47 19:34	12:47	5:44 20:22	14:38	5:04 21:03	15:59	5:02 21:18	16:16
	7:40 16:59	9:19			6:45 19:36	12:51			5:03 21:04	16:01		
teor/den	8:41	8,41	10:08	10,10	11:55	11,92	13:47	13,78	15:24	15,4		16:15
skut/mes	31		56		118		139		195			200
poč. den	31		28		31		30		31			30
teor/mes	260,71		282,80		369,52		413,40		477,40			487,50
tau	0,119		0,198		0,319		0,336		0,408			0,410

## Příloha 2 - B - Zjištění poměrné doby svitu pro Plzeň (druhá půlka roku)

Čvc	Srp		Zář		Říj		Lis		Pro		
	16:15	5:36 20:48	15:12	6:22 19:50	13:28	7:06 18:45	11:39	6:55 16:44	9:49	7:42 16:08	
5:02 21:17	16:14	5:38 20:47	15:09	6:23 19:48	13:25	7:08 18:43	11:35	6:57 16:42	9:45	7:43 16:08	
5:04 21:17	16:13	5:39 20:45	15:06	6:25 19:46	13:21	7:09 18:41	11:32	6:59 16:41	9:42	7:44 16:07	
5:04 21:16	16:12	5:41 20:43	15:02	6:26 19:44	13:18	7:11 18:39	11:28	7:00 16:39	9:39	7:46 16:07	
5:05 21:16	16:11	5:42 20:42	15:00	6:28 19:42	13:14	7:12 18:37	11:25	7:02 16:37	9:35	7:47 16:07	
5:06 21:15	16:09	5:44 20:40	14:56	6:29 19:40	13:11	7:14 18:34	11:20	7:04 16:36	9:32	7:48 16:06	
5:07 21:15	16:08	5:45 20:39	14:54	6:30 19:38	13:08	7:15 18:32	11:17	7:05 16:34	9:29	7:49 16:06	
5:08 21:14	16:06	5:46 20:37	14:51	6:32 19:35	13:03	7:17 18:30	11:13	7:07 16:33	9:26	7:50 16:06	
5:09 21:14	16:05	5:48 20:35	14:47	6:33 19:33	13:00	7:18 18:28	11:10	7:08 16:31	9:23	7:51 16:06	
5:10 21:13	16:03	5:49 20:33	14:44	6:35 19:31	12:56	7:20 18:26	11:06	7:10 16:30	9:20	7:52 16:05	
5:11 21:12	16:01	5:51 20:32	14:41	6:36 19:29	12:53	7:21 18:24	11:03	7:12 16:28	9:16	7:53 16:05	
5:12 21:12	16:00	5:52 20:30	14:38	6:38 19:27	12:49	7:23 18:22	10:59	7:13 16:27	9:14	7:54 16:05	
5:13 21:11	15:58	5:54 20:28	14:34	6:39 19:24	12:45	7:25 18:20	10:55	7:15 16:26	9:11	7:55 16:05	
5:14 21:10	15:56	5:55 20:26	14:31	6:41 19:22	12:41	7:26 18:18	10:52	7:17 16:24	9:07	7:56 16:05	
5:15 21:09	15:54	5:57 20:24	14:27	6:42 19:20	12:38	7:28 18:16	10:48	7:18 16:23	9:05	7:57 16:06	
5:16 21:08	15:52	5:58 20:22	14:24	6:44 19:18	12:34	7:29 18:14	10:45	7:20 16:22	9:02	7:58 16:06	
5:17 21:07	15:50	6:00 20:21	14:21	6:45 19:16	12:31	7:31 18:12	10:41	7:21 16:21	9:00	7:58 16:06	
5:18 21:06	15:48	6:01 20:19	14:18	6:47 19:14	12:27	7:32 18:10	10:38	7:23 16:19	8:56	7:59 16:06	
5:20 21:05	15:45	6:02 20:17	14:15	6:48 19:11	12:23	7:34 18:08	10:34	7:24 16:18	8:54	8:00 16:07	
5:21 21:04	15:43	6:04 20:15	14:11	6:50 19:09	12:19	7:36 18:06	10:30	7:26 16:17	8:51	8:00 16:07	
5:22 21:03	15:41	6:05 20:13	14:08	6:51 19:07	12:16	7:37 18:04	10:27	7:28 16:16	8:48	8:01 16:08	
5:23 21:02	15:39	6:07 20:11	14:04	6:53 19:05	12:12	7:39 18:02	10:23	7:29 16:15	8:46	8:01 16:08	
5:24 21:01	15:37	6:08 20:09	14:01	6:54 19:03	12:09	7:41 18:00	10:19	7:31 16:14	8:43	8:02 16:09	
5:26 20:59	15:33	6:10 20:07	13:57	6:56 19:00	12:04	7:42 17:58	10:16	7:32 16:13	8:41	8:02 16:09	
5:27 20:58	15:31	6:11 20:05	13:54	6:57 18:58	12:01	7:44 16:56	10:12	7:33 16:13	8:40	8:02 16:10	
5:28 20:57	15:29	6:13 20:03	13:50	6:59 18:56	11:57	7:45 16:54	10:09	7:35 16:12	8:37	8:03 16:11	
5:30 20:55	15:25	6:14 20:01	13:47	7:00 18:54	11:54	7:47 16:53	10:06	7:36 16:11	8:35	8:03 16:11	
5:31 20:54	15:23	6:16 19:59	13:43	7:02 18:52	11:50	7:49 16:51	10:02	7:38 16:10	8:32	8:03 16:12	
5:32 20:53	15:21	6:17 19:57	13:40	7:03 18:50	11:47	7:50 16:49	9:59	7:39 16:10	8:31	8:03 16:13	
5:34 20:51	15:17	6:19 19:55	13:36	7:05 18:47	11:42	7:52 16:47	9:55	7:40 16:09	8:29	8:03 16:14	
5:35 20:50	15:15	6:20 19:52	13:32	7:06 18:45	11:38	7:54 16:46	9:52	7:41 16:08	8:28	8:03 16:15	
16,25	15,49	15,82	14,23	14,38	12,35	12,58	10,44	10,73	9,05	9,1	8,12
	197		202		134		86		46		37
	31		31		30		31		30		31
	490,42		445,78		377,40		332,63		273,00		251,72
	0,402		0,453		0,355		0,259		0,168		0,147

### Příloha 3 - A - Produkce FVE-J (Teoretické množství energie a energie difúzního záření dopadající na FVE-J)

Teoreticky možná energie dopadající za den Qsdenteor																							
hodina	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Qsdenteor					
čas. úhel (°)	-120	-105	-90	-75	-60	-45	-30	-15	0	15	30	45	60	75	90	105	120	(Wh/m <sup>2</sup> )					
leden	0	0	0	1	49	204	351	449	485	452	356	210	52	2	0	0	0	2611,832					
únor	0	0	0	16	171	357	515	619	656	623	522	366	178	18	0	0	0	4040,153					
březen	0	0	2	143	348	552	717	825	864	830	727	564	360	151	3	0	0	6086,502					
duben	0	0	88	275	492	695	858	964	1002	969	867	708	506	288	96	0	0	7805,466					
květen	0	37	167	367	582	779	936	1037	1074	1042	945	792	596	382	178	37	0	8950,730					
červen	3	48	198	400	613	806	960	1060	1096	1065	970	819	627	415	211	54	3	9346,807					
červenec	0	38	167	367	580	777	934	1035	1071	1040	943	790	595	381	179	38	0	8934,021					
srpen	0	0	89	277	494	697	860	966	1004	971	870	710	508	290	97	0	0	7833,540					
září	0	0	2	143	348	550	716	823	862	828	725	562	360	152	4	0	0	6076,122					
říjen	0	0	0	19	180	369	529	634	672	638	537	378	188	21	0	0	0	4164,645					
listopad	0	0	0	1	52	209	357	456	491	459	362	215	55	2	0	0	0	2659,000					
prosinec	0	0	0	0	15	142	280	375	410	378	285	146	17	0	0	0	0	2049,079					
Energie difúzního záření dopadající za den Qdden																							
hodina	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Qdden					
čas. úhel (°)	-120	-105	-90	-75	-60	-45	-30	-15	0	15	30	45	60	75	90	105	120	(Wh/m <sup>2</sup> )					
leden	0	0	0	0	16	53	70	78	81	78	70	53	16	0	0	0	0	514,518					
únor	0	0	0	6	53	75	87	93	95	93	87	75	53	6	0	0	0	722,570					
březen	0	0	2	52	77	89	97	100	102	100	97	89	77	52	2	0	0	935,535					
duben	0	0	50	77	92	101	106	109	110	109	106	101	92	77	50	0	0	1177,041					
květen	0	37	69	87	98	105	109	111	112	111	109	105	98	87	69	37	0	1343,993					
červen	3	48	73	89	98	105	109	111	112	111	109	105	98	89	73	48	3	1382,451					
červenec	0	38	70	88	99	106	110	113	113	113	110	106	99	88	70	38	0	1358,220					
srpen	0	0	50	77	92	100	106	109	110	109	106	100	92	77	50	0	0	1176,547					
září	0	0	2	53	78	91	98	102	103	102	98	91	78	53	2	0	0	953,006					
říjen	0	0	0	6	52	73	84	90	92	90	84	73	52	6	0	0	0	703,307					
listopad	0	0	0	0	17	52	69	77	80	77	69	52	17	0	0	0	0	511,369					
prosinec	0	0	0	0	0	40	61	71	73	71	61	40	0	0	0	0	0	415,691					

## Příloha 3 - B - Produkce FVE-J (elektrická energie)

poč. dní v měs.	tau (-)	Qsden (Wh/m2)	Qsmes (kWh/m2)	Qsrok (kWh/m2)	úč. modulu (-)	úč. střídače (-)	úč. plocha (m2)	poč. panelů	odhad výroby (kWh)
31	0,119	763,901	23,681	967,613	0,1475	0,951	1,46016	60	11891,205
28	0,198	1379,517	38,626						
31	0,319	2580,409	79,993						
30	0,336	3405,757	102,173						
31	0,408	4451,060	137,983						
30	0,410	4649,879	139,496						
31	0,402	4401,393	136,443						
31	0,453	4193,085	129,986						
30	0,355	2772,025	83,161						
31	0,259	1598,220	49,545						
30	0,168	873,241	26,197						
31	0,147	655,781	20,329						

## Příloha 4 - Vygenerované tabulky cosy a sinh pro FVE-J (sinh shodné pro všechny FVE)

cos $\gamma$	-120	-105	-90	-75	-60	-45	-30	-15	0	15	30	45	60	75	90	105	120
čas. uhel	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
hodina																	
leden	-0,50	-0,40	-0,19	0,02	0,21	0,38	0,51	0,59	0,62	0,59	0,52	0,39	0,23	0,04	-0,17	-0,38	-0,49
únor	-0,38	-0,29	-0,11	0,10	0,30	0,48	0,61	0,70	0,73	0,70	0,62	0,49	0,32	0,12	-0,09	-0,27	-0,36
leden	-0,19	-0,10	-0,01	0,21	0,42	0,60	0,73	0,82	0,85	0,83	0,74	0,61	0,44	0,23	0,02	-0,08	-0,18
březen	-0,32	-0,12	0,10	0,31	0,52	0,69	0,82	0,91	0,94	0,91	0,83	0,70	0,53	0,33	0,12	-0,10	-0,30
leden	-0,22	-0,03	0,17	0,38	0,57	0,74	0,87	0,95	0,98	0,96	0,88	0,75	0,59	0,40	0,19	-0,01	-0,21
duben	-0,19	0,00	0,20	0,40	0,59	0,75	0,88	0,96	0,99	0,97	0,89	0,77	0,61	0,42	0,22	0,02	-0,17
leden	-0,22	-0,03	0,17	0,38	0,57	0,74	0,87	0,95	0,98	0,96	0,88	0,75	0,59	0,40	0,19	-0,01	-0,21
květen	-0,32	-0,12	0,10	0,31	0,52	0,69	0,82	0,91	0,94	0,92	0,84	0,71	0,53	0,33	0,12	-0,10	-0,30
leden	-0,19	-0,10	0,00	0,21	0,42	0,60	0,74	0,82	0,85	0,83	0,75	0,61	0,44	0,23	0,02	-0,08	-0,17
červen	-0,38	-0,29	-0,11	0,10	0,31	0,48	0,61	0,70	0,73	0,71	0,63	0,49	0,32	0,12	-0,09	-0,27	-0,36
leden	-0,50	-0,40	-0,19	0,02	0,21	0,38	0,51	0,59	0,62	0,60	0,52	0,39	0,23	0,04	-0,17	-0,38	-0,49
červenec	-0,55	-0,42	-0,22	-0,02	0,17	0,34	0,46	0,54	0,57	0,55	0,47	0,35	0,19	0,00	-0,20	-0,40	-0,53
sinh	-120	-105	-90	-75	-60	-45	-30	-15	0	15	30	45	60	75	90	105	120
leden	-0,57	-0,42	-0,26	-0,10	0,04	0,17	0,26	0,33	0,35	0,33	0,26	0,17	0,04	-0,10	-0,26	-0,42	-0,57
únor	-0,47	-0,31	-0,15	0,01	0,17	0,30	0,40	0,46	0,48	0,46	0,40	0,30	0,17	0,01	-0,15	-0,31	-0,47
březen	-0,32	-0,16	0,00	0,17	0,33	0,46	0,56	0,63	0,65	0,63	0,56	0,46	0,33	0,17	0,00	-0,16	-0,32
duben	-0,16	-0,01	0,16	0,32	0,47	0,60	0,70	0,77	0,79	0,77	0,70	0,60	0,47	0,32	0,16	-0,01	-0,16
květen	-0,04	0,11	0,27	0,42	0,57	0,69	0,79	0,85	0,87	0,85	0,79	0,69	0,57	0,42	0,27	0,11	-0,04
červen	0,01	0,15	0,30	0,46	0,60	0,72	0,82	0,88	0,90	0,88	0,82	0,72	0,60	0,46	0,30	0,15	0,01
červenec	-0,04	0,11	0,27	0,42	0,57	0,69	0,79	0,85	0,87	0,85	0,79	0,69	0,57	0,42	0,27	0,11	-0,04
srpen	-0,16	0,00	0,16	0,32	0,47	0,61	0,71	0,77	0,79	0,77	0,71	0,61	0,47	0,32	0,16	0,00	-0,16
září	-0,32	-0,16	0,01	0,17	0,33	0,46	0,57	0,63	0,65	0,63	0,57	0,46	0,33	0,17	0,01	-0,16	-0,32
říjen	-0,47	-0,31	-0,15	0,02	0,17	0,30	0,40	0,46	0,49	0,46	0,40	0,30	0,17	0,02	-0,15	-0,31	-0,47
listopad	-0,56	-0,42	-0,26	-0,10	0,04	0,17	0,27	0,33	0,35	0,33	0,27	0,17	0,04	-0,10	-0,26	-0,42	-0,56
prosinec	-0,60	-0,46	-0,30	-0,15	-0,01	0,12	0,21	0,27	0,29	0,27	0,21	0,12	-0,01	-0,15	-0,30	-0,46	-0,60

Příloha 5 - Difúzní záření  $I_{DH}$  pro FVE-J (shodné pro všechny FVE)

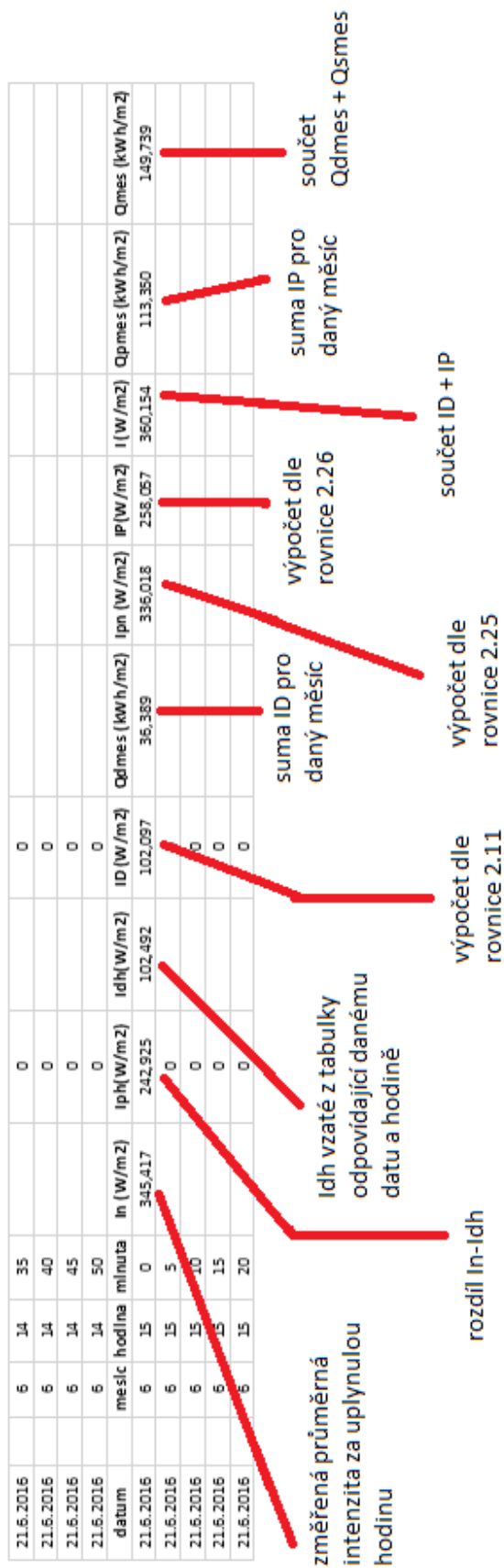
$I_{dh}$	-120	-105	-90	-75	-60	-45	-30	-15	0	15	30	45	60	75	90	105	120
čas. uhel hodina	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
leden	0	0	0	0	17	53	70	78	81	78	70	53	17	0	0	0	0
únor	0	0	0	6	53	76	87	93	94	93	87	76	53	6	0	0	0
březen	0	0	2	53	77	89	96	99	100	99	96	89	77	53	2	0	0
duben	0	0	50	77	91	99	104	106	107	106	104	99	91	77	50	0	0
květen	0	38	69	86	97	103	106	108	109	108	106	103	97	86	69	38	0
červen	3	48	74	88	97	102	106	108	108	108	106	102	97	88	74	48	3
červenec	0	38	70	87	98	104	108	110	110	110	108	104	98	87	70	38	0
srpen	0	0	51	77	91	99	104	106	107	106	104	99	91	77	51	0	0
září	0	0	3	54	78	90	97	101	102	101	97	90	78	54	3	0	0
říjen	0	0	0	6	52	74	84	89	91	89	84	74	52	6	0	0	0
listopad	0	0	0	0	17	53	70	77	80	77	70	53	17	0	0	0	0
prosinec	0	0	0	0	0	40	61	71	74	71	61	40	0	0	0	0	0



**Příloha 6 - Příkaz pro vygenerování tabulky cosy (obdobný i pro Idh a sinh)**

```
Sub cosgama ()
Dim i As Integer
    For i = 2 To 20
        Workbooks ("dopadajici_energie_jih").Activate
        Cells(1, i).Copy
        Workbooks ("vypocty_odhadu1").Activate
        Sheets ("19,2J").Select
        Range ("I3").Select
        ActiveSheet.Paste
        Application.CutCopyMode = False
        Selection.AutoFill Destination:=Range ("I3:I14"), Type:=xlFillDefault
        Range ("I3:I14").Select
        Range ("O3:O14").Select
        Selection.Copy
        Workbooks ("dopadajici_energie_jih").Activate|
        Sheets ("List1").Select
        Cells(3, i).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
            :=False, Transpose:=False
    Next i
End Sub
```

**Příloha 7 - Ilustrace tabulky pro výpočet dopadající energie na skloněnou plochu FVE-J za uplynulou hodinu pro jeden metr čtvereční**



## Příloha 8 - Příkaz pro stanovení Idh pro každou hodinu v daném období (v příkaze pro jeden rok)

```

Sub idhdoplne()
Dim i As Integer
Dim j As Long
Dim k As Integer

For j = 16 To 125000 'projede řádky osvitu po určité dobu (1 měsíc = cca 9000 řádků)
    For k = 3 To 14 'projede sloupec měsíců tabulky "Idh"
        For i = 22 To 40 'projede řádek hodin tabulky "Idh"
            If Cells(j, 5).Value = 0 And Cells(2, i).Value = Cells(j, 4).Value And Cells(k, 21).Value = Cells(j, 3).Value Then
                'výbere odpovídající hodnotu "Idh" na základě datumu a času
                Cells(j, 8).Value = Cells(k, i).Value
                'vzorec: Idh = Idh(výbráné)
            End If
            If Cells(j, 8).Value > Cells(j, 6) Then 'v případě, že je Iclk menší než tabulkové Idh, potom Idh = Iclk
                Cells(j, 8).Value = Cells(j, 6)
            End If
        Next i
    Next k
Next j
End Sub

```

## Příloha 9 - Příkaz pro vypočtení Ipn pro každou hodinu v daném období

```

Sub ipnvypocet ()
Dim j As Long
Dim k As Long
Dim i As Long

For j = 16 To 125000 'projede řádky osvitu po určité dobu (1 měsíc = cca 9000 řádků)
    For k = 16 To 27 'projede sloupec měsíců tabulky "sinh"
        For i = 22 To 39 'projede řádek hodin tabulky "sinh"
            If Cells(j, 5).Value = 0 And Cells(2, i).Value = Cells(j, 4).Value And Cells(k, 21).Value = Cells(j, 3).Value Then
                'výbere odpovídající hodnotu "sinh" na základě datumu a času
                Cells(CLng(j), 11).Value = (Cells(CLng(j), 7).Value) / (Cells(CLng(k), CLng(i)).Value)
                'vzorec: Ipn = Iph / sinh
            End If
            If Cells(j, 11) < 0 Then 'eliminace záporných hodnot = pokud vyjde záporně, již není žádné sluneční záření
                Cells(j, 11).Value = 0
            End If
        Next i
    Next k
Next j
End Sub

```

## Příloha 10 - Příkaz pro vypočtení Ip pro každou hodinu v daném období

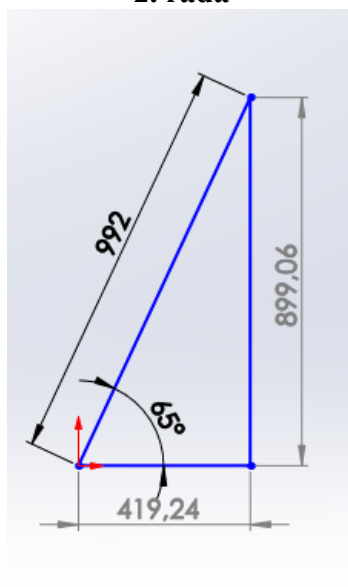
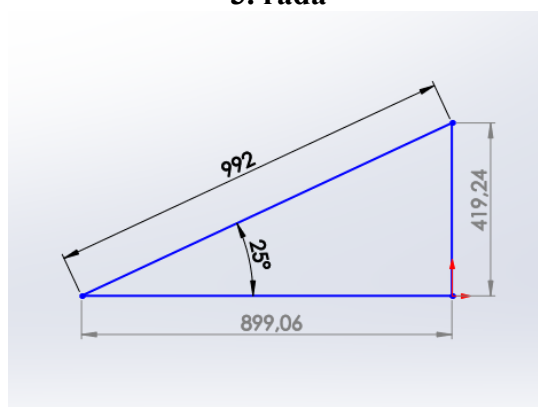
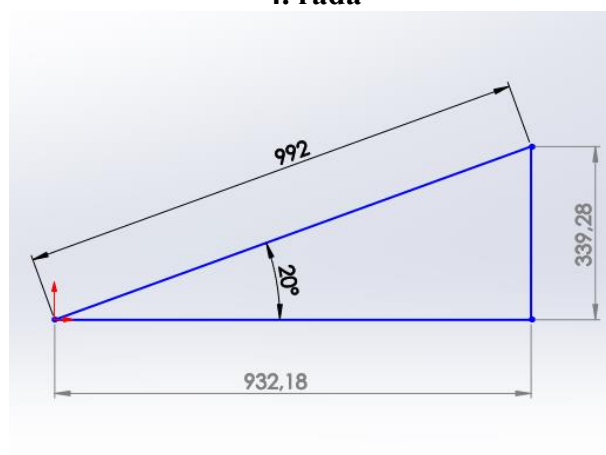
```

Sub ipvypocet ()
Dim i As Integer
Dim j As Long
Dim k As Integer

For j = 16 To 125000 'projede řádky osvitů po určité době (1 měsíc = cca 9000 řádků)
For k = 3 To 14 'projede sloupec měsíců tabulky "cosgama"
For i = 2 To 20 'projede řádek hodin tabulky "cosgama"
If Cells(j, 5).Value = 0 And Cells(2, i).Value = Cells(j, 4).Value And Cells(k, 1).Value = Cells(j, 3).Value Then
'vybere z vygenerované tabulky odpovídající hodnotu "cosgama" na základě datumu a času
Cells(CLng(j), 12).Value = Cells(j, 11).Value * Cells(k, i).Value
'vzorec: Ip = Ipn * cosgama
End If
If Cells(j, 12) < 0 Then ' v případě záporné hodnoty bude výsledek roven nule, aby neovlivňoval celkovou Qmes
Cells(j, 12).Value = 0
End If
Next i
Next k
Next j
End Sub

```



**Příloha 12 - Naměřené sklony modulů FVE-Z (1. řada (nejníže umístěná) je pod úhlem 90°.)****2. řada****3. řada****4. řada**

**Příloha 13 - Úhel dopadu paprsků slunečního záření na moduly FVE-S v průběhu roku cosy (při záporných hodnotách nedopadá žádné přímé záření na moduly)**

<b>cosy</b>	-120	-105	-90	-75	-60	-45	-30	-15	0	15	30	45	60	75	90	105	120
<b>čas. úhel</b>																	
<b>hodina</b>	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
leden	-0,41	-0,24	-0,30	-0,37	-0,43	-0,49	-0,54	-0,57	-0,58	-0,58	-0,56	-0,53	-0,48	-0,42	-0,36	-0,29	-0,45
únor	-0,44	-0,20	-0,16	-0,23	-0,30	-0,36	-0,41	-0,44	-0,46	-0,45	-0,43	-0,40	-0,35	-0,29	-0,22	-0,26	-0,49
březen	-0,47	-0,23	0,03	-0,04	-0,11	-0,17	-0,22	-0,25	-0,27	-0,26	-0,24	-0,21	-0,16	-0,09	-0,03	-0,29	-0,52
duben	0,35	0,29	0,23	0,16	0,09	0,03	-0,02	-0,05	-0,07	-0,07	-0,05	-0,01	0,04	0,10	0,17	0,24	0,31
květen	0,48	0,43	0,36	0,29	0,23	0,17	0,13	0,10	0,08	0,08	0,10	0,14	0,18	0,24	0,31	0,37	0,44
červen	0,53	0,47	0,41	0,34	0,28	0,23	0,18	0,15	0,13	0,14	0,15	0,19	0,24	0,29	0,36	0,42	0,48
červenec	0,49	0,43	0,36	0,30	0,23	0,18	0,13	0,10	0,08	0,08	0,10	0,14	0,19	0,24	0,31	0,38	0,44
srpen	0,36	0,30	0,23	0,16	0,09	0,03	-0,01	-0,05	-0,06	-0,06	-0,04	-0,01	0,04	0,10	0,17	0,24	0,31
září	-0,47	-0,23	0,03	-0,03	-0,10	-0,16	-0,21	-0,25	-0,26	-0,26	-0,24	-0,20	-0,15	-0,09	-0,03	-0,29	-0,52
říjen	-0,44	-0,20	-0,16	-0,23	-0,30	-0,35	-0,40	-0,44	-0,45	-0,45	-0,43	-0,40	-0,34	-0,28	-0,22	-0,26	-0,49
listopad	-0,41	-0,24	-0,30	-0,37	-0,43	-0,49	-0,54	-0,57	-0,58	-0,58	-0,56	-0,53	-0,48	-0,42	-0,36	-0,29	-0,45
prosinec	-0,39	-0,29	-0,36	-0,42	-0,48	-0,54	-0,58	-0,62	-0,63	-0,63	-0,61	-0,58	-0,53	-0,47	-0,41	-0,34	-0,44



**Příloha 14 - Naměřená vyrobená energie v letech 2015, 2016 a 2018 (tabulky řazeny vzestupně, zprůměrovaná energie označena červeně)**

měsíc	FVE-S (kWh)	FVE-J1 (kWh)	FVE-Z (kWh)	FVE-J2 (kWh)
leden	52,6	240,1	138,0	240,1
únor	61,5	280,8	161,4	280,8
březen	135	500	350	500
duben	202,4	811,1	543,9	808,5
květen	301,8	992,9	693,4	988,6
červen	369,9	996,5	743,3	991,7
červenec	331,3	1010,9	663,6	1008,3
srpen	198,3	1035,3	684,9	1032,9
září	123,9	790,5	481,4	789,3
říjen	62,8	333,3	203,1	328,6
listopad	52,8	241,2	137,6	237,6
prosinec	33,0	139,0	94,4	139,4
<b>celkem</b>	<b>1925,3</b>	<b>7371,6</b>	<b>4895,0</b>	<b>7345,9</b>
měsíc	FVE-S (kWh)	FVE-J1 (kWh)	FVE-Z (kWh)	FVE-J2 (kWh)
leden	29,9	149,7	86,8	150,4
únor	68,6	365	220,7	360,4
březen	155,1	671,5	491,4	667,6
duben	217,2	969,8	582	970
květen	314	989,2	674,5	988,2
červen	354,4	987,6	669,6	986,3
červenec	355,9	1099,6	797,1	1107
srpen	203,1	1040,3	658,2	1039,7
září	144,7	694,8	417,4	695,5
říjen	76,4	384,3	223,2	384,1
listopad	49,8	248,6	142,9	248,7
prosinec	33,4	176,9	88,5	179,7
<b>celkem</b>	<b>2002,6</b>	<b>7777,3</b>	<b>5052,3</b>	<b>7777,6</b>
měsíc	FVE-S (kWh)	FVE-J1 (kWh)	FVE-Z (kWh)	FVE-J2 (kWh)
leden	35	181,1	104,1	181,1
únor	100	434,5	249,7	434,5
březen	131,1	547,4	319,4	511,2
duben	177,1	1012,9	658,7	989,4
květen	296,8	1124,6	738,2	1094,8
červen	363,5	991,2	680,2	968,6
červenec	340,6	1162,2	724,1	1138,7
srpen	185,5	910,0	641,8	892,7
září	111,5	861,6	502,7	846,1
říjen	80,90	546,00	332,7	535,10
listopad	43,10	214,70	125,90	210,70
prosinec	32,60	101,00	65,70	99,10
<b>celkem</b>	<b>1897,6</b>	<b>8087,2</b>	<b>5143,2</b>	<b>7902,0</b>

**Příloha 15 – Reálné rozvržení FV modulů FVE-Z**

