

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektroenergetiky**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Kontrola parametrů FVE malého výkonu**

## ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2020/2021

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

Jméno a příjmení: **Bc. Pavína STRNADOVÁ**  
Osobní číslo: **E19N0080P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektroenergetika**  
Téma práce: **Kontrola parametrů FVE malého výkonu**  
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky**

#### Zásady pro vypracování

1. Popište analyzovaný systém, jeho parametry a komponenty.
2. Porovnejte reálnou výrobu elektrické energie se softwarovou simulací.
3. Proveďte základní kontrolní měření systému pomocí termografie.
4. Změřte podrobně V-A charakteristiky jednotlivých panelů.
5. Zhodnoťte výsledky měření a navrhněte doporučení k odstranění případných problémů.



*[Handwritten signature]*

*[Handwritten signature]*

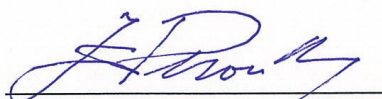
Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**  
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

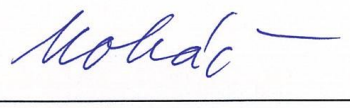
1. Poulek, Libra: Solární energie, ČZU, 2005

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

Datum zadání diplomové práce: **9. října 2020**  
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2021**

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



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

V Plzni dne 9. října 2020

**Dodatek k zadání Diplomové práce**  
**Fakulty elektrotechnické ZČU v Plzni v akademickém roce 2020/2021**

V souvislosti s krizovým opatřením vyhlášeným dle krizového zákona a mimořádným opatřením vydaným podle zvláštního zákona, na základě kterých došlo k omezení osobní přítomnosti studentů v prostorách vysoké školy a s ohledem na nutnost využití infrastruktury FEL při vypracování kvalifikační práce v období tohoto omezení a v plné míře s přihlédnutím k realizovatelnosti práce po dobu trvání tohoto omezení se v intencích čl. 54 odst. 4 Studijního a zkušebního řádu Západočeské univerzity v Plzni upravuje zadání práce takto:

1. Popište analyzovaný systém, jeho parametry a komponenty.
2. Porovnejte reálnou výrobu elektrické energie se softwarovou simulací.
3. Analyzujte přesnost výsledků s ohledem na reálnou degradaci panelů a jednotlivé parametry simulace.
4. Ověřte výsledky simulací s teoretickými výpočty.
5. Zhodnoťte analyzovaný systém a navrhněte opatření ke zvýšení efektivity provozu.

V Plzni dne 6.4.2021



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

Beru na vědomí a souhlasím.

V Plzni dne 6.4.2021



Student: Bc. Pavλίna Strnadová

V Plzni dne



prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.

děkan Fakulty elektrotechnické  
Západočeské univerzity v Plzni

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na softwarový návrh fotovoltaického systému malého výkonu a na optimalizaci tohoto systému prostřednictvím softwaru PVsyst. V diplomové práci jsou rozebrány jednotlivé parametry, komponenty, konstrukce, instalace a designy FVE. Další část práce se zabývá softwarovým návrhem FVE a reálnou výrobou FVE, které následně porovnává. V další části je provedena simulace s ohledem na časovou degradaci a na parametry analyzované elektrárny v softwaru PVsyst. Tato simulace je následně porovnána s reálnou výrobou. Poslední část se pak zabývá optimalizací výroby tohoto systému pomocí softwaru PVsyst.

## **Klíčová slova**

Fotovoltaická elektrárna, fotovoltaický článek, fotovoltaický panel, návrh elektrárny, PVsyst, softwarová simulace, reálná výroba, časová degradace, optimalizace výroby

## **Abstract**

The master thesis focuses on the software design of a small PV power plant and optimization of this system through PVsyst software. This work deals with individual parameters, components, constructions and installations of PV power plants. The next part of this thesis deals with the software design of a photovoltaic power plant and the actual production of PV power plant, then they are compared. The next part of master thesis deals with a time degradation and the parameters of the system in PVsyst software and the actual production, then they are compared. The last part of this thesis deals with the optimization of the production of this system in the software PVsyst.

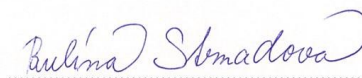
## **Key words**

Photovoltaic power plant, photovoltaic cell, photovoltaic panel, power plant design, PVsyst, software simulation, real production, time degradation, optimization of production

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala 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 26.5.2021

Pavλίna Strnadová

## **Poděkování**

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu diplomové práce Ing. Milanovi Bělíkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych chtěla poděkovat Bc. Radku Natovovi za poskytnutí upravených meteorologických dat.



# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>11</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>12</b>
<b>FOTOVOLTAICKÁ ELEKTRÁRNA</b> .....	<b>13</b>
1.1 PRINCIP ČINNOSTI FOTOVOLTAICKÉHO ČLÁNKU.....	13
1.2 ROZDĚLENÍ FVE.....	14
1.3 UMÍSTĚNÍ FVE.....	17
1.4 FOTOVOLTAICKÝ ČLÁNEK.....	20
1.5 PARAMETRY FVE.....	22
1.6 KONSTRUKCE FVE.....	24
• Konstrukce pro šikmé střešní systémy.....	24
• Konstrukce pro ploché střechy.....	25
• Konstrukce na fasádu.....	26
• Konstrukce pro volná prostranství.....	27
• Konstrukce pro polohovatelné systémy (trackery).....	27
1.7 STŘÍDAČ.....	28
1.7.1 Regulace napětí.....	29
1.7.2 Účinnost střídače.....	29
1.7.3 Sběr provozních dat.....	30
1.8 ROZVADĚČ GENERÁTORU (PŘIPOJOVACÍ SKŘÍŇ).....	32
1.9 ROZVADĚČOVÁ SKŘÍŇ (ROZVADĚČ).....	34
1.10 VEDENÍ FVE.....	35
<b>2 SOFTWAREVÁ SIMULACE A REÁLNÁ VÝROBA EL. ENERGIE</b> .....	<b>38</b>
2.1 SOFTWAREVÁ SIMULACE.....	38
2.1.1 Model simulace.....	38
2.1.2 Výsledky simulace.....	40
2.2 REÁLNÁ VÝROBA.....	42
2.3 POROVNÁNÍ REÁLNÉ VÝROBY SE SOFTWAREVOU SIMULACÍ.....	43
<b>3 SOFTWAREVÁ SIMULACE ZAHRNÚJÍCÍ DEGRADACI A PARAMETRY FVE</b> .....	<b>45</b>
3.1 SIMULACE ZAHRNÚJÍCÍ DEGRADACI FV PANELŮ.....	45
3.1.1 Model simulace.....	45
3.2 ZHODNOCENÍ PŘESNOSTI SIMULACE.....	53
<b>4 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ SIMULACÍ S TEORETICKÝMI VÝPOČTY</b> .....	<b>57</b>
4.1 POSTUP VÝPOČTU.....	57
4.1.1 Celková intenzita záření dopadající na panel.....	58
4.1.2 Celkové množství energie dopadající na panel.....	62
4.1.3 Celková vyrobená elektrická energie.....	64
4.2 ZHODNOCENÍ TEORETICKÉHO VÝPOČTU.....	65
<b>5 OPTIMALIZACE ANALYZOVANÉ FVE</b> .....	<b>67</b>
5.1 ZHODNOCENÍ STAVU ANALYZOVANÉ ELEKTRÁRNY.....	67
5.2 ZHODNOCENÍ AZIMUTU A ORIENTACE ANALYZOVANÉ ELEKTRÁRNY.....	68
5.2.1 Model simulace.....	68
5.2.2 Výsledky simulace.....	72
5.3 ZHODNOCENÍ STÁVAJÍCÍHO STŘÍDAČE ANALYZOVANÉ ELEKTRÁRNY.....	74
5.4 ZHODNOCENÍ UMÍSTĚNÍ STÁVAJÍCÍHO STŘÍDAČE ANALYZOVANÉ ELEKTRÁRNY.....	78
5.5 PŘIPOJENÍ BATERIE V REŽIMU PEAK-SHAVING.....	81
5.5.1 Model simulace.....	81

---

5.5.2	Výsledky simulace.....	82
5.6	ROZDĚLENÍ SYSTÉMU NA OSTROVNÍ A SÍŤOVÝ SYSTÉM.....	83
5.6.1	Ostrovni systém – systém pro napájení záložních výtahů.....	84
5.6.2	Síťový systém – pro napájení vlastní spotřeby budovy FEL ZČU.....	87
<b>ZÁVĚR.....</b>		<b>91</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....</b>		<b>93</b>

## Seznam symbolů a zkratk

A .....	výška slunce
AM.....	Air Mass
$\beta$ .....	teplotní koeficient (%/°C)
$\Delta P_{MP}$ .....	tolerance výkonu (%)
eV .....	elektronvolt
FVE.....	fotovoltaická elektrárna
FF.....	faktor plnění (%)
$\gamma$ .....	teplotní koeficient (%/°C)
$\gamma_s$ .....	poloha slunce
$I_{SC}$ .....	proud nakrátko (A)
$I_{MPP}$ .....	proud max. výkonu (A)
$\Delta P_{MP}$ .....	tolerance výkonu (%)
MPPT.....	Maximum Power Point Tracker
$\eta$ .....	jmenovitá účinnost (%)
$P_{MPP}$ .....	jmenovitý výkon (W)
STC.....	Standard Test Conditions
$U_{pmin}$ .....	rozsah vstupního napětí střídače (V)
$U_{ocmax}$ .....	maximální vstupní napětí střídače (V)
$U_{OC}$ .....	napětí naprázdno (V)
$U_{MPP}$ .....	napětí max. výkonu (V)
$U_{max}$ .....	maximální systémové napětí (V)
$W_p$ .....	Watt-peak

## Úvod

Kvůli značnému růstu tlaku na využívání obnovitelných energetických zdrojů, nastal s příchodem 21. století prudký vývoj FVE. Nejen v ČR, ale i ve světě nastal prudký rozvoj technologií solárního článku. V loňském roce bylo v ČR instalováno 6 293 nových solárních elektráren s celkovým výkonem 51,4 MW. Což v porovnání s rokem 2019 znamená nárůst o 26,3 MW, tedy o 104 %. Mezi hlavní důvody tohoto rozvoje patří skutečnost, že uživatelé těchto elektráren mohou využívat zákonem stanovené dotační podmínky, přičemž je zajištěna garance výkupních cen. Další výhodou je jednoduchost elektrárny a skutečnost, že fotovoltaická elektrárna je takřka bezúdržbová a dá se instalovat prakticky všude.

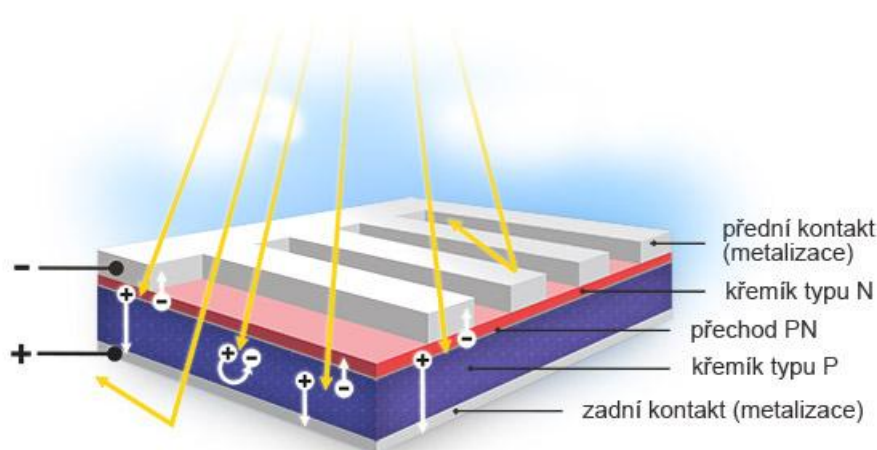
Tato diplomová práce se zabývá analýzou fotovoltaické elektrárny umístěné na střeše budovy fakulty Elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Diplomová práce je rozdělena do 5 částí. První část je zaměřena na teoretický úvod do fotovoltaického systému a popis parametrů a jednotlivých komponent analyzovaného systému. Další část se zabývá nasimulováním analyzovaného systému v programu PVsyst včetně porovnáním nasimulovaného množství elektrické energie s reálnou vyrobenou elektrickou energií. Třetí část je zaměřena na zhodnocení přesnosti výsledků simulace s ohledem na reálnou degradaci panelů a jednotlivé parametry simulace. Ve čtvrté části nalezneme teoretické výpočty vyrobeného množství elektrické energie včetně jejich porovnání s výsledky získanými simulací. V poslední části se hodnotí analyzovaný systém z hlediska produktivity a zahrnuje návrhy ke zvýšení efektivity systému.

## Fotovoltaická elektrárna

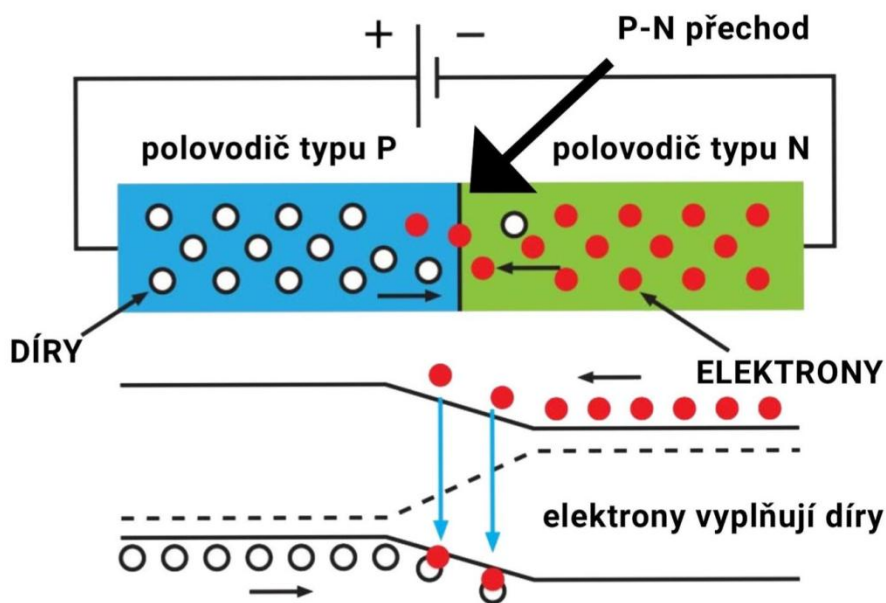
### 1.1 Princip činnosti fotovoltaického článku

Základní částí fotovoltaického článku je polovodičová dioda, která obsahuje polovodič P a polovodič N. Polovodič N obsahuje přebytek elektronů (záporně nabitá částice) a polovodič P obsahuje přebytek děr (kladně nabitá částice). Při dopadu slunečního záření (obr. 1.1) na PN přechod dochází k absorpci fotonů (částice světla) elektrony, tím dochází k uvolňování elektronů z krystalové mřížky a díky elektrickému poli, které vzniklo v oblasti PN přechodu, k jejich hromadění v polovodiči N. Díry pak zaplňují polovodič P. Difúzí nosičů náboje, až do elektrických kontaktů vzniká mezi polovodiči elektrické napětí (0,5-0,6 V). Toto napětí a malý výkon je ovšem nedostačující pro většinu aplikací, a proto se jednotlivé články zapojují sérioparalelně. [1, 2]



Obr. 1.1 Princip činnosti fotovoltaického článku [3]

Elektrony mohou přecházet (obr. 1.2) pouze z polovodiče P do polovodiče N (propustný směr). V opačném směru (závěrný směr) elektrony nemohou volně přecházet kvůli potenciálové bariéře. Aby došlo k uvolnění elektronů z krystalové mřížky, musí mít foton kvůli překonání zakázaného pásu minimální energii. U křemíku tato minimální energie činí 1,12 eV, to odpovídá vlnové délce cca 1105 nm. [1-2, 4]



Obr. 1.2 PN přechod polovodičové diody [5]

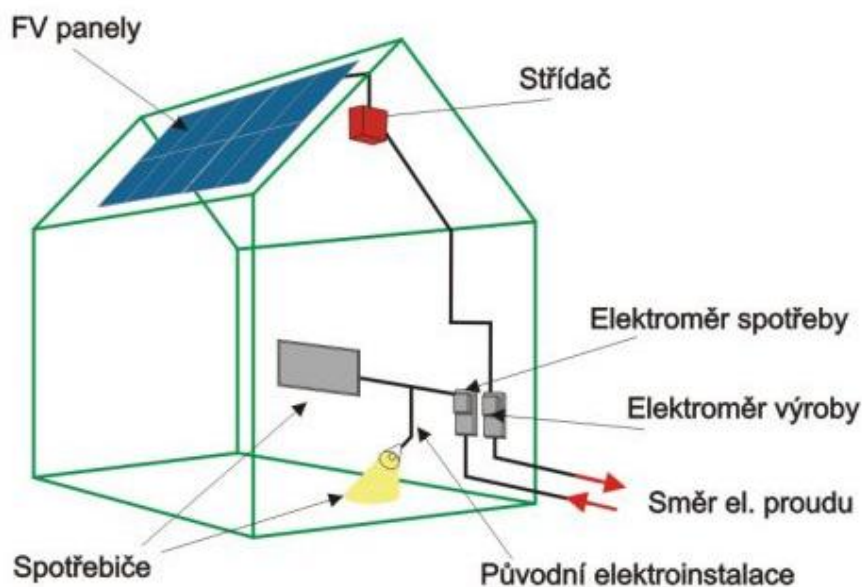
## 1.2 Rozdělení FVE

Elektrárny rozlišujeme podle velikosti a typu instalace na:

- **Malé střešní instalace** - malé střešní instalace obvykle zahrnují elektrárny s výkony do pár  $\text{kW}_p$ , které se umísťují buď do střešní krytiny, nebo se instalují v rovině střechy na hliníkovou nosnou konstrukci. Většinou se jedná o instalace FVE na rodinných domech. [6, 7]
- **Velké střešní instalace** - velké střešní instalace zahrnují elektrárny s výkony větší než  $30 \text{ kW}_p$  do výkonů v řádech  $\text{MW}_p$ . Obvykle se jedná o instalace na velkých průmyslových objektech, halách či logistických centrech. [6, 7]
- **Volně stojící instalace** - volně stojící instalace zahrnují elektrárny o výkonech stovek  $\text{kW}_p$  až do výkonů v řádech  $\text{MW}_p$ . Jedná se o elektrárny instalované na volných plochách, u nichž je podpůrná konstrukce napevno spojena se zemí. [6, 7]

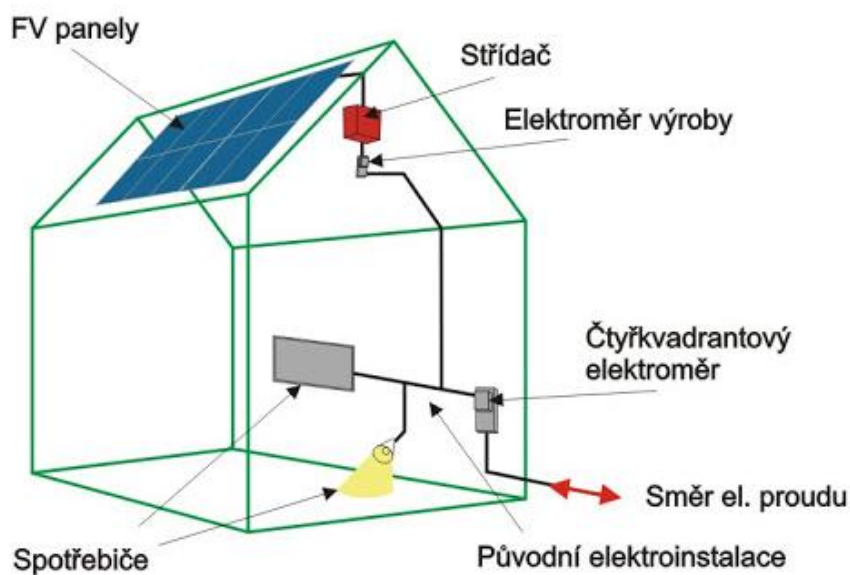
Před samotnou montáží musíme určit způsob připojení elektrárny k distribuční síti. Rozlišujeme 4 způsoby připojení elektrárny k distribuční síti:

- **Přímé připojení do sítě a prodej provozovateli distribuční sítě (přímý výkup)** - jedná se o přímé připojení do sítě (obr. 1.3). Elektrická energie je prodávána provozovateli distribuční sítě za výkupní cenu, přičemž veškerá vyrobená elektrická energie je dodávána do distribuční sítě. [6-8]



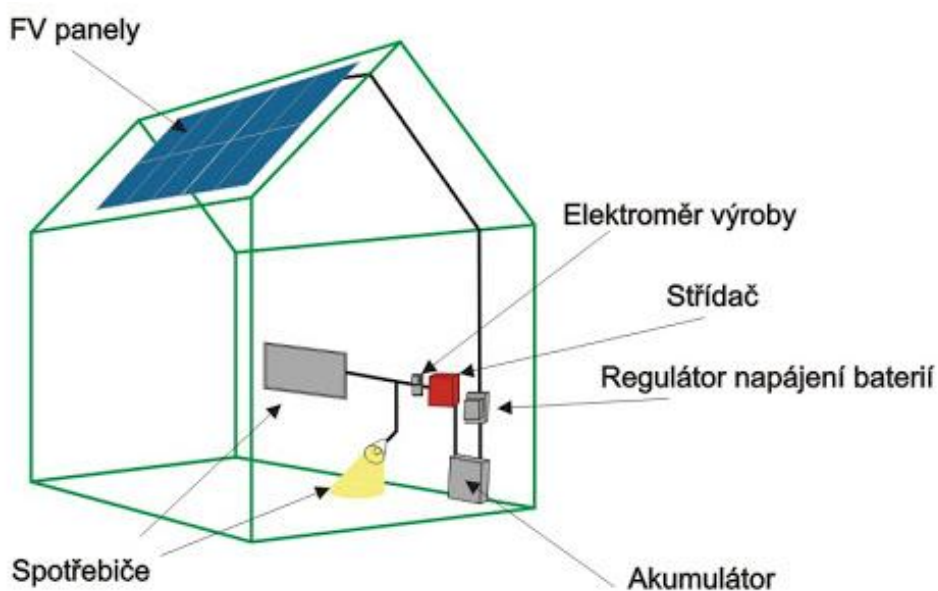
Obr. 1.3 Přímé připojení FVE do sítě [6]

- **Přímé připojení do sítě a prodej obchodníkovi s elektrickou energií** (obr. 1.3) - elektrická energie je dodávána obchodníkovi s elektrickou energií, přičemž veškerá vyrobená energie je prodána za předem stanovenou cenu. Jedná se o méně obvyklý způsob připojení. [6-8]
- **Připojení do rozvodů v objektu (zelený bonus)** - tento způsob připojení (obr. 1.4) je vhodné využít v případě, kdy velkou část produkce spotřebujeme přímo v objektu a přebytky elektrické energie dodáme do distribuční sítě za výkupní cenu. Tento způsob je často využíván u FVE do výkonu 10 kW<sub>p</sub> na RD nebo do výkonu 30 kW<sub>p</sub> u podnikových elektráren. Jedná se o nejčastěji používané a nejjednodušší připojení FVE do distribuční soustavy, neboť není nutné zřizovat nové odběrné místo a přípojku elektrické energie. [6-8]



Obr. 1.4 Připojení FVE do rozvodů v objektu [9]

- **Off grid připojení (ostrovní systém)** - všechna vyrobená elektrická energie se spotřebuje přímo v objektu a obvykle je průběžně ukládána do akumulátoru. Tento systém (obr. 1.5) se většinou využívá na odlehlých místech, ve kterých není možné připojení k distribuční síti nebo se používá tam, kde není rentabilní nebo není žádoucí. [8]



Obr. 1.5 Off grid připojení FVE [10]

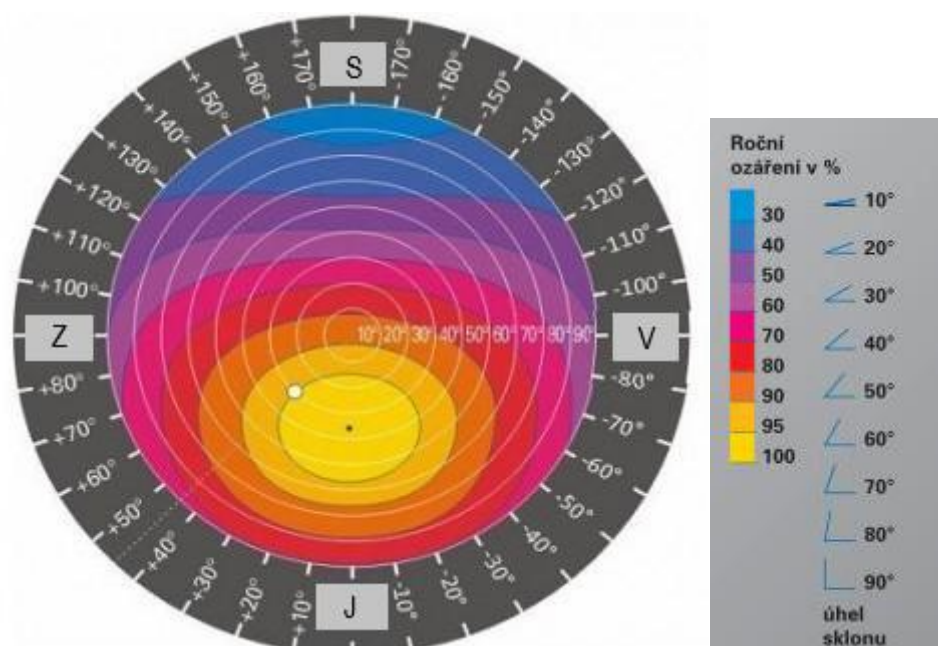


U elektráren s výkony nad  $4,6 \text{ kW}_p$  se musí použít střídače s 3f výstupem. Elektrárny s výkony nad  $200 \text{ kW}_p$  se většinou připojují přes trafostanici do sítě vn 22 kV.

[6, 7]

### 1.3 Umístění FVE

Vhodným umístěním FV elektrárny lze eliminovat nepříznivé stínění a jedná se tak o rozhodující faktor pro její budoucí výnosy. V ČR se za optimální umístění považuje umístění systému se sklonem  $35^\circ$  a orientací na jih. Při tomto umístění by měl být systém nejefektivnější. Na obr. 1.6 vidíme, jaký vliv má sklon a orientace FV panelů na energetický výnos. Např. pro sklon  $30^\circ$  a orientaci na jihozápad, budou kolektory stále dosahovat 95 % zisku. Instalace fotovoltaických panelů při sklonu menším jak  $20^\circ$  není doporučována, neboť může docházet ke značnému znečištění FV panelů a tím ke snížení jejich účinnosti. [6, 11]



Obr. 1.6 Diagram vlivu sklonu a orientace FV panelů na energetický výnos [12-13]

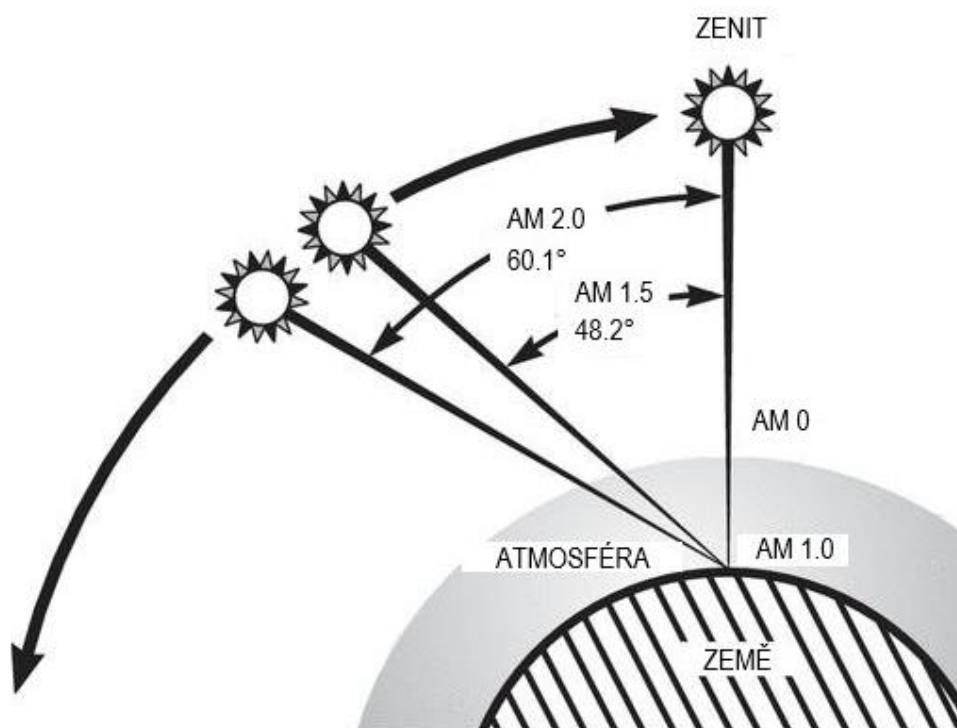
Dalším důležitým faktorem ovlivňující zisk je zastínění. Zastíněný článek se totiž začne chovat jako odpor a „brzdí“ tok elektrické energie v ostatních člancích nebo panelech spojených v sérii. Z tohoto důvodu je nutné FVE instalovat na místo, kde nedochází, pokud možno, k žádnému zastínění. [6]

Mezi nejdůležitější podmínky z hlediska množství vyrobené elektrické energie patří: intenzita záření, počet hodin slunečního svitu v jednotlivých ročních obdobích, povětrnostní podmínky a geografická poloha. Za jasného dne dopadá na zemský povrch 800-1100 W/m<sup>2</sup> globálního záření. [6]

Při výpočtu hodnot oslunění a výnosů solárních systémů hraje velkou roli poloha slunce, která se zpravidla popisuje jeho výškou a azimutem: [8]

$$AM = \frac{A}{\sin(\gamma_s)} \quad (-) \quad (1.1)$$

kde AM (obr. 1.7) je dráha slunečního světla skrz zemskou atmosféru, A je výška slunce a  $\gamma_s$  značí výšku slunce měřenou od horizontály. [8]



Obr. 1.7 Označení referenčních spekter pro různé pozice Slunce na obloze zadané zenitovým úhlem [14]

Při svislé poloze slunce  $\gamma_s = 90^\circ$  je  $AM = 1$  (světlo proniká nejkratší drahou skrz atmosféru). V této poloze je tedy absorpce a rozptyl záření nejslabší a hodnota intenzity záření je maximální. To v našich podmínkách představuje začátek jara nebo podzim.

Naopak nejnižší intenzity záření je dosaženo tehdy, kdy je slunce umístěno nízko (jeho dráha atmosférou je delší). [8]

Analyzovaná fotovoltaická elektrárna (obr. 1.8) o výkonu 20 kW je umístěna na střeše budovy fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Výstavba této elektrárny trvala rok a byla dokončena v témže roce, kdy byla uvedena do provozu, tedy v roce 2004. Slouží hlavně pro studijní a výzkumné účely a náklady na její výstavbu činili 8 mil. Kč. Ve své době patřila k největším fotovoltaickým elektrárnám v ČR. Za rok by měla vyrobit 25 kWh elektrické energie, přičemž garance tohoto výkonu je zaručována po dobu 20 let. FVE je vhodně umístěna, a to nejen z hlediska průměrné doby slunečního svitu, která v ČR činí 1300 – 1800 hod/rok, ale i díky optimální průměrné roční intenzitě slunečního záření, která v ČR činí 950 – 1340 kWh/m<sup>2</sup>. Daná fotovoltaická elektrárna není ničím zastínována a FV panely mají sklon 45° s azimutem 3°, což lze považovat vzhledem k celkovému ročnímu slunečnímu záření za vyhovující. K elektrárně je umožněn snadný přístup, což je výhodné z hlediska údržby elektrárny. Tato FVE využívá montážní systémy pro ploché střechy bez možnosti polohování. Vzhledem k výkonu 20 kW se jedná o malou střešní instalaci, přičemž vyrobená energie je dodávána do sítě nízkého napětí přes rozvaděč RO. [15-17]



Obr. 1.8 Analyzovaná FVE malého výkonu [18]

## 1.4 Fotovoltaický článek

Jak již bylo výše zmíněno, pro dosažení dostatečného výkonu FVE jsou články zapojovány do série, jde o tzv. zřetězení článků. Přední kontakt (záporný pól) jednoho článku se připájí se zadním kontaktem (kladný pól) druhého článku. Vzdálenost mezi jednotlivými články je v řádu milimetrů. Podélné propojení v modulu je obvykle po 9 až 12 člancích ve 4-6 geometrických řadách a tvoří tzv. fotovoltaický panel. Výkon panelů je udáván ve Watt peak ( $W_p$ ), což je maximální hodnota výkonu při ideálních podmínkách. Při polojasném záření klesne výkon na 35 % maximálního výkonu a při zatažené obloze až na 10 % maximálního výkonu. Životnost těchto panelů je zhruba 25 let, přičemž je výrobcem garantováno, že výkon panelu neklesne po dobu 10 let pod 90 % a po dobu 25 let pod 80 % jmenovitého výkonu. [1-2, 8]

Mezi nejčastěji používané fotovoltaické články patří monokrystalické, polykrystalické (obr. 1.9) a tenkovrstvé články (obr. 1.10). Monokrystalické články mají sice oproti polykrystalickým článkům vyšší účinnost (15-19,3 %), ale nemusí to nutně znamenat zvýšení efektivity celého panelu. Tyto články mají tvar mnohoúhelníku, což znamená, že nepokrývají celý povrch panelu, a to má za následek výrazné snížení elektrického výkonu. Polykrystalické články jsou oproti monokrystalickým článkům levnější, na výrobu jednodušší, ovšem dosahují nižší účinnosti (14-16 %). [1, 6-7]



Obr. 1.9 Monokrystalický a polykrystalický panel [19, 20]

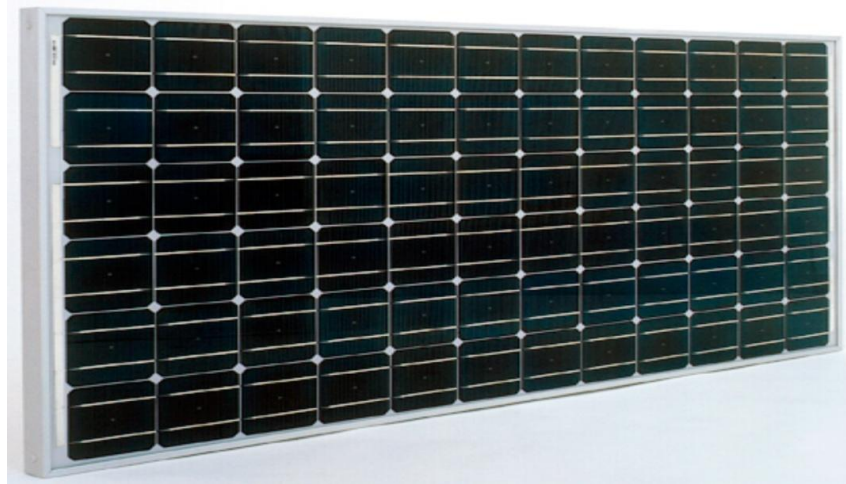
Tenkovrstvé články mají oproti monokrystalickým a polykrystalickým článkům nižší účinnost. Tenkovrstvé se jim říká kvůli velmi tenké aktivní absorbující polovodičové vrstvě. Jejich nevýhodou je malá účinnost (8-14 %) a potřeba dvojnásobné plochy oproti polykrystalickému nebo monokrystalickému panelu. Na druhou stranu jeho výhodou je, že dokáže vyrobit o cca 10 % více energie než polykrystalický a monokrystalický článek. Dále jsou tenkovrstvé články levnější a mají nižší hmotnost oproti monokrystalickým a polykrystalickým článkům, díky níž je možné snadněji umístit panel např. na vnější zdi budovy. [1, 6-7]



Obr. 1.10 Tenkovrstvý panel [21]

Analyzovaná fotovoltaická elektrárna je složena z 8 elektricky oddělených polí. Každé pole obsahuje 24 modulů a je připojeno k vlastnímu střídači, který následně vyrobenou energii rozvádí po budově FEL. Propojení v modulu probíhá podélně. Analyzovaná elektrárna tak obsahuje 12 článků v 6 geometrických řadách (řetězec článků), které jsou spolu spojeny ovinutími. Analyzovaná elektrárna tedy obsahuje 192 (8x24) panelů a 13824 (12x6x24x8) monokrystalických křemíkových článků uložených do zinkové ocelové konstrukce se sklonem 45° orientované na jih. Křemíkové články s typovým označením I-110/24 dodala firma Isofoton s.r.o. se sídlem ve Španělsku. Fotovoltaické panely (obr. 1.11) zabírají celkovou plochu 163,2 m<sup>2</sup>. [17]

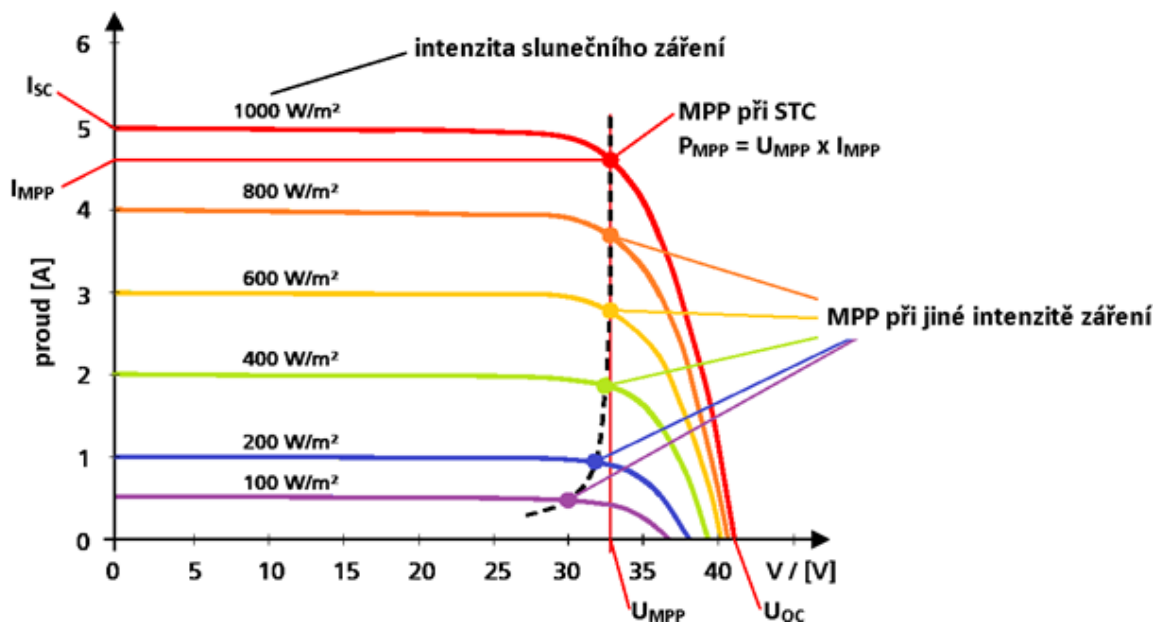




Obr. 1.11 Fotovoltaický panel I-110/24 [22]

## 1.5 Parametry FVE

Základní parametry jednotlivých panelů nalezneme v katalogích jednotlivých výrobců nebo přímo na štítku FVE. Tyto parametry jsou také znázorněny ve VA charakteristice FV článku (obr. 1.12). Na obr. 1.12 můžeme vidět, jak moc se mění jednotlivé parametry v závislosti na změně intenzity slunečního záření. Shrnutí základních parametrů analyzované elektrárny udává tab. 1.1.



Obr. 1.12 VA charakteristika FV článku [23]

Mezi základní parametry patří:

- proud nakrátko  $I_{SC}$  (fotoelektrický proud) - udává maximální hodnotu proudu, který protéká panelem. Je ovlivňován intenzitou osvětlení, teplotou, spektrální citlivostí a plochou fotovoltaického panelu,
- napětí naprázdno  $U_{OC}$  - udává maximální napětí na panelu a je ovlivňován intenzitou osvětlení a teplotou,
- proud maximálního výkonu  $I_{MPP}$  (MPP – je udáván prostřednictvím VA charakteristiky) - udává hodnotu proudu při maximálním výkonu,
- napětí maximálního výkonu  $U_{MPP}$  - udává hodnotu napětí při maximálním výkonu,
- maximální výkon  $P_{max}$  - je dán součinem proudu a napětí maximálního výkonu a jeho jednotkou je  $W_p$ . Měřené výkony jsou prováděny při standardních zkušebních podmínkách STC, tedy při ozáření  $1000 \text{ W/m}^2$ , při teplotě článku  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  a hodnotě  $AM=1,5$ ,
- tolerance výkonu  $\Delta P_{MP}$  (%) - udává maximální procentní toleranci výkonu,
- faktor plnění FF - udává poměr mezi maximálním výkonem a výkonem daným napětím naprázdno a proudem nakrátko. Podle tohoto faktoru posuzujeme kvalitu fotovoltaického článku. Čím větší hodnotu FF panel má, tím větší výkon může dodat do zátěže,
- účinnost - stanovuje se z podílu maximálního výkonu článku a celkovou energií dopadajícího světla  $P_{in}$ ,
- teplotní koeficienty - ovlivňují celkový výkon článku. Pouhá změna teploty o  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  vyvolá změnu výkonu až o 10 %. Teplotní koeficient maximálního výkonu  $P_{max}$  klesá s rostoucí teplotou. Teplotní koeficient  $I_{SC}$   $\beta$  udává o kolik procent se změní proud nakrátko při změně teploty o  $1 \text{ }^\circ\text{C}$  a nakonec teplotní koeficient  $U_{OC}$   $\gamma$  udává o kolik procent se zvýší napětí na prázdko při změně teploty o  $1 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Dalšími parametry, které udává výrobce, jsou mechanické vlastnosti, rozměry panelu, hmotnost panelů, materiál solárních článků, atd.. Parametry analyzovaného fotovoltaického modulu nalezneme v tab. 1.1. [24]

Tab. 1.1 Parametry fotovoltaického modulu I-110/24 od firmy Isofoton [25]

Název parametru	Velikost parametru
Výkon STC $P_{MPP}$ (W)	110
Napětí naprázdno $U_{OC}$ (V)	43,2
Proud nakrátko $I_{SC}$ (A)	3,38
Napětí max. výkonu $U_{MPP}$ (V)	34,8
Proud max. výkonu $I_{MPP}$ (A)	3,16
Jmenovitá účinnost $\eta$ (%)	12,9
Faktor plnění FF (%)	75,3
Tolerance výkonu $\Delta PMP$ (%)	-
Maximální systémové napětí $U_{max}$ (V)	760
Teplotní koeficient $\beta$ (%/°C)	-
Teplotní koeficient $\gamma$ (%/°C)	-0,37
Teplotní koeficient $P_{max}$ (%/°C)	-

## 1.6 Konstrukce FVE

Protože se konstrukce pro šikmé střešní systémy bude lišit od konstrukce na fasády, rozdělujeme konstrukce podle objektu, na kterém má dojít k montáži FV systému. Konstrukce tedy dělíme na: konstrukce pro šikmé střešní systémy, konstrukce pro ploché střešní systémy, fasády, konstrukce pro volná prostranství a konstrukce pro polohovatelné systémy.

- **Konstrukce pro šikmé střešní systémy**

Oproti plochým střechám mají šikmé střechy nevýhodu v podobě jasně daného sklonu a orientací modulů. Tento typ konstrukce (obr. 1.13) je vhodné použít pro malé instalace např. pro rodinné domy, které mají sedlovou střechu se sklonem zhruba 35° a orientací na jih či jihozápad. Díky snadné montáži a nízké ceně se jedná o nejpoužívanější konstrukci. [6-8]

U této konstrukce rozeznáváme dva druhy montáží, a to montáž modulů na střešní krytinu a montáž systému do střechy. U montáže na střešní krytinu se moduly instalují do



nosné kolejnice, která je upevněna ke střešní krytině. U montáže do střechy se panely instalují do úrovně střešní krytiny a v porovnání s montáží na střechu jsou zde teplotní ztráty vyšší, neboť panely jsou hůře odvětrávány. Dále je u tohoto systému nutné zajistit vodotěsnost mezi moduly, pod moduly a v okrajových částech generátoru. U montáže na střešní krytinu se o odvod vody stará střešní krytina. [8]



*Obr. 1.13 FV panely nainstalované na sedlovou střechu [26]*

- **Konstrukce pro ploché střechy**

Systémy umístované na ploché střechy (obr. 1.14) se skládají z modulů s kovovou konstrukcí s profily ve tvaru trojúhelníku. Požadovaného sklonu dosáhneme vhodným náklonem podstavce. [8]



*Obr. 1.14 FV panely nainstalované na ploché střeše [27]*

- **Konstrukce na fasádu**

Dále lze fotovoltaický systém nainstalovat i před fasádu, kde moduly již nechrání proti povětrnostním vlivům a mohou být tedy nainstalovány stejně volně jako billboardy. Dále lze též zabudovat fotovoltaické systémy na fasádu (obr. 1.15). [8]



*Obr. 1.15 FV panely nainstalované na fasádu [28]*

- **Konstrukce pro volná prostranství**

Tuto konstrukci používají velké elektrárny umístěné na volných prostranstvích (obr. 1.16). V porovnání s konstrukcí pro ploché střechy je nákladnější. [6-7]



*Obr. 1.16 FV panely nainstalované na volném prostranství [29]*

- **Konstrukce pro polohovatelné systémy (trackery)**

Jedná se o systémy, které otáčejí panely za sluncem (obr. 1.17) a umožňují tak maximální výtěžnost (30-35 % nárůst oproti pevným instalacím) fotovoltaického systému. Na druhou stranu jsou velmi drahé, ke své činnosti spotřebovávají vlastní vyrobenou elektrickou energii a je nutné u nich provádět pravidelnou údržbu. [6-7]



*Obr. 1.17 Polohovatelný FV systém [30]*



Konstrukce analyzované elektrárny (obr. 1.18) je tvořena nosnými ocelovými rámy, které jsou uchyceny do stávající nosné železobetonové monolitické konstrukce střechy. Rámy jsou přichyceny pomocí ocelových ploten přes šrouby a patní plechy do nosné konstrukce střešní železobetonové desky ocelových nosníků. Nosné rámy jsou navrženy z uzavřených profilů 120x100x6 mm. Příčné zavětrování je tvořené příčníky (rovnoramenné L 70x70x6 mm). Přichycení nosných ráků k příčníkům je provedeno prostřednictvím šroubových spojů, které jsou přichyceny na úchytné plotny. Na příčníky jsou následně našroubované solární panely. Ve všech polích je provedeno zavětrování do vedlejších ráků. Ocelová nosná konstrukce FV panelů je spojena nejkratší cestou na jímací soustavu hromosvodu. [17]



*Obr. 1.18 Konstrukce analyzované elektrárny [31]*

Kvůli ochraně proti korozi je ocelová konstrukce otryskána a žárově pozinkována. Hmotnost konstrukce je cca 8,07 tun. [18]

## 1.7 Střídač

Protože z fotovoltaického panelu vychází proud stejnosměrný, je nutné tento proud přeměnit na proud střídavý, jehož parametry budou shodné s parametry elektrické sítě. O to se stará střídač, který se nachází mezi FV generátorem a střídavou rozvodnou sítí. U

malých elektráren plní ochrannou funkci tak, že sleduje napětí a frekvenci sítě a v případě, že dojde k výpadku či ke špatné kvalitě vyrobené elektřiny, elektrárnu od sítě odpojí. [6-7]

Střídač má za úkol: přeměňovat ss proud (výstupní veličinou je signál z FV generátoru) na střídavý proud sítě, regulaci MPP (pracovní bod střídače se přizpůsobí na MPP generátoru), sběr provozních dat a signalizaci, DC a AC bezpečnostní funkce (Ochrana proti přepólování, přepětí a přetížení, detekce elektrického oblouku atd.) a ochranu a řízení sítě podle FNN aplikační směrnice VDE 4105 a EEG. [8]

### 1.7.1 Regulace napětí

Vyráběný výkon FVE je závislý na počasí. Pokud tedy slunce svítí intenzivně, je zajištěn vysoký výkon FVE. Pokud slunce zakryje mrak, tak náhle intenzita slunce poklesne, a to zajistí i pokles výkonu FVE, tedy výkyv výkonu a napětí na výstupu. Toto napětí je nutné regulovat a tuto funkci plní solární regulátor. Dodávku maximálního výkonu do rozvodné sítě tedy zajišťuje solární regulátor MPP (MPP – tracker), který je zabudovaný ve střídači. Tento MPP tracker má za úkol při změně ozáření změnou vstupního odporu střídače najít takový optimální pracovní bod, při kterém FVE dosáhne maximálního výkonu. Klasické regulátory dosahují účinnosti okolo 80 %. Regulátory s vestavěným DC/DC měničem (MTTP měniče) jsou schopny dosáhnout účinnosti 95-98 %, avšak vyšší účinnost je kompenzována i vysokou cenou. [2, 6-8]

### 1.7.2 Účinnost střídače

Rozlišujeme mnoho účinností střídače, a to podle toho jaký parametr se hodnotí. Rozlišujeme účinnost přeměny, která udává, s jakou účinností, tzv. s jak velkými ztrátami, dochází při přeměně ss proudu na proud střídavý. Tyto ztráty jsou způsobeny transformátorem, výkonovými spínači, regulací atd. Dále rozlišujeme účinnost přizpůsobení. Ta udává kvalitu přizpůsobení střídače k optimálnímu pracovnímu bodu. Dále rozeznáváme statický stupeň účinnosti, který se používá pro zjišťování účinnosti pro různé případy zátěže. A nakonec rozeznáváme celkovou evropskou účinnost, která se používá pro porovnání účinnosti rozdílných střídačů. Vzhledem k tomu, že účinnost závisí na vstupním výkonu, který se mění v závislosti na intenzitě slunečního záření dopadající na FV moduly, musíme brát v úvahu následující vztah: [8,32]

$$\eta = \eta_{5\%} \cdot 0,03 + \eta_{10\%} \cdot 0,06 + \eta_{20\%} \cdot 0,13 + \eta_{30\%} \cdot 0,1 + \eta_{50\%} \cdot 0,48 + \eta_{100\%} \cdot 0,2 \quad (-) \quad (1.2)$$

kde  $\eta_{(100\%)}$  představuje účinnost při jmenovitém výkonu,  $\eta_{(50\%)}$  účinnost při polovičním jmenovitém výkonu atp.

Výše zmíněný vzorec tedy udává, že jmenovitého výkonu dosáhneme při 20 % provozní doby, polovičního výkonu pak při 48 % provozní doby. Většina aktuálně používaných střídačů dosahuje evropské účinnosti od 92% - 97,4 %.

### 1.7.3 Sběr provozních dat

Funkci sběru provozních dat obsahuje většina střídačů. Pokud střídač tuto funkci neobsahuje, je možné ho dodatečně touto funkcí vybavit. Mnoho výrobců střídačů umožňuje připojit externí zařízení, kterým je možné centrálně data sbírat, a to z několika střídačů. Takto získaná data lze následně porovnávat či vyhodnocovat. [8]

Ze strany vstupu střídač snímá hodnoty napětí, proudu a výkonu, ze strany výstupu pak snímá hodnoty napětí, proudu, výkonu a frekvence, dále snímá provozní dobu střídače, množství vyrobené elektrické energie a stav, v jakém se přístroj nachází a případné poruchy. [8]

Analyzovaný systém využívá k rozvodu elektrické energie 8 střídačů (obr. 1.19) typu SunProfi SP 2500-450 společnosti Sun Power se sídlem v San José v Kalifornii. Každý střídač je připojen k 1 sekci s 24 moduly. Výkon získaný solárními panely je přeměněn pomocí střídačů ze stejnosměrného napětí na jednofázové střídavé napětí 230 V o frekvenci 50 Hz. Střídač je v provozu pouze při dostatečném výkonu solárního generátoru, kdy dojde k jeho automatickému zapnutí a v případě snížení pod dostatečný výkon samovolně vypíná. Díky tomu činí vlastní spotřebovaný výkon přes den maximálně 3 W. Při přetížení střídač automaticky omezí procházející proud. Základní vstupní a výstupní parametry jsou uvedeny v tab. 1.3 a v tab. 1.4. [17]



Obr. 1.19 Střídač Sun Profi SP2500-450 analyzované elektrárny

Analyzovaný systém obsahuje funkci sběr dat, kdy sbírá ze střídače provozní data, která následně ukládá do PC umístěného na fakultě elektrotechnické. Dále analyzovaný systém obsahuje samostatné snímače, které uvádí tab. 1.2. Tyto údaje zobrazuje a ukládá PC. [17]

Tab. 1.2 Snímané veličiny analyzované elektrárny [17]

Snímaná veličina	Druh měřicího přístroje
Intenzita osvětlení FV pole ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Čidlo osvětlení
Teplota čidla intenzity osvětlení FV pole ( $^{\circ}\text{C}$ )	Čidlo osvětlení
Intenzita globálního slunečního osvětlení ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Pyranometr
Teplota panelů ( $^{\circ}\text{C}$ )	Pt čidlo
Hodnota ss proudu FV pole č. 8 (A)	Proudový bočník
Hodnota ss napětí FV pole č. 8 (V)	Napěťové svorky FV pole č. 8
Venkovní teplota ( $^{\circ}\text{C}$ )	Čidlo venkovní teploty
Výkon FV pole č. 8 (W)	Jednofázový elektroměr
Celková vyrobená energie (kWh)	Třífázový elektroměr

Vyrobenou elektrickou energii panelu E8 měří 1-fázový elektroměr pro nepřímé měření v rozvaděči RDAC. Měření vyrobené elektrické energie celého systému E1-E8 probíhá pomocí 3-fázového elektroměru pro nepřímé měření v rozvaděči RDAC. Data vyrobené elektrické energie zaznamenává komunikační software na PC a dále je zobrazuje zobrazovací jednotka, která je umístěna ve vstupním vestibulu. Zobrazovací jednotka nejenže ukazuje okamžitý celkový výkon (kW) a dodanou energii za den (kWh), ale i snížení emisí CO<sub>2</sub>. Sběr dat zajišťuje datalogger SunPower DL100. Analyzovaný systém neobsahuje regulátor. [17]

Tab. 1.3 Základ. vstup. parametry střídače SunProfi SP 2500-450 [33]

Výrobce	SunProfi
Typ střídače	SP 2500-450
Doporučený maximální výkon při 25 °C	3400 W <sub>p</sub>
Maximální stejnosměrný výkon	2700 W
Účinnost	1
Rozsah vstupního napětí U <sub>pmin</sub>	194 V (DC)
Maximální vstupní napětí U <sub>ocmax</sub>	450 V (DC)
Zvlnění stejnosměrného napětí	2 %

Tab. 1.4 Základ. výstup. parametry střídače SunProfi SP 2500-450 [33]

Výrobce	SunProfi
Typ střídače	SP 2500-450
Výstupní trvalý výkon	2500 W <sub>max</sub>
Maximální účinnost	94 %
Evropská účinnost	92 %
Účinnost	1
Rozsah výstupního napětí	196 – 253 V (AC) - při standardním nastavení
	187 – 263 V (AC) – nastavitelné
Rozsah frekvence	49,8 – 50,2 Hz - při standardním nastavení
	49 – 51 Hz – nastavitelné
Celkové harmonické zkreslení výstupního proudu	3 %
Rozsah okolní teploty	-10-40 °C, 40 – 80 °C - při sníženém výkonu

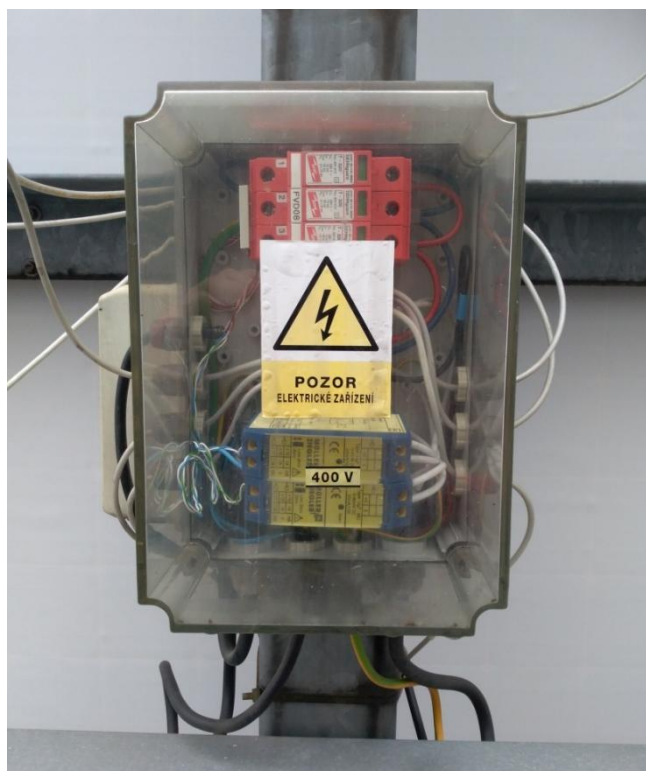
## 1.8 Rozvaděč generátoru (připojovací skříň)

Jednotlivá vedení FV řetězců jsou připojena k rozvaděči generátoru, k němuž se dále připojuje stejnosměrné hlavní vedení. Pro odvedení přepětí k zemi se do rozvaděče generátoru zapojí svodiče přepětí, přičemž je nutné k rozvaděči generátoru připojit i vedení



k vyrovnání potenciálů. Do rozvaděče lze dále připojit hlavní vypínač DC nebo jistič vedení. Pro ochranu modulů a vedení proti přetížení a vzniku přepětí se vodiče osazují stringovými pojistkami (pouze u neuzemněných vodičů). Rozvaděč generátoru má tedy za úkol rozdělovat proudy řetězce a chránit tak jednotlivé moduly před bleskem a přepětím a v případě nutnosti odpojit moduly od zbývajících systému. Dále mají za úkol dohlížet na výkon zařízení a sbírat data z fotovoltaických modulů. [5]

Rozvaděč generátoru je nutné použít v případě, kdy se FV systém skládá z více jak 3 větví. Analyzovaná elektrárna je složena ze 192 modulů, které jsou rozděleny do 8 poli, přičemž každé pole je složeno z 24 modulů. Těchto 24 modulů je rozděleno do 3 větví po 8 modulech. Z těchto skutečností vyplývá, že naše analyzovaná elektrárna obsahuje 8 rozvaděčů generátorů (obr. 1.20) typu Ensto Cubo-S SPCK1825T s krytím IP65. Rozvaděče jsou osazeny příslušnými svorkami pro sério-paralelní zapojení 3x8 FV panelů. Dále jsou vybaveny 3 ks přepěťových ochran DEHNquad T320 a 3 ks ochranných zpětných diod BY550-600. Rozvaděč generátoru osmého pole je doplněn převodníkem pro měření napětí UgT-MU (0-410V/4-20 mA) a proudu UgT-MU (0-60 mV/4-20 mA) s využitím bočnicku (11A/60 mV). [17]



Obr. 1.20 Rozvaděč generátoru analyzované elektrárny

## 1.9 Rozvaděčová skříň (rozvaděč)

V rozvaděči jsou uloženy jističe, přístroje pro měření a ovládání elektroinstalace a elektroměr. Do rozvaděče vstupují napájecí kabely, kabely od snímačů, čidel a ovladačů a z rozvaděče vedou kabely do podružných rozvaděčů k jednotlivým spotřebičům. Rozvaděč má za úkol propojovat FV systém s místní sítí. [34]

U běžných rozvaděčů, které jsou umístěny v suchém prostředí, je stupeň krytí IP20, ve vlhkých prostorech se pak používají rozvaděče se stupněm krytí až IP67. [34]

Analyzovaná elektrárna obsahuje rozvaděč (obr. 1.21) s krytím IP40/20. Tento rozvaděč se nachází na stěně budovy fakulty elektrotechnické v 5. NP vedle střídače a propojuje FV systém se sítí nn. Rozvaděč obsahuje stejnosměrnou a střídavou část. Stejnosemřná část obsahuje moduly přepětových ochran stupně C typu DEHNquad T320. Odpojení včetně odjištění od DC zdroje pro každou sestavu je zajištěno příslušnými stejnosměrnými dvoupólovými jističi typu LSN DC 13C/2. Ve střídavé části je provedeno odjištění každé sestavy (střídače) prostřednictvím jističů typu LSN-13B/1n. Rozvaděč dále obsahuje přepětovou ochranu "C" DEHNquad TNS 230/400V, hlavní vypínač - jistič LSN40B/3N-40A a elektroměry. [17]



Obr. 1.21 Rozvaděč analyzované elektrárny

## 1.10 Vedení FVE

Rozlišujeme modulová, hlavní stejnosměrná vedení a přípojovací střídavá vedení. Mezi jednotlivými moduly solárního generátoru a rozvaděči generátoru se nachází tzv. modulová vedení, která se instalují především ve venkovních prostorech. Kvůli zajištění bezpečnosti se nepoužívá společné vedení pro kladný a záporný pól. Protože na střeších může teplota dosáhnout až 70 °C, je nutné použít ve venkovním prostředí fotovoltaické vedení, které má vysokou odolnost vůči UV záření a povětrnostním vlivům. Podle normy VDE-E-AR 2283-4 se mohou používat pouze taková FV vedení, která jsou jednožilová bez halogenů s maximálním povoleným stejnosměrným napětím 1,8 kV a přípustným rozsahem okolních teplot –40-90 °C, která mají označení PV1-F. Tato vedení musí též projít danými elektrickými, mechanickými a klimatickými zkouškami. V přípojných krabicích modulů se ke svorkám připojují vodiče (obr. 1.22) o průřezu v rozmezí 1,5 mm<sup>2</sup> - 6 mm<sup>2</sup>. [8]



Obr. 1.22 Solární kabel [35]

Stejnoseměrné hlavní vedení je propojeno se střídačem přes rozvaděč generátoru. Obvykle se používá vedení s pláštěm z PVC označováno jako NYM nebo NYY. V případě, že rozvaděč generátoru je umístěn ve venkovních prostorách, pak musí být tato vedení uložena v ochranné trubce, která vedení chrání proti UV záření. Jak již bylo výše uvedeno, využívají se samostatná jednožilová plášt'ová vedení pro kladný a záporný pól. Tam, kde je častý výskyt úderu blesků do vedení, se používají stíněná vedení. Dále by měla být možnost odpojit ss napětí ve všech pólech, což zajišťuje hlavní vypínač DC a odpojovací místa v rozvaděči generátoru. [8]

Připojovací vedení pro střídavý proud propojuje střídač s ochranným zařízením, které dále propojuje s rozvodnou sítí. U 3f střídače se jedná o pěti-žilové vedení a u 1f střídače se pak jedná o třípólová vedení. [8]

Analyzovaný systém využívá pro silnoproudé připojení měděné kabely typu CYKY (obr. 1.23), pro slaboproudé a datové připojení v interiéru využívá kabely FTP typu 4x2x0,5 pro venkovní připojení pak kabely FTP ve typu 4x2x0,5. Venkovní kabely jsou uloženy v oceloplechových kabelových žlabech typu MARS a vedou po kovové upevňovací konstrukci FV panelů. V interiéru budovy jsou kabely uloženy v mezistropěch, pod omítkou nebo na povrchu v elektroinstalačních PVC vkládacích lištách. [17]



*Obr. 1.23 Vedení analyzované elektrárny [36]*

Uzemnění systému je připojeno prostřednictvím FeZn 8 mm kabely k jímací soustavě hromosvodu. Zobrazovací jednotka je napojena měděnými kabely CYKY. [17]

Elektroinstalace v objektech je vybavena víceúrovňovou ochranou proti přepětí I., II. A III. stupně (třída B, C a D). [17]

## 2 Softwarová simulace a reálná výroba el. energie

### 2.1 Softwarová simulace

Přesnost výsledků simulace závisí na přesnosti vstupních parametrů a na použité metodě simulace. Musí se brát v potaz jak přesnost zobrazování, tak i hloubka aplikovaného programu. Pro podrobný návrh FV systémů je nutné znát meteorologická data a údaje o záření. Aby se dosáhlo, co možná největší přesnosti, používají se údaje z různých zdrojů. Pro zjištění výnosnosti FV systému se používají údaje o záření, jako je globální sluneční záření v horizontální rovině, které se následně násobí plochou daného FV panelu. Pro zjištění chování panelu a vlivu zastínění je nutné znát velikost přímého a difúzního záření. Dále je nutné znát teplotu okolí a rychlost větru. Navíc pro charakterizaci místa je nutné znát i měsíční průměry nebo hodinové hodnoty zmíněných okolních vlivů. [8]

K teoretickému výpočtu velikosti výroby elektrické energie byl vybrán program PVsyst. Tento program se řadí mezi programy časového kroku, to jsou programy, ve kterých jsou používány modely určené k napodobení reálného systému, a to s velkou přesností. To, jak se bude systém chovat, záleží v prvé řadě na zadaných meteorologických datech. [8]

PVsyst disponuje velkým množstvím funkcí, které řadí program mezi nejvýkonnější a nejucelenější programy. Velké množství funkcí dělá program vysoce složitý. Pro snadnější používání programu obsahuje PVsyst rozsáhlou dokumentaci a podrobnou nápovědu. V programu se dají simulovat jak síťové systémy, tak i ostrovní systémy. [8]

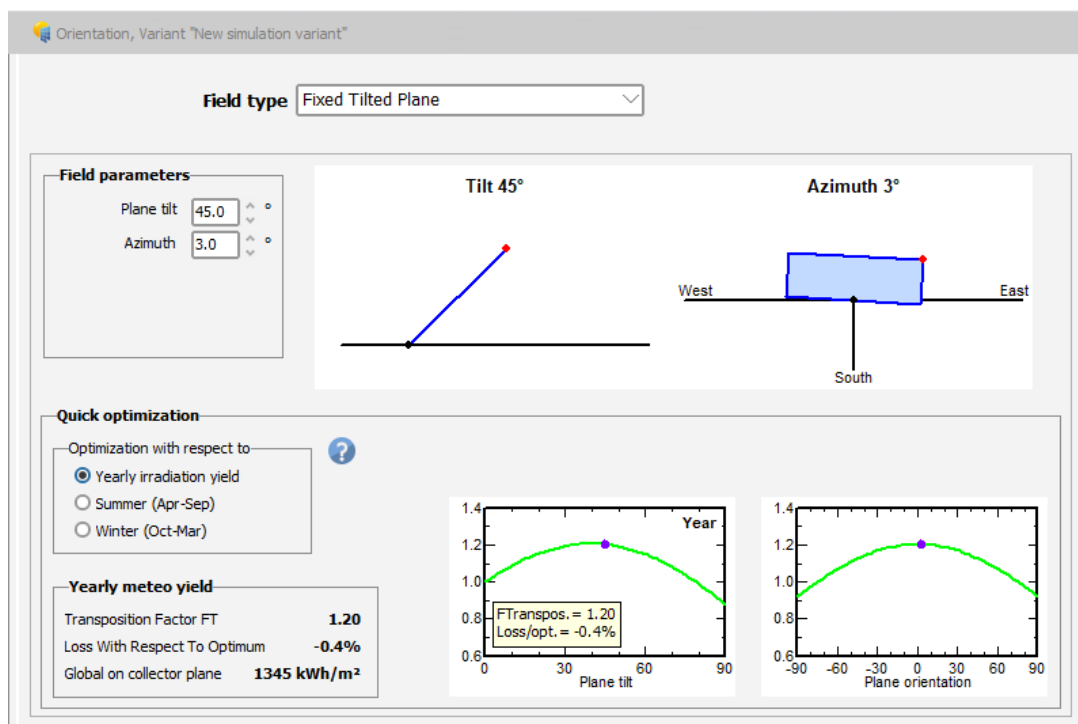
#### 2.1.1 Model simulace

Po vytvoření nového projektu bylo nutné zadat programu PVsyst přesné umístění naší analyzované elektrárny prostřednictvím souřadnic (obr. 2.1). V dalším kroku bylo nutné zvolit zdroj meteorologických dat (obr. 2.1), ze kterého program následně naimportoval meteorologická data pro danou oblast. Mým zdrojem dat je Meteonorm 8.0.

Project summary		
<b>Geographical Site</b>	<b>Situation</b>	<b>Project settings</b>
ZCU_FEL	Latitude 49.72 °N	Albedo 0.20
Czech Republic	Longitude 13.35 °E	
	Altitude 355 m	
	Time zone UTC+1	
<b>Meteo data</b>		
ZCU_FEL		
Meteonorm 8.0 (1991-2010), Sat=100% - Synthetic		

Obr. 2.1 Geografické umístění analyzované elektrárny a zdroj meteorologických dat

Po naimportování potřebných dat jsem přistoupila k zadávání základních údajů (obr. 2.2) o analyzované elektrárně, jako je informace o konstrukci, azimutu a úhlu sklonu systému. V případě konstrukce se jedná o pevné uchycení systému se sklonem  $45^\circ$  s azimutem  $3^\circ$ . Po zadání těchto údajů mě program informuje, o kolik procent se analyzovaný systém odchyluje od optimálního provedení systému, které poskytuje maximální zisk slunečního záření. Tato hodnota pro analyzovanou elektrárnu činí 0,4 %.



Obr. 2.2 Základní vlastnosti analyzované elektrárny

Nakonec jsem zadala programu další údaje o elektrárně, ty můžeme vidět na obr. 2.3. Výrobce daných FV modulů je firma Isofoton, jedná se o monokrystalické články typu

I-110/24. Výrobce daných střídačů je firma Sun Power, jedná se o 8 střídačů typu SP 2500-450. Dále jsem zvolila počet modulů v sérii a počet všech stringů. V tomto případě se jedná o 8 modulů zapojených v sérii s počtem 24 stringů.

The screenshot shows the 'Grid system definition, Variant VC0: "New simulation variant"' interface. It is divided into several sections:

- Sub-array:** Name 'PV Array', Orientation 'Fixed Tilted Plane', Tilt '45°', Azimuth '3°'. Pre-sizing Help shows 'No sizing' selected, with options for 'Enter planned power' (0.0 kWp) and '... or available area(modules)' (0 m²).
- Select the PV module:** Filter 'All PV modules', Isofoton, 110 Wp 29V Si-mono I 110/24, Until 2005, Manufacturer. Sizing voltages: Vmpp (60°C) 29.6 V, Voc (-10°C) 48.1 V.
- Select the inverter:** Output voltage 230 V Mono 50Hz, Sun Power, 2.5 kW 194 - 400 V LF Tr 50 Hz SP 2500-450, Until 1980. Nb. of inverters: 8. Operating voltage: 194-400 V, Global Inverter's power: 20.0 kWac, Input maximum voltage: 450 V.
- Design the array:**
  - Number of modules and strings: Mod. in series 8 (checked 'between 7 and 9'), Nb. strings 24.
  - Operating conditions: Vmpp (60°C) 237 V, Vmpp (20°C) 284 V, Voc (-10°C) 385 V.
  - Plane irradiance: 1000 W/m².
  - Max. operating power (at 1000 W/m² and 50°C): 19.0 kW (STC selected).
  - Array nom. Power (STC): 21.1 kWp.
  - Summary: Nb. modules 192, Area 164 m².

Obr. 2.3 Základní údaje o analyzované elektrárně

## 2.1.2 Výsledky simulace

Základní výsledky simulace nalezneme na obr. 2.4, kde nalezneme hodnotu horizontálního globálního záření, která činí 1118,8 kWh/m<sup>2</sup>. Průměrnou roční intenzitu slunečního záření lze snadno spočítat, pokud k horizontálnímu globálnímu záření přičteme procentní hodnotu globálního záření v rovině na modul a odečteme procentní hodnotu, která zahrnuje faktor AM a udává, o kolik % se liší tato hodnota od standardní hodnoty AM (kap. 1.3). Následně pak obdržíme hodnotu slunečního záření dopadajícího na FV panely. Tato hodnota činí 1258 kWh/m<sup>2</sup>, což odpovídá průměrné roční intenzitě slunečního záření v ČR (kap. 1.3). Pro získání celkové vyrobené elektrické energie za rok stačí hodnotu slunečního záření dopadajícího na FV panely vynásobit celkovou plochou



FVE a účinností modulů. Celková vyrobená elektrická energie pak činí 26,56 MWh. Pokud tuto hodnotu dále vynásobíme ztrátami vznikajícími na vedení, ve střídačích a ztrátami vznikajícími v důsledku úrovně slunečního záření, okolní teploty a kvality modulů, dostaneme výslednou elektrickou energii dodávanou FVE do sítě nn. Výsledná elektrická energie do sítě, kterou dodává naše analyzovaná elektrárna, činí 21,07 MWh (obr. 2.5).

**Balances and main results**

	GlobHor kWh/m <sup>2</sup>	DiffHor kWh/m <sup>2</sup>	T_Amb °C	GlobInc kWh/m <sup>2</sup>	GlobEff kWh/m <sup>2</sup>	EArray MWh	E_Grid MWh	PR ratio
January	25.3	13.71	-0.68	52.3	51.4	0.994	0.895	0.809
February	44.3	22.32	0.29	77.7	76.3	1.471	1.345	0.819
March	86.8	49.64	4.19	115.3	112.7	2.140	1.966	0.807
April	125.9	65.02	9.28	140.9	137.0	2.528	2.325	0.781
May	157.7	76.86	13.74	152.1	147.5	2.662	2.437	0.758
June	165.6	83.30	17.10	152.2	147.5	2.639	2.413	0.751
July	168.1	83.05	18.97	157.7	152.8	2.701	2.472	0.742
August	142.6	67.59	18.74	150.9	146.6	2.584	2.370	0.744
September	96.4	50.74	13.74	119.6	116.4	2.109	1.932	0.765
October	58.8	37.29	9.06	85.5	83.5	1.568	1.429	0.792
November	28.1	17.95	4.28	48.5	47.5	0.905	0.807	0.789
December	19.3	12.74	0.75	39.9	39.0	0.765	0.682	0.810
Year	1118.8	580.22	9.17	1292.7	1258.1	23.065	21.072	0.772

**Legends**

GlobHor Global horizontal irradiation

DiffHor Horizontal diffuse irradiation

T\_Amb Ambient Temperature

GlobInc Global incident in coll. plane

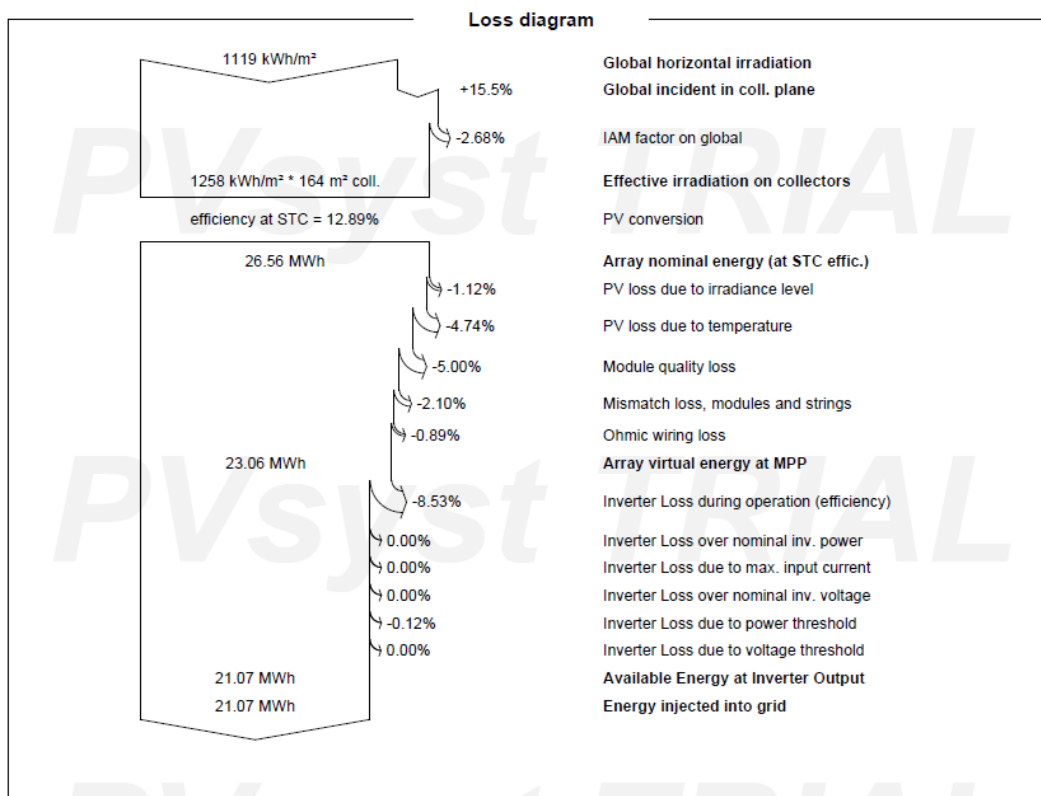
GlobEff Effective Global, corr. for IAM and shadings

EArray Effective energy at the output of the array

E\_Grid Energy injected into grid

PR Performance Ratio

*Obr. 2.4 Základní výsledky analyzované elektrárny*



Obr. 2.5 Diagram ztrát analyzované elektrárny

## 2.2 Reálná výroba

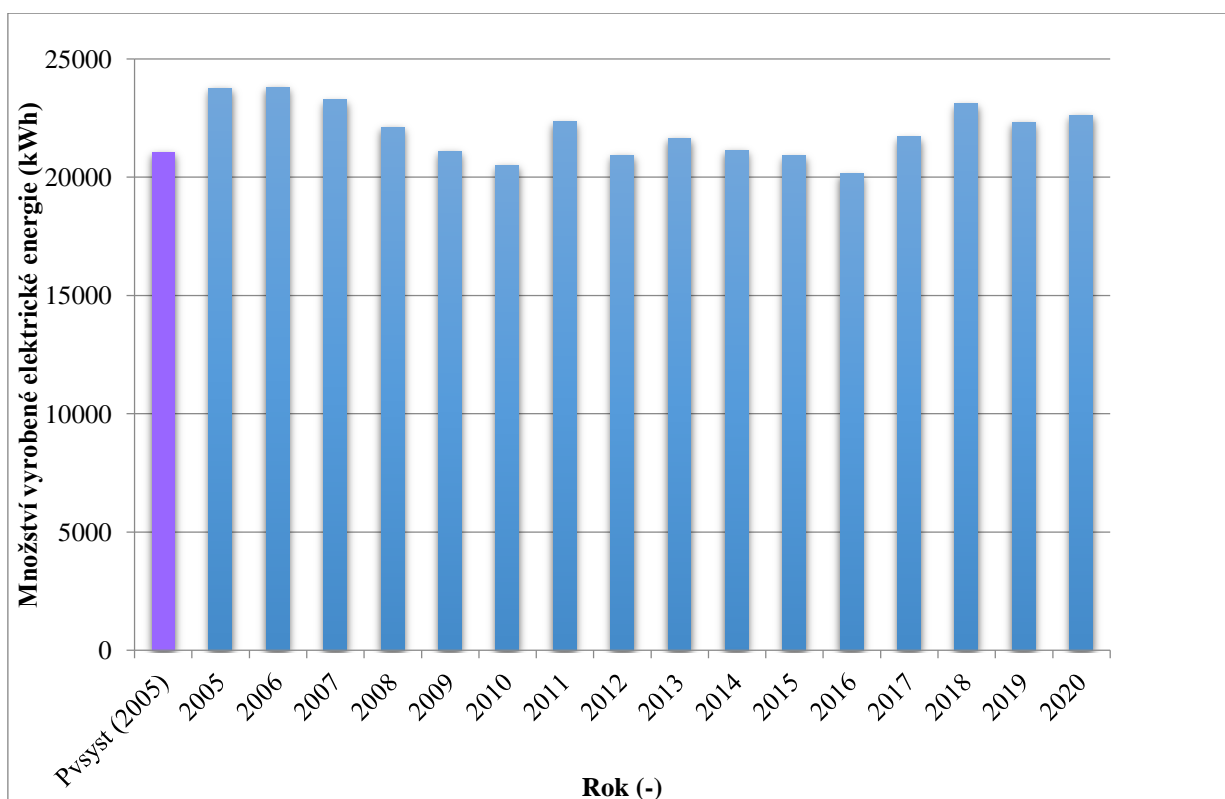
Hodnoty vyrobené elektrické energie jsou sledovány již od doby, kdy byla elektrárna uvedena do provozu, tedy od roku 2004 až doteď. Tyto údaje jsou zaznamenány komunikačním softwarem na PC. Celkovou elektrickou energií, kterou dodala daná FVE do sítě nn během následujících let můžeme vidět v tab. 2.1. Podle množství vyrobené elektrické energie během jednotlivých let můžeme vidět, že elektrárna vyráběla největší množství elektrické energie po dobu 3 let od uvedení do provozu. To je dáno tím, že během začátku svého provozu elektrárna pracuje na maximální výkon a postupem času vlivem degradace jednotlivých komponent dochází ke snížení její výkonnosti. Dále můžeme vidět, že nejmenší množství vyrobené elektrické energie je v letech 2016, kdy množství elektrické energie činí 20139 kWh. To je způsobeno vlivem počasí, tedy kratší dobou globálního záření dopadajícího na kolektor během tohoto roku.

Tab. 2.1 Množství vyrobené el. energie v jednotlivých letech

Rok	Množství vyrob. el. energie (kWh)
2005	23763
2006	23803
2007	23267
2008	22112
2009	21085
2010	20506
2011	22339
2012	20923
2013	21654
2014	21127
2015	20919
2016	20139
2017	21709
2018	23112
2019	22319
2020	22610

### 2.3 Porovnání reálné výroby se softwarovou simulací

Jak vidíme na obr. 2.6, elektrárna během svých 17 let svého provozu vykazuje vyšší množství vyrobené elektrické energie než hodnota elektrické energie získaná programem PVsyst. Z tohoto důvodu mohu říct, že elektrárna je ve velmi dobrém stavu. Nejméně se hodnota vyrobené elektrické energie od získané elektrické energie softwarem liší v roce 2009, kdy tento rozdíl činí 13 kWh, odchylka mezi těmito hodnotami tedy činí 0,06 %. Nejvíce se pak hodnota vyrobené elektrické energie od získané elektrické energie softwarem liší v roce 2006, kdy se liší o 2731 kWh, což odpovídá odchylce 11,47 %. Na základě výsledků simulace shledávám přesnost programu za dostačující.



Obr. 2.6 Porovnání množství reálné vyrobené elektrické energie s množstvím elektrické energie získané programem PVsyst

### 3 Softwarová simulace zahrnující degradaci a parametry FVE

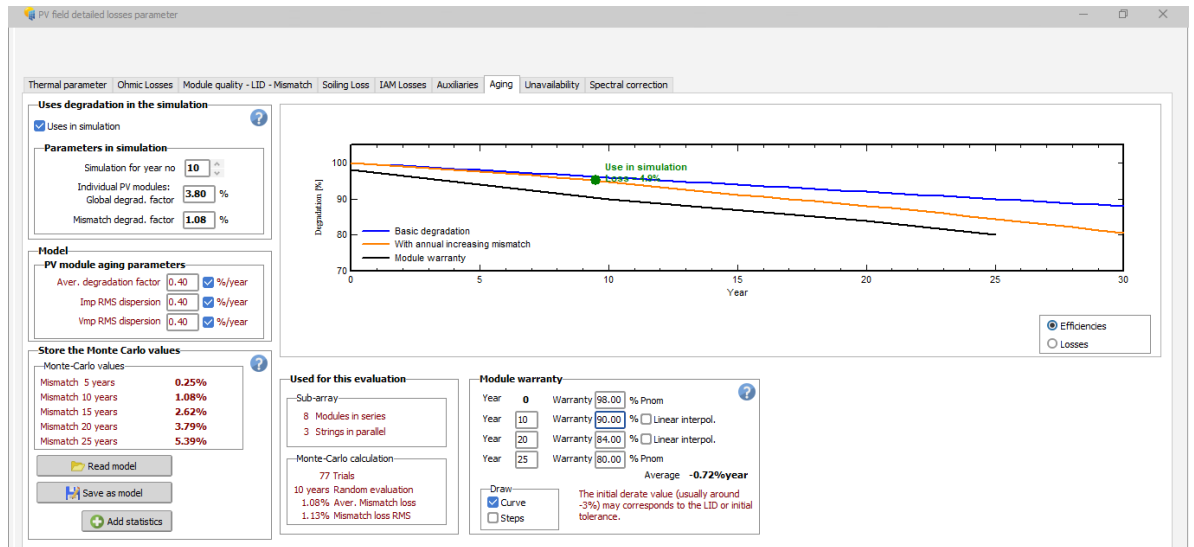
Časová degradace působí na všechny části fotovoltaické elektrárny. Program PVsyst zohledňuje faktor dlouhodobé degradace jednoho FV modulu a rostoucí nesoulad mezi moduly, neboť ne všechny moduly stárnou stejně rychle. U sériově propojených panelů totiž vždy existuje určitý nesoulad výkonů mezi jednotlivými panely. Výkonová tolerance panelů je obvykle udávána jako  $\pm 3\%$  a platí, že tento nesoulad se časem vlivem degradace zvyšuje. K tomuto nesouladu přispívá i teplota, která je v každém místě panelů různá a znečištění panelů (nerovnoměrné znečištění panelů). Dalším důležitým faktorem, který tento nesoulad významně ovlivňuje, je rychlost a přesnost přizpůsobení se střídače klimatickým podmínkám a osvit. Klasické střídače reagují buď pomalu, anebo vůbec při takovýchto stavech, a to představuje snížení produktivity systému. [37, 38]

Dále simulace zohledňuje degradaci baterií určených pro skladování energie, které stárnou rychleji než FVE a měly by tak být měněny až několikrát během životnosti FVE. Simulace dále bere v potaz stárnutí střídačů, které je nutné průběžně opravovat či dokonce vyměnit za nové, a nakonec stárnutí jednotlivých prvků elektroinstalace, jako jsou přepěťové ochrany atp.. [38]

#### 3.1 Simulace zahrnující degradaci FV panelů

##### 3.1.1 Model simulace

Nejprve jsem nasimulovala degradaci FVE v jednotlivých letech, a to pro průměrnou roční degradaci FV panelů 0,4 % a pro činitele zahrnující nerovnoměrné stárnutí všech panelů taktéž 0,4 %. Firma Isofoton garantuje, že po 10 letech provozu FVE neklesne její výkon pod 90 % nominálního výkonu a po 25 letech pod 80 % nominálního výkonu. Tyto údaje jsem zadala do simulace (obr. 3.1).



Obr. 3.1 Údaje o časové degradaci

Dále jsem simulaci zpřesnila tím, že jsem do programu zadala údaje o počasí pro jednotlivé roky. Jedná se o tyto údaje: teplota, vlhkost, intenzita slunečního záření a rychlost větru (obr. 3.3). Jednotlivé veličiny byly změřeny meteorologickou stanicí nacházející se na fakultě elektrotechnické. Tyto veličiny jsou průběžně ukládány do textového dokumentu (obr. 3.2)

Date	Time	Temp	Hi	Low	Out	Dew	Wind	Wind	Wind	Hi	Hi	Wind	Heat	THW	THSW	Bar	Rain	Rain	Solar	Solar
		Out	Temp	Temp	Pt.	Speed	Dir	Run	Speed	Dir	Chill	Index	Index	Index	Bar	Rate	Rate	Rad.	Energy	
01.01.14	0:05	1.7	1.7	1.7	100	1.7	0.0	---	0.00	0.0	---	1.7	1.7	1.7	-0.2	1019.0	0.00	0.00	0	
01.01.14	0:10	1.7	1.7	1.7	100	1.7	0.0	---	0.00	0.0	---	1.7	1.7	1.7	-0.2	1019.0	0.00	0.00	0	
01.01.14	0:15	1.7	1.7	1.7	100	1.7	0.0	---	0.00	0.0	---	1.7	1.7	1.7	-0.2	1018.9	0.00	0.00	0	
01.01.14	0:20	1.7	1.7	1.6	100	1.7	0.0	---	0.00	0.0	---	1.7	1.7	1.7	-0.2	1018.9	0.00	0.00	0	
01.01.14	0:25	1.6	1.6	1.5	100	1.6	0.0	---	0.00	0.0	---	1.6	1.6	1.6	-0.3	1018.9	0.00	0.00	0	
01.01.14	0:30	1.5	1.5	1.5	100	1.5	0.0	---	0.00	0.0	---	1.5	1.6	1.6	-0.4	1018.8	0.00	0.00	0	
01.01.14	0:35	1.6	1.6	1.5	100	1.6	0.0	---	0.00	0.0	---	1.6	1.7	1.7	-0.3	1018.8	0.00	0.00	0	
01.01.14	0:40	1.6	1.6	1.6	100	1.6	0.0	---	0.00	0.0	---	1.6	1.7	1.7	-0.3	1018.8	0.00	0.00	0	
01.01.14	0:45	1.6	1.6	1.6	100	1.6	0.0	---	0.00	0.0	---	1.6	1.7	1.7	-0.3	1018.7	0.00	0.00	0	
01.01.14	0:50	1.6	1.6	1.6	100	1.6	0.0	---	0.00	0.0	---	1.6	1.7	1.7	-0.3	1018.7	0.00	0.00	0	
01.01.14	0:55	1.6	1.6	1.6	100	1.6	0.0	---	0.00	0.0	---	1.6	1.7	1.7	-0.3	1018.7	0.00	0.00	0	
01.01.14	1:00	1.6	1.6	1.5	100	1.6	0.0	---	0.00	0.0	---	1.6	1.6	1.6	-0.3	1018.4	0.00	0.00	0	
01.01.14	1:05	1.5	1.5	1.5	100	1.5	0.0	---	0.00	0.0	---	1.5	1.6	1.6	-0.4	1018.4	0.00	0.00	0	
01.01.14	1:10	1.5	1.5	1.5	100	1.5	0.0	---	0.00	0.0	---	1.5	1.6	1.6	-0.4	1018.4	0.00	0.00	0	
01.01.14	1:15	1.6	1.8	1.5	100	1.6	0.4	SE	0.13	3.1	SE	1.6	1.6	1.6	-0.3	1018.4	0.00	0.00	0	
01.01.14	1:20	1.6	1.8	1.6	100	1.6	0.4	SSE	0.13	3.1	SE	1.6	1.7	1.7	-0.3	1018.4	0.00	0.00	0	
01.01.14	1:25	1.6	1.6	1.6	100	1.6	0.0	---	0.00	0.0	---	1.6	1.7	1.7	-0.3	1018.4	0.00	0.00	0	
01.01.14	1:30	1.7	1.8	1.6	100	1.7	0.4	SE	0.13	2.2	SSE	1.7	1.7	1.7	-0.2	1018.3	0.00	0.00	0	
01.01.14	1:35	1.7	1.8	1.7	100	1.7	0.4	SSE	0.13	2.2	SE	1.7	1.8	1.8	-0.1	1018.3	0.00	0.00	0	
01.01.14	1:40	1.9	2.0	1.8	100	1.9	0.9	SE	0.27	3.6	ESE	1.6	2.0	1.6	-0.3	1018.3	0.00	0.00	0	
01.01.14	1:45	2.0	2.1	1.9	100	2.0	0.4	SE	0.13	3.1	SE	2.0	2.1	2.1	0.2	1018.2	0.00	0.00	0	
01.01.14	1:50	1.8	2.0	1.7	100	1.8	0.4	SSW	0.13	2.2	SSW	1.8	1.9	1.9	0.0	1018.2	0.00	0.00	0	
01.01.14	1:55	1.9	1.9	1.8	100	1.9	0.4	SSE	0.13	2.7	S	1.9	1.9	1.9	0.1	1018.2	0.00	0.00	0	
01.01.14	2:00	1.9	2.0	1.8	100	1.9	0.4	SE	0.13	3.1	SE	1.9	2.0	2.0	0.1	1018.2	0.00	0.00	0	
01.01.14	2:05	1.8	1.9	1.8	100	1.8	0.0	---	0.00	0.0	---	1.8	1.9	1.9	0.0	1018.2	0.00	0.00	0	
01.01.14	2:10	1.8	1.8	1.8	100	1.8	0.0	---	0.00	0.0	---	1.8	1.9	1.9	0.0	1018.2	0.00	0.00	0	
01.01.14	2:15	1.9	2.0	1.8	100	1.9	0.9	SSE	0.27	3.1	SSE	1.5	1.9	1.6	-0.3	1018.1	0.00	0.00	0	
01.01.14	2:20	2.0	2.1	1.9	100	2.0	0.9	SSE	0.27	2.7	SSE	1.6	2.1	1.7	-0.2	1018.1	0.00	0.00	0	
01.01.14	2:25	2.0	2.0	2.0	100	2.0	0.0	---	0.00	0.0	---	2.0	2.1	2.1	0.2	1018.1	0.00	0.00	0	
01.01.14	2:30	2.0	2.1	2.0	100	2.0	0.0	---	0.00	0.0	---	2.0	2.1	2.1	0.2	1018.1	0.00	0.00	0	
01.01.14	2:35	2.1	2.1	2.0	100	2.1	0.0	---	0.00	0.0	---	2.1	2.1	2.1	0.2	1018.1	0.00	0.00	0	
01.01.14	2:40	2.1	2.2	2.1	100	2.1	0.0	---	0.00	0.0	---	2.1	2.2	2.2	0.3	1018.1	0.00	0.00	0	
01.01.14	2:45	2.2	2.2	2.2	100	2.2	0.0	---	0.00	0.0	---	2.2	2.2	2.2	0.3	1018.1	0.00	0.00	0	
01.01.14	2:50	2.2	2.2	2.1	100	2.2	0.0	---	0.00	0.0	---	2.2	2.2	2.2	0.3	1018.1	0.00	0.00	0	

Obr. 3.2 Veličiny změřené meteorologickou stanicí

Geographical site parameters for New.SIT (under modification)

Geographical Coordinates Monthly meteo Interactive Map

Site **PocasiN2010 (Czech Republic)**

Data source PocasiN2010

	Global horizontal irradiation kWh/m <sup>2</sup> /mth	Temperature °C	Wind Velocity m/s	Relative humidity %
January	18.9	-3.1	3.20	86.0
February	38.5	-0.4	2.70	82.0
March	84.8	4.6	3.70	73.0
April	133.5	10.0	2.80	68.0
May	118.5	12.5	2.90	79.0
June	166.2	18.1	2.30	70.0
July	187.9	22.0	2.20	67.0
August	123.4	17.7	2.90	80.0
September	86.5	12.2	2.60	81.0
October	56.1	7.1	2.80	83.0
November	24.3	5.2	3.50	89.0
December	20.3	-4.1	3.20	89.0
<b>Year</b>	<b>1058.9</b>	<b>8.5</b>	<b>2.9</b>	<b>78.9</b>

Obr. 3.3 Údaje o počasí z roku 2010

Po tomto kroku došlo pouze k uložení dat do databáze a je nutné tato data z databáze vygenerovat (obr. 3.4).

Generation of Synthetic Hourly Meteo Values

Source data (site, monthly values)

Country / Region: Europe Site: PocasiN2010 PocasiN2010

Meteo file to be created (hourly data)

Type: Synthetic Site: PocasiN2010  
Source: PocasiN2010  
File name: PocasiN2010\_\_SYN.MET  
Initial random seed: 1

	Global [kWh/m <sup>2</sup> /mth]	Diffuse [kWh/m <sup>2</sup> /mth]	Temper. [°C]
January	18.9		-3.1
February	38.5		-0.4
March	84.8		4.6
April	133.5		10.0
May	118.5		12.5
June	166.2		18.1
July	187.9		22.0
August	123.4		17.7
September	86.5		12.2
October	56.1		7.1
November	24.3		5.2
December	20.3		-4.1
<b>Year</b>	<b>1058.9</b>		<b>8.5</b>

Irradiation units:  
 kWh/m<sup>2</sup>/day  
 kWh/m<sup>2</sup>/mth  
 MJ/m<sup>2</sup>/day  
 MJ/m<sup>2</sup>/mth  
 W/m<sup>2</sup>  
 Clearness Index Kt

The monthly diffuse irradiation is not defined for this site.  
 PVSyst will apply the synthetic generation without possibility to renormalise the hourly diffuse.

Generation options:  
 Use Monthly Diffuse  
 Region typology (for temperatures):  
 Swiss Plateau, land, important mist

Obr. 3.4 Vygenerování počasí z databáze

Dále jsem simulaci zpřesnila tím, že jsem podle parametrů analyzovaného systému upravila různé druhy ztrát. Nejprve jsem přikročila k úpravě tepelné ztráty, která se skládá z konstantní složky  $U_c$  a složky  $U_v$ , která je závislá na rychlosti větru. V nápovědě PVsyst je uvedeno, že bylo zkoumáno 7 fotovoltaických systémů připojených k síti. Jedná se o systémy, které byly namontovány na střechy, do střechy a na fasády pod různými sklony a s různými azimuty. U většiny z nich se tepelný faktor pohyboval mezi 20-30 W/m<sup>2</sup>K. Pro systémy používanými polykrystalický křemík, namontovanými na střechu, s orientací na jih s úhlem sklonu 45°, činil tepelný faktor 29 W/m<sup>2</sup>K. Mnoho uživatelů však uvedlo, že průměrná rychlost větru činí 3 m/s, faktor  $U_c=25$  W/m<sup>2</sup>K a  $U_v=1,2 \cdot 3$  W/m<sup>2</sup>K/m/s, což odpovídá celkovému tepelnému faktoru 28,6 W/m<sup>2</sup>K. [39]

Podle metoodat pro jednotlivé roky jsem zvolila průměrnou rychlost větru rovnou 3,2 m/s. Při faktoru  $U_c = 25$  W/m<sup>2</sup>K a  $U_v=1,2 \cdot 3,2$  W/m<sup>2</sup>K/m/s výsledný tepelný faktor činí 28,8 W/m<sup>2</sup>K.  $U_c$  jsem tedy v programu PVsyst upravila z původních 20 W/m<sup>2</sup>K na 25 W/m<sup>2</sup>K a  $U_v$  z 0 W/m<sup>2</sup>K/m/s na 3,8 W/m<sup>2</sup>K/m/s (obr. 3.5).

Obr. 3.5 Teplotní ztráty

FV moduly jsou se svorkovou skříní spojeny modulovým vedením typu CYKY 2Ax4, tedy o průřezu 4 mm<sup>2</sup>. Svorkové skříně se střídači spojuje stejnosměrné vedení typu CYKY 2Ax4 o průřezu 2,5 mm<sup>2</sup>. Střídavé vedení, které se nachází mezi střídačem a rozvaděčem, je typu CYKY 3Cx2,5 o průřezu 2,5 mm<sup>2</sup>. Vzhledem k tomu, že technická



zpráva analyzované elektrárny neobsahuje údaje o délkách modulového, ss a střídavého vedení, je nutné ze znalosti objektu a ze schématu nacházející se v technické zprávě, toto vedení vhodně zvolit. Délka vedení mezi moduly a svorkovou skříní byla odhadem stanovena na 280 m, mezi svorkovou skříní a střídačem pak byla stanovena délka na 100 m a nakonec od střídače k rozvaděči na 5 m.

Dále jsem v záložce Ohmické ztráty zadala délku a průřez střídavého vedení (obr. 3.6). Druh materiálu vodiče je měď.

The screenshot shows the 'PV field detailed losses parameter' window. The 'Ohmic Losses' tab is selected. Under 'DC circuit: ohmic losses for the array', 'Global wiring resistance' is set to 113.6 mΩ with 'Calculated' checked. 'Loss fraction at STC' is 3.11% with 'Default' checked. 'Voltage Drop across series diode' is 0.0 V. Under 'AC losses after the inverter', 'AC circuit: inverter to injection point (per inverter)' is checked. 'Uses AC circuit ohmic loss' is checked. 'Length Inverter to injection' is 5.0 m, 'Loss fraction at STC' is 0.35%, 'Wire section' is 2.5 mm², and 'Material' is Copper. STC data: Pac = 2.45 kW, Vac = 230 V Mono, I = 10.64 A. Voltage drop at STC: 0.8 V (0.35%). Other options are unchecked.

Obr. 3.6 Ohmické ztráty

V záložce Podrobný výpočet (obr. 3.7) jsem zadala délku modulového a stejnosměrného vedení a jejich průřezy. Dále jsem ponechala druh vodiče měď. Program stanovil celkový odpor modulového a stejnosměrného vedení na 113,6 mΩ. Průřezy včetně typu vodiče byly zjištěny z technické dokumentace analyzovaného systému.

**Wiring layout**

One string : 8 modules

String module connections: Aver. length m/circuit: 280, Section mm<sup>2</sup>: 4 mm<sup>2</sup>

Main box to inverter: Aver. length m/circuit: 100, Section mm<sup>2</sup>: 4 mm<sup>2</sup>

Please specify the total wire length for each circuit ("Sketch" button)

Per circuit		Global array	
Current A	Resistance mΩ	Resistance mΩ	
3.2	1316	24 strings :	54.8
9.5	470	8 inverters :	58.8

Field global wiring resistance: 114 mΩ

MPP loss fraction at STC: 3.1 %

Total copper mass: 237 kg

Total wire cost: 0

**Wiring layout**

Parallel strings

Groups of parallel strings

**Optimization**

Target loss fraction: 1.5 %

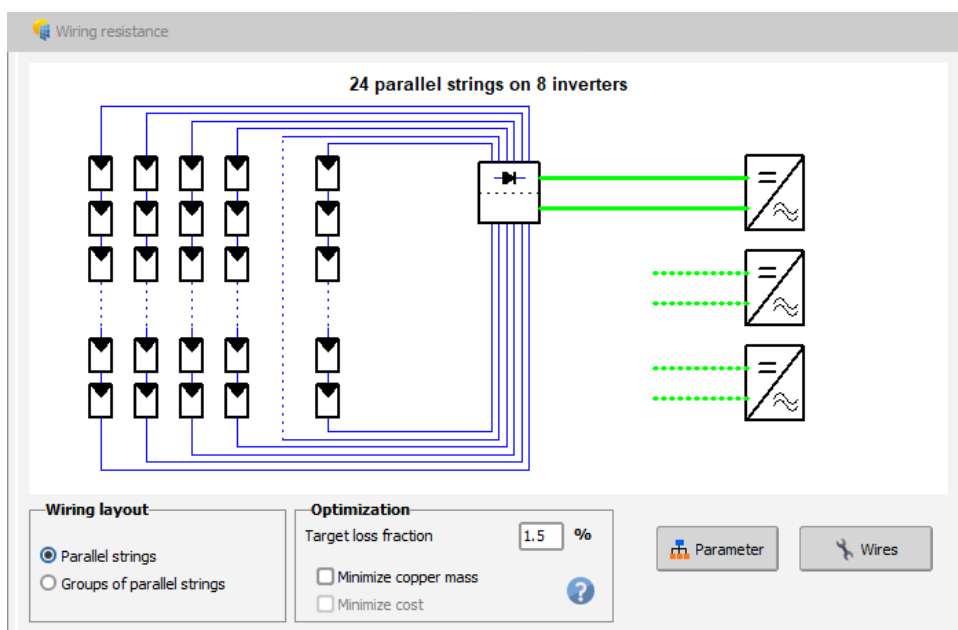
Minimize copper mass

Minimize cost

Buttons: Schema, Wires

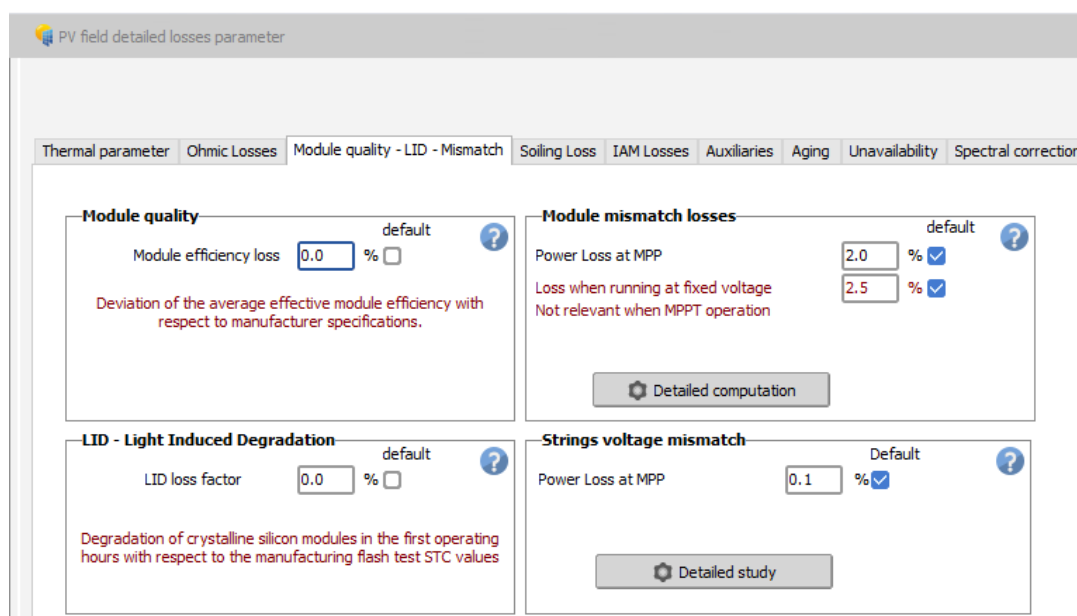
Obr. 3.7 Délky a průřezy modulového a DC vedení

Pro lepší představu jak jsou moduly vzájemně propojeny, slouží detailní schéma analyzovaného systému (obr. 3.8), které lze taktéž zobrazit po kliknutí tlačítka Schéma. Zde vidíme, že systém je složen z 8 elektricky oddělených polí, přičemž každé pole obsahuje 24 modulů. Každé toto pole je připojeno k vlastnímu střídači.



Obr. 3.8 Schéma elektrárny

Dále jsem přistoupila k zadání ztráty kvality modulu (obr. 3.9). Tento parametr prakticky slouží pro zachování jisté rezervy na údaje udávané výrobcem, např. na záruku modulu, atd. Zjistila jsem, že PVsyst značně systém podhodnocuje, neboť tento parametr uvádí jako 5 %. Já jsem tuto hodnotu přenastavila z 5 % na 0 %, neboť skutečná výroba značně převyšuje nasimulovanou výrobu. [39]

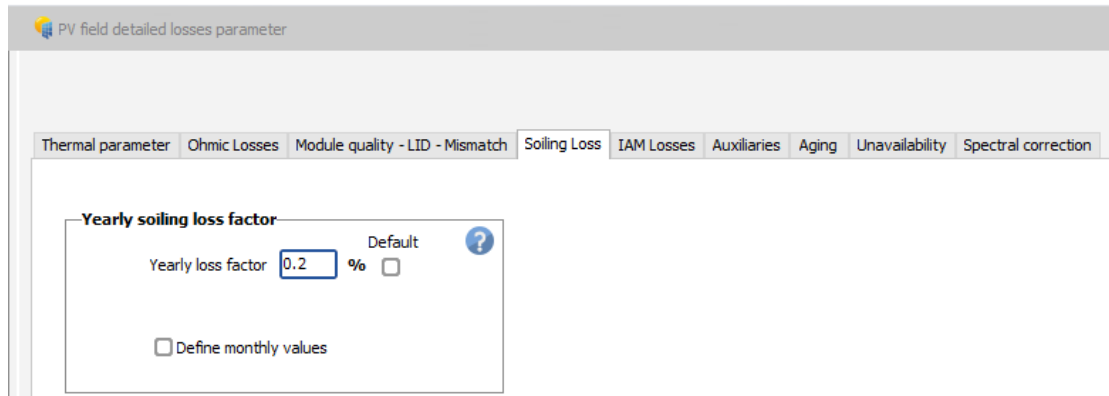


Obr. 3.9 Ztráty způsobené kvalitou modulů

Nakonec jsem zadala ztrátu znečištění modulu. Mnoho studií, které byly prováděny ve střední Evropě v obytných zónách uvádí, že hodnota znečištění je v těchto místech nízká a je možno ji zanedbat. Dalším důležitým faktorem, který jsem při stanovení nečistot zahrnovala, je sklon panelu, který činí 45°. Při tomto sklonu dochází k jen velmi malému zadržování nečistot na panelech. Na druhou stranu, i když je malá pravděpodobnost znečištění panelu mechem, lišejníkem atp., určitý problém tvoří znečištění trusem ptáků, který jen velmi těžko odstraní déšť. Dále jsem uvážila i skutečné znečištění FV panelu analyzované elektrárny, které můžeme vidět na obr. 3.10. Ke všem těmto vlivům jsem při stanovování koeficientu přihlížela a stanovila jsem tuto hodnotu na 0,2 % za rok (obr. 3.11). Opět jsem tedy upravila hodnotu z 0 % na 0,2 % znečištění za rok. [39]



Obr. 3.10 Znečištění panelu analyzované FVE [36]



Obr. 3.11 Ztráty způsobené znečištěním modulů

Následně jsem spustila simulaci. Při zkoumání velikosti průměrného degradačního faktoru jsem našla mnoho studií, které uvádí, že tento faktor činí 1 %/rok [40]. V dalším kroku jsem tedy nechala simulaci vykreslit pro tuto hodnotu. Skutečná vyrobená elektrická energie se ale velmi lišila od nasimulované výroby. Z tohoto důvodu jsem hledala další studie a zjistila jsem, že novější studie uvádí, že se tento parametr pohybuje mezi (0,3 – 0,5) %/rok [38, 41-43]. Dále jsem nechala simulaci vykreslit pro degradační

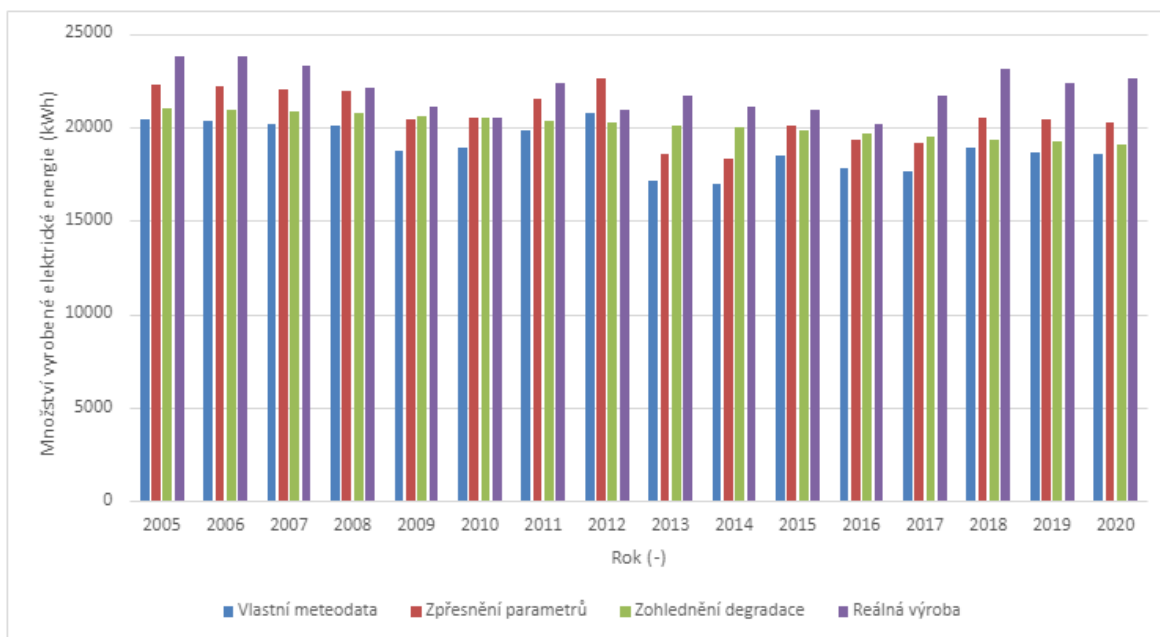
faktor 0,3 %/rok. Nakonec jsem simulaci spustila bez ohledu zpřesňujících ztrát pro starší verzi meteorodat Meteororm 7.3.

### 3.2 Zhodnocení přesnosti simulace

Na obr. 3.11 můžeme vidět průběhy skutečné a nasimulované elektrické energie v jednotlivých letech. Jak vidíme, odchylka mezi skutečnou a nasimulovanou vyrobenou elektrickou energií činí 0,06-16,21 %. Hlavní příčinou tohoto rozdílu je proměnlivost počasí v uplynulých letech, které simulace nezohledňuje. Proto jsem dále zpřesnila simulaci tím, že jsme do programu vložila meteorologická data z dané oblasti. Ne všechna data v jednotlivých letech však byla kvůli výpadku meteorostanice k dispozici, konkrétně hodnoty globálního záření. Z tohoto důvodu bylo nutné tato chybějící data vhodně zvolit. Z obr. 3.12 můžeme vidět, že po zadání vlastních údajů o počasí, výsledky už značně vykazují menší rozdíly. Pro ještě větší zpřesnění jsem v programu PVsyst upravila teplotní ztráty, ztráty vzniklé na vedení a ztráty způsobené znečištěním panelů. Jak vidíme z tab. 3.1 zahrnutím těchto ztrát jsem značně snížila odchylku mezi skutečnou a nasimulovanou vyrobenou energií, která nyní činí 0,03-14,14 %.

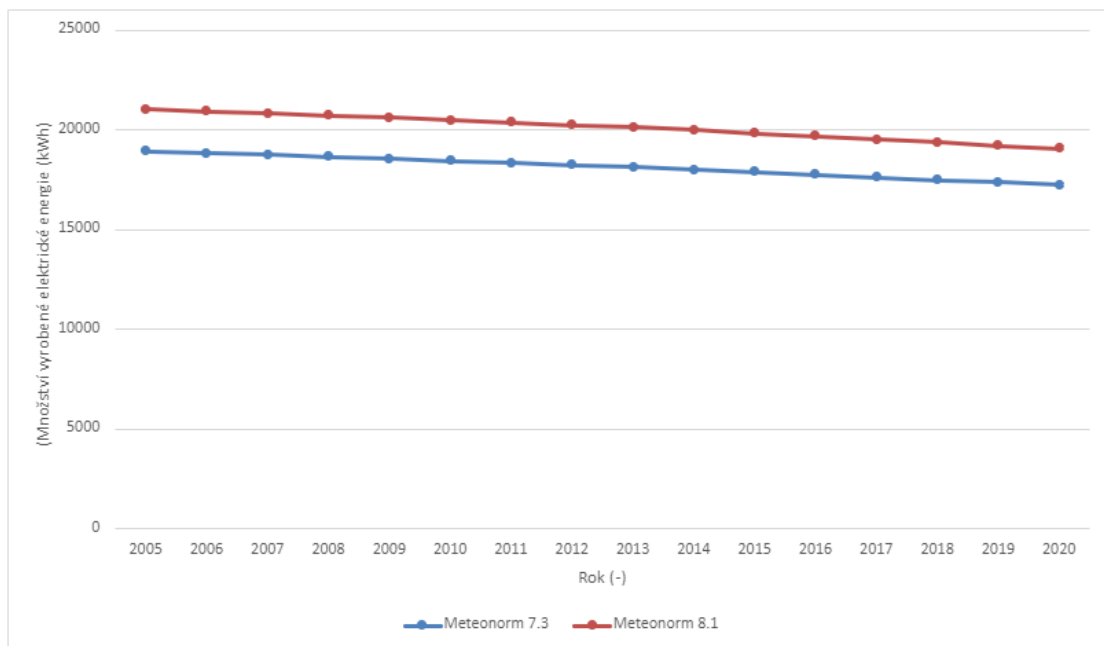
Tab. 3.1 Skutečné množství elektrické energie a výstupy z programu PVsyst

Rok	Množství vyrobené elektrické energie (kWh)			
	Vlastní meteorodata	Zpřesnění parametrů	Zohlednění degradace	Reálná výroba
2005	20434	22252	21027	23763
2006	20339	22180	20930	23803
2007	20160	22022	20828	23267
2008	20090	21911	20721	22112
2009	18728	20397	20609	21085
2010	18901	20499	20493	20506
2011	19852	21553	20373	22339
2012	20800	22612	20248	20923
2013	17154	18592	20117	21654
2014	16971	18316	19981	21127
2015	18446	20113	19836	20919
2016	17836	19312	19681	20139
2017	17631	19148	19524	21709
2018	18895	20512	19366	23112
2019	18645	20379	19210	22319
2020	18565	20254	19065	22610



Obr. 3.12 Množství vyrobené elektrické energie a výstupy z programu PVsyst

Hodnoty skutečné a nasimulované vyrobené elektrické energie se od sebe stále liší. To může být způsobeno mnoha dalšími parametry. Jako hlavní parametr jsem stanovila průměrný degrační faktor, neboť simulace uvažuje lineární roční degradaci (obr. 3.13). Jak jsem již výše zmínila, přesnost simulace je tedy nejvíce ovlivněna vstupními meteorodaty (obr. 3.13).



Obr. 3.13 Množství vyrob. el. energie při použití Meteororm 7.3 a Meteororm 8.1

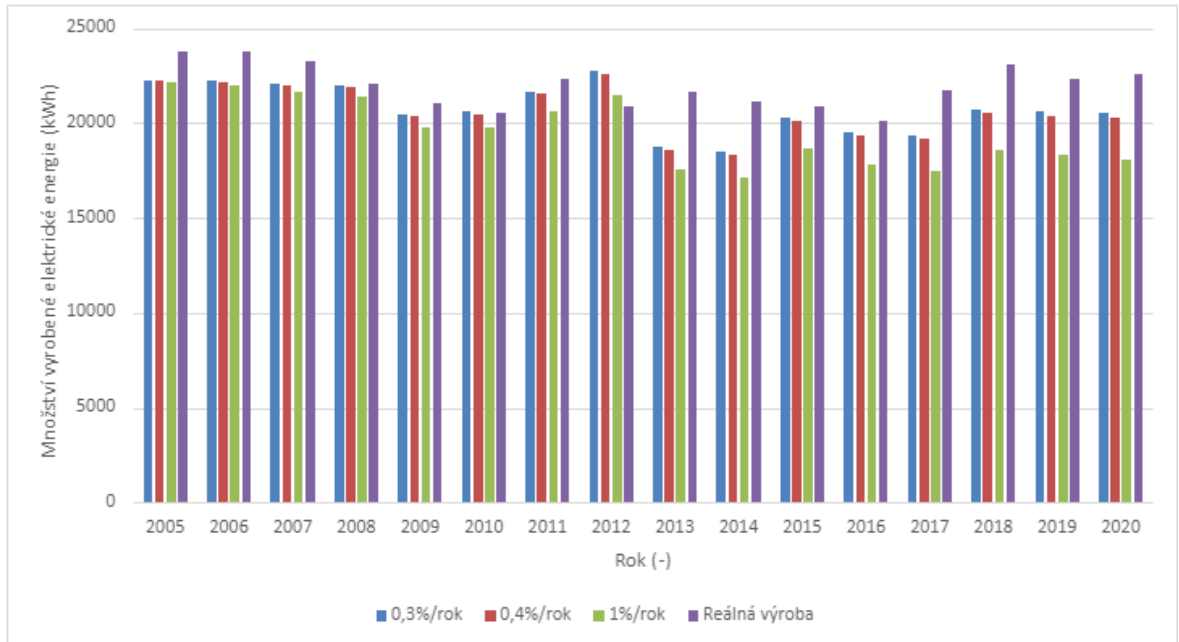
Nakonec jsem nechala simulaci vykreslit pro průměrný degradační faktor 0,3 % a 1 %, výsledky můžeme vidět v následující tabulce:

Tab. 3.2 Množství vyrobené el. energie pro různé hodnoty průměrné degradace

Rok	Množství vyrobené elektrické energie (kWh)			Skutečná vyrob. el energie (kWh)
	0,3 %/rok	0,4 %/rok	1 % rok	
2005	22263	22252	22183	23763
2006	22212	22180	21970	23803
2007	22074	22022	21671	23267
2008	21984	21911	21420	22112
2009	20484	20397	19803	21085
2010	20604	20499	19767	20506
2011	21681	21553	20637	22339
2012	22765	22612	21500	20923
2013	18734	18592	17542	21654
2014	18472	18316	17146	21127
2015	20299	20113	18696	20919
2016	19506	19312	17803	20139
2017	19356	19148	17519	21709
2018	20751	20512	18613	23112
2019	20633	20379	18349	22319
2020	20526	20254	18089	22610



Jak vidíme z obr. 3.14, při průměrném degradačním faktoru 1 % se nasimulovaná výroba značně liší od skutečné výroby, a to o 2,68-20 %. Odchylka pro roční průměrnou degradaci 0,3 % činí 0,48-13,48 %. Vzhledem k různým studiím jsem se rozhodla ponechat průměrný degradační faktor 0,4 %/rok.



Obr. 3.14 Množství vyrobené elektrické energie při různé průměrné degradaci

## 4 Porovnání výsledků simulací s teoretickými výpočty

### 4.1 Postup výpočtu

Při teoretickém výpočtu výroby elektrické energie jsem postupovala podle metodiky Dr. Cihelky. Výpočet byl proveden s ohledem na parametry analyzované elektrárny. Počítala jsem tedy, že intenzita slunečního záření bude dopadat na plochu se sklonem  $45^\circ$ . [44]

Nejprve je potřeba zjistit údaje nutné k výpočtům. Zeměpisná šířka byla zjištěna z map Google, nadmořská výška pak z map od Seznamu. Azimut a sklon kolektoru jsem zjistila z technické dokumentace. Při volbě reflexní schopnosti okolních ploch a sluneční konstanty jsem vycházela z nejčastěji používané hodnoty. Tyto údaje vidíme v následující tabulce: [17, 45, 46]

Tab. 4.1 Údaje nutné k určení intenzity slunečního záření

Název veličiny	Velikost veličiny
Zeměpisná šířka $\varphi$ :	$49,72^\circ$
Azimut kolektoru - $a_s$	$3^\circ$
Sklon kolektoru - $a_k$	$45^\circ$
Sluneční konstanta $I_0$ :	$1360 \text{ W/m}^2$
reflexní schopnost okolních ploch pro sluneční paprsky – r	0,2
Nadmořská výška H:	354 m

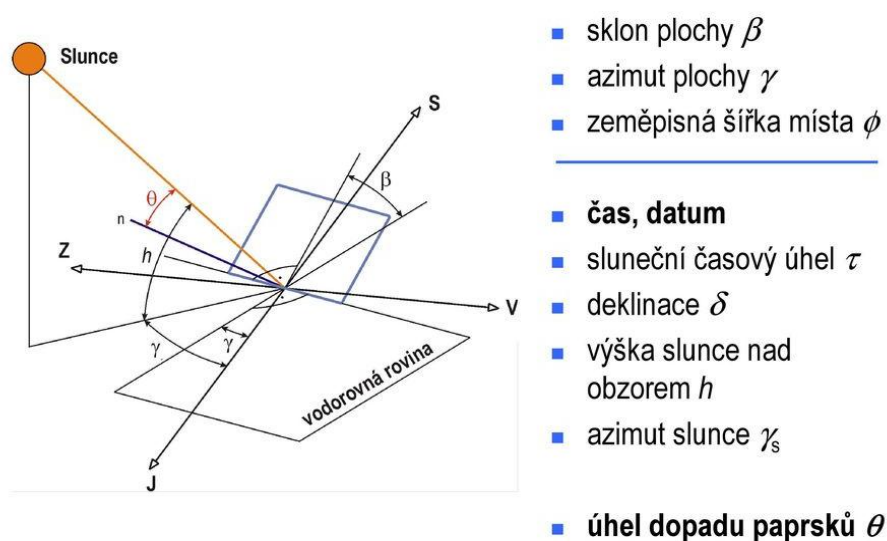
Dále je nutné znát hodnoty součinitele znečištění atmosféry, které byly změřeny v jednotlivých měsících v západních Čechách. Měření probíhalo v měřicí ústředně Comet MS3, hodnoty naměřilo čidlo SG-420. Střední hodnoty součinitele znečištění jsou uvedeny v následující tabulce:

Tab. 4.2 Hodnoty součinitele znečištění pro západní Čechy [47]

Měsíc	Velikost veličiny
Leden	3,15
Únor	3,21
Březen	3,04
Duben	3,1
Květen	3,07
Červen	3,02
Červenec	3,11
Srpen	3,09
Září	3,1
Říjen	3,05
Listopad	3,09
Prosinec	3,14

#### 4.1.1 Celková intenzita záření dopadající na panel

Při výpočtu celkové intenzity záření je nutné nejprve určit celkovou intenzitu slunečního záření dopadající na panel se sklonem  $45^\circ$  v dané lokalitě. Tato celková intenzita slunečního záření se stanovuje pro jednotlivé hodiny, neboť poloha slunce se ve dne mění. Poté vycházíme z průměrné denní intenzity dopadajícího slunečního záření, odkud počítáme celkovou energii, která dopadá na plochu o sklonu  $45^\circ$ . Závislost jednotlivých veličin na poloze slunce můžeme vidět na obr. 4.1



Obr. 4.1 Závislost jednotlivých veličin na poloze slunce [48]

Příklad výpočtu je uveden pro 21. ledna a hodinu 13:00. Nejprve jsme museli spočítat sluneční deklinaci  $\delta$  ze vztahu:

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \sin(t - 109^\circ) \text{ (}^\circ\text{)}, \quad (4.1)$$

kde  $t$  je úhel pořadí daného dne v roce

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \sin(50,28^\circ - 109^\circ) = -20,04^\circ, \quad (4.2)$$

$t$  se vypočítá ze vzorce:

$$t = 0,98^\circ \cdot D + 29,7^\circ \cdot M \text{ (}^\circ\text{)}, \quad (4.3)$$

kde  $D$  je den v měsíci a  $M$  měsíc.

$$t = 0,98^\circ \cdot 21 + 29,7^\circ \cdot 1 = 50,28^\circ \quad (4.4)$$

Obvykle se počítá jediná hodnota  $\delta$  pro celý měsíc, kdy se za  $D$  volí tzv. charakteristický den v měsíci. Vypočtená intenzita slunečního záření se pak bere jako průměrná hodnota celého měsíce.

Dále pak bylo nutné spočítat výšku slunce nad obzorem:

$$h = \arcsin(\sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \tau) \text{ (}^\circ\text{)}, \quad (4.5)$$

kde  $\varphi$  je zeměpisná šířka,  $\tau$  je tzv. časový úhel v obloukových sluncích, kdy 12 hodin odpovídá  $0^\circ$ , 11 hodin pak odpovídá  $345^\circ$  a 13 hodin odpovídá  $15^\circ$ .

$$\begin{aligned} h &= \arcsin(\sin -20,04^\circ \cdot \sin 49,72^\circ + \cos -20,04^\circ \cdot \cos 49,72^\circ \cdot \cos 15^\circ) \\ &= 18,98^\circ \end{aligned} \quad (4.6)$$

Dále je nutné vypočítat azimut slunce:

$$a = \arcsin\left(\frac{\cos \delta}{\cos h} \cdot \sin \tau\right) \text{ (rad)} \quad (4.7)$$

$$a = \arcsin\left(\frac{\cos -20,04^\circ}{\cos 18,98^\circ} \cdot \sin 15^\circ\right) = 0,26 \text{ rad} \quad (4.8)$$

Poté jsme vypočetli intenzitu přímého záření na plochu kolmou ke směru paprsků:

$$I_{Pn} = I_0 \cdot e^{-\frac{Z}{\varepsilon}} \left(\frac{W}{m^2}\right), \quad (4.9)$$

kde  $I_0$  je sluneční konstanta,  $Z$  součinitel znečištění atmosféry a  $\varepsilon$  je součinitel závislý na výšce slunce nad obzorem a na nadmořské výšce daného místa.

$$I_{Pn} = 1360 \cdot e^{-\frac{1360}{4,09}} = 629,94 \frac{W}{m^2} \quad (4.10)$$

Součinitel se vypočte z následujícího vzorce:

$$\varepsilon = \left(\frac{9,38076 \cdot \sin h + (0,003 + \sin h^2)^{0,5}}{2,0015 - H \cdot 10^{-4}} + 0,91018\right) (\text{°}), \quad (4.11)$$

kde  $H$  je nadmořská výška, v níž se nachází elektrárna.

$$\varepsilon = \left(\frac{9,38076 \cdot \sin 18,98^\circ + (0,003 + \sin 18,98^\circ)^{0,5}}{2,0015 - 354 \cdot 10^{-4}} + 0,91018\right) = 4,09^\circ \quad (4.12)$$

Poté je nutné znát úhel  $\gamma$ , který svírá normála osluněné plochy se směrem paprsků:

$$\gamma = \arccos(\sin h \cdot \cos \alpha + \cos h \cdot \sin \alpha \cdot \cos(a - a_s)) (\text{°}), \quad (4.13)$$

kde  $a_s$  je azimut kolektoru.

$$\begin{aligned} \gamma &= \arccos(\sin 18,98^\circ \cdot \cos 45^\circ + \cos 18,98^\circ \cdot \sin 45^\circ \cdot \cos(14,9^\circ - 3^\circ)) \\ &= 52,48^\circ \end{aligned} \quad (4.14)$$

Dále jsme spočetli intenzitu přímého slunečního záření na obecně položenou plochu:

$$I_P = I_{Pn} \cos \gamma \left( \frac{W}{m^2} \right) \quad (4.15)$$

$$I_P = 629,94 \cos 52,48^\circ = 383,62 \frac{W}{m^2} \quad (4.16)$$

Poté jsme spočetli intenzitu přímého slunečního záření na vodorovnou plochu:

$$I_{Ph} = I_{Pn} \sin h \left( \frac{W}{m^2} \right) \quad (4.17)$$

$$I_{Ph} = 629,94 \sin 18,98^\circ = 204,88 \frac{W}{m^2} \quad (4.18)$$

Intenzita difúzního záření na vodorovnou plochu se spočte jako:

$$I_{Dh} = 0,33 \cdot (I_0 - I_{Pn}) \cdot \sin h \left( \frac{W}{m^2} \right) \quad (4.19)$$

$$I_{Dh} = 0,33 \cdot (1360 - 629,94) \cdot \sin 18,98^\circ = 78,36 \frac{W}{m^2} \quad (4.20)$$

Intenzitu difúzního záření lze vypočítat podle:

$$I_D = 0,5 \cdot (1 + \cos a) \cdot I_{Dh} + 0,5 \cdot r \cdot (1 - \cos a) \cdot (I_{Ph} + I_{Dh}) \left( \frac{W}{m^2} \right), \quad (4.21)$$

kde  $r$  je reflexní schopnost okolních ploch pro sluneční paprsky.

$$I_D = 0,5 \cdot (1 + \cos 14,9^\circ) \cdot 78,36 + 0,5 \cdot 0,2 \cdot (1 - \cos 14,9^\circ) \cdot (204,88 + 78,36) = 77,99 \frac{W}{m^2} \quad (4.22)$$

A nakonec intenzita celkového záření se spočte jako:

$$I = I_p + I_D \left( \frac{W}{m^2} \right) \quad (4.23)$$

$$I = I_p + I_D = 383,62 + 77,99 = 461,61 \frac{W}{m^2} \quad (4.24)$$

#### 4.1.2 Celkové množství energie dopadající na panel

Pro výpočet celkového množství elektrické energie dopadající na panel se vychází z teoretického množství dopadající energie za den. Při výpočtu teoretického množství energie je nutné brát v potaz dobu svitu slunce od východu do jeho západu. Dále musíme znát skutečnou dobu slunečního svitu pro danou oblast, to představuje dobu od východu slunce do jeho západu v dané oblasti. Pro město Plzeň jsem tuto dobu zjistila ze zdroje [49]. Poté musíme zjistit teoretickou dobu slunečního svitu, tu jsem zjistila ze zdroje [50]. A nakonec z poměru skutečné a teoretické doby slunečního svitu získáme poměrnou dobu slunečního svitu. Pomocí poměrné doby svitu a hodnoty energie difúzního záření zjistíme skutečné množství dopadající energie, kterou vynásobíme počtem dní v měsíci. Nakonec sečteme množství dopadající energie v jednotlivých měsících a dostaneme tak roční množství dopadající energie na panel.

Příklad výpočtu je uveden pro měsíc leden. Teoretická hodnota množství dopadající energie za den se vypočte jako:

$$Q_{sdenteor} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} I_{hod} d\tau \left( \frac{Wh}{m^2} \right) \quad (4.25)$$



$$Q_{sdenteor} = \int_{7,87}^{16,72} I_{hod} d\tau = [363 \cdot \tau]_{7,87}^{16,72} = 3210,89 \frac{Wh}{m^2} \quad (4.26)$$

Poté je nutné vypočítat energii difúzního záření dopadajícího za den:

$$Q_{ddenteor} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} I_{Dhod} d\tau \left( \frac{Wh}{m^2} \right) \quad (4.27)$$

$$Q_{ddenteor} = \int_{7,87}^{16,72} I_{Dhod} d\tau = [67,52 \cdot \tau]_{7,87}^{16,72} = 597,58 \frac{Wh}{m^2} \quad (4.28)$$

Následně je nutné vypočítat poměrnou dobu slunečního svitu:

$$\tau^- = \frac{\tau_{skut}}{\tau_{teor}} (-) \quad (4.29)$$

$$\tau^- = \frac{\tau_{skut}}{\tau_{teor}} = \frac{1}{8,85} = 0,113 \quad (4.30)$$

Skutečné množství dopadající energie za den se spočte ze vztahu:

$$Q_{sden} = \tau^- \cdot Q_{sdenteor} + (1 - \tau^-) \cdot Q_{dden} \left( \frac{Wh}{m^2} \right) \quad (4.31)$$

$$Q_{sden} = 0,113 \cdot 3210,89 + (1 - 0,113) \cdot 597,58 = 892,87 \frac{Wh}{m^2} \quad (4.32)$$

Skutečné množství dopadající energie za měsíc pak dostaneme jako:

$$Q_{smes} = n \cdot Q_{sden} \left( \frac{Wh}{m^2} \right) \quad (4.33)$$

kde n je počet dní v roce

$$Q_{smes} = n \cdot Q_{sden} = 31 \cdot 892,87 = 27678,85 \frac{Wh}{m^2} \quad (4.34)$$

Skutečné množství dopadající energie za rok:

$$Q_{srok} = \sum_{leden}^{prosinec} Q_{smes} \left( \frac{Wh}{m^2} \right) \quad (4.35)$$

$$Q_{srok} = \sum_{leden}^{prosinec} Q_{smes} = 1090935 \frac{Wh}{m^2} \quad (4.36)$$

### 4.1.3 Celková vyrobená elektrická energie

Nejdříve je nutné zjistit účinnost střídače, článku a šířku a výšku panelu. Tyto údaje byly zjištěny z technické dokumentace pro analyzovanou elektrárnu a z katalogu výrobce.

Nejprve je nutné určit celkovou účinnost elektrárny:

$$\mu_{celk} = \mu_{střídač} \cdot \mu_{článek}(-), \quad (4.37)$$

kde  $\mu_{střídač}$  je účinnost střídače a  $\mu_{článek}$  je účinnost článku

$$\mu_{celk} = 0,92 \cdot 0,129 = 0,1187 \quad (4.38)$$

Poté je nutné určit účinnou plochu panelu:

$$S = a_{šířka} \cdot a_{výška} (m^2), \quad (4.39)$$

kde  $a_{šířka}$  je šířka panelu a  $a_{výška}$  je výška panelu

$$S = 1,31 \cdot 0,652 = 0,8541 m^2 \quad (4.40)$$

Množství vyrobené elektrické energie se pak stanoví jako:

$$E = Q_{srok} \cdot \mu_{celk} \cdot S \cdot n_{modul} (kWh) \quad (4.41)$$

$$E = 1090935 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1187 \cdot 0,8541 \cdot 192 = 21232,28 kWh \quad (4.42)$$

## 4.2 Zhodnocení teoretického výpočtu

Při hodnocení teoretického výpočtu vycházíme z porovnání teoretického výpočtu vyrobené elektrické energie se skutečným množstvím vyrobené elektrické energie a s hodnotou vyrobené energie, která byla výstupem z programu PVsyst. Tyto hodnoty jsou shrnuty v následující tabulce:

Při hodnocení teoretického výpočtu vycházíme z porovnání teoretického výpočtu a skutečného množství vyrobené elektrické energie. Teoretické množství vyrobené energie pak porovnáváme s nasimulovanou vyrobenou elektrickou energií z programu PVsyst. Tyto hodnoty jsou shrnuty v následující tabulce:

Tab. 4.3 Množství vyrobené elektrické energie

Zdroj dat	E (kWh)
Skutečné množství E	23763
E získaná pomocí PVsyst	21072
Teoretické množství E	21232

Pokud porovnáme skutečné množství elektrické energie a energii získanou podle metodiky Dr. Cihelky, vidíme, že skutečné množství E se od teoreticky vypočtené hodnoty liší o 10,65 %. Tato odchylka může být způsobena mnoha vlivy. Zjistila jsem, že nejvíce se na této odchylce podílí proměnlivost počasí, což vychází z postupu této metodiky. Dále se z velké části na odchylce podílí i skutečná doba slunečního svitu. Zatímco Dr. Cihelka zmiňuje, že celková skutečná doba slunečního svitu činí 1700-2200 hod/rok, já uvažuji celkovou skutečnou dobu slunečního svitu 1441 hod/rok. Tato uvažovaná doba slunečního svitu vnáší určitou chybu do poměrné doby slunečního svitu, se kterou dále počítám. Teoreticky vypočtená hodnota elektrické energie se pak od

nasimulované elektrické energie liší o 0,75 %. Tato odchylka je zanedbatelná. Mohu tedy říct, že teoretická hodnota elektrické energie se shoduje s nasimulovanou hodnotou.

## 5 Optimalizace analyzované FVE

### 5.1 Zhodnocení stavu analyzované elektrárny

Ve druhé a třetí části jsem se zabývala nasimulováním výroby elektrické energie v programu PVsyst. Ve čtvrté části jsem se pak zabývala teoretickým výpočtem vyrobené elektrické energie, kterou jsem dále porovnávala s hodnotami vyrobené elektrické energie získané programem PVsyst. Při porovnání těchto hodnot vidíme, že skutečná vyrobená elektrická energie téměř ve všech letech převyšuje nasimulovanou výrobu. Nejvíce elektrárna vyrobí v druhém roce svého provozu, tedy v roce 2006, nejméně pak v roce 2016. V prvním roce vykazuje elektrárna nižší množství vyrobené energie než v dalším roce, to je především tím, že velikost vyrobené energie závisí hlavně na počasí, tedy na hodnotě globálního záření a teplotě v daném období. Může to tedy znamenat, že počasí v roce 2006 bylo z hlediska slunečního zisku příznivější než v roce 2005. Odchylna mezi nasimulovanou výrobou a skutečnou výrobou se pohybuje v rozmezí 0,03-14,14 %. Skutečná vyrobená energie převyšuje teoretickou vyrobenou energii o 10,65 %. Z těchto skutečností shledávám elektrárnu z hlediska vyrobené elektrické energie ve velmi dobrém stavu. Z hlediska orientace, umístění a sklonu elektrárny, při kterém nevzniká téměř žádné znečištění panelů, hodnotím elektrárnu za vysoce produktivní.

Jak jsem již výše zmínila firma Isofoton garantuje, že po 10 letech provozu FVE neklesne její výkon pod 90 % nominálního výkonu a po 25 letech pod 80 % nominálního výkonu. Vzhledem k tomu, že elektrárna je v provozu již 17 let, pak by její výkon neměl poklesnout pod 80 % nominálního výkonu. To elektrárna bez problémů splňuje.

Při badání jak zvýšit efektivnost provozu jsem se zaměřila na to jak nejlépe využít vyrobenou energii. S tím jsem vyhodnotila možnost připojení baterie, do které by se ukládala nevyužitá energie. V případě, že bude dosaženo jasné oblohy a tím i špičkového výkonu, střídač vzhledem k omezenému výkonu sítě již nebude schopen vyšší elektrickou energii dodávat do sítě. Tato nadbytečná energie by se ukládala do baterie.

Největší slabinu FVE však shledávám v instalovaných střídačích. Kvůli tomu, že využívané střídače byly instalovány v roce 2004, jsem se při návrhů ke zlepšení efektivity

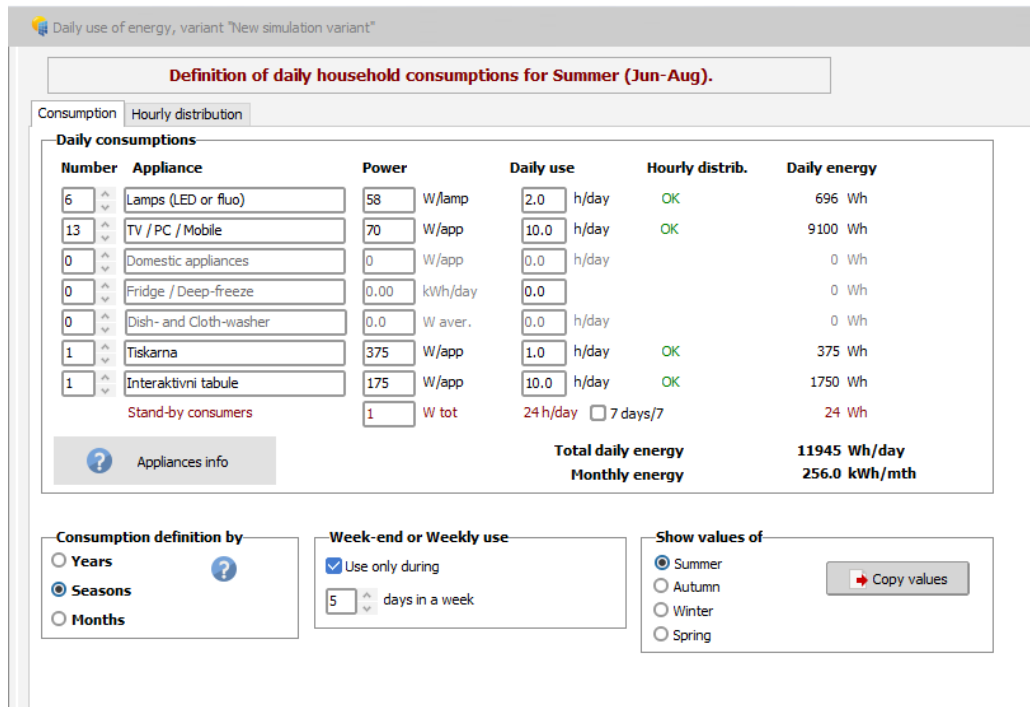
výroby elektrické energie zaměřila na výměnu těchto střídačů za modernější střídače. Dále jsem se kvůli snížení ztrát na vedení zaměřila na vhodnější umístění střídače.

## 5.2 Zhodnocení azimutu a orientace analyzované elektrárny

Při zkoumání vlivu azimutu a orientace panelů na produkci systému jsem se rozhodla navrhnout ostrovní systém. Ten by měl být schopen napájet počítačovou učebnu, která by obsahovala 13 notebooků, každý o příkonu 70 W, 6 svítidel, každé o příkonu 58 W, laserovou tiskárnu o příkonu 375 W a 1 interaktivní tabuli o příkonu 175 W. Uvažovala jsem, že notebooky a interaktivní tabule stejně jako učebna budou v provozu od 8 hodin do 18:00 hodin. Dále jsem uvažovala, že laserová tiskárna bude v provozu průměrně 1 hodinu denně. Svítidla by byla v provozu v zimě a na podzim 4 hodiny denně, a to od 8:00 do 9:00 a od 15:00 do 18:00 hodin. Na jaře a v létě by svítidla byla v provozu 2 hodiny denně, a to od 16:00 do 18:00 hodin.

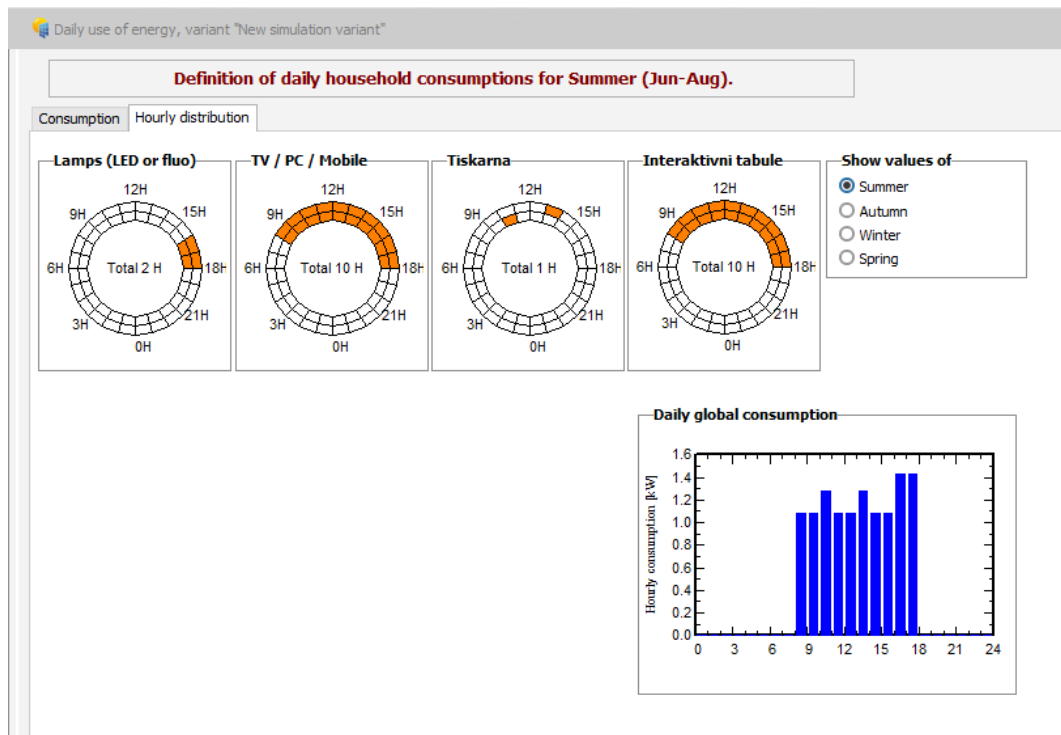
### 5.2.1 Model simulace

Prvním krokem bylo stejně jako u síťového systému zadání umístění, kde se daná fotovoltaická elektrárna nachází. Dále jsem zadala zdroj meteorologických dat, kterým je opět Meteororm 8. Poté jsem byla programem vyzvána, abych zadala orientaci a sklon fotovoltaických panelů. Dále jsem přistoupila k návrhu zátěže (obr. 5.1). Návrh zátěže můžu zadat buďto pro celý rok, pokud je spotřeba elektrické energie v průběhu ročních období konstantní, nebo pro každé roční období. Vzhledem k tomu, že v zimě bude provozní doba osvětlení jiná než v létě, zadávala jsem údaje o zátěži pro každé roční období. Zde jsem, jak jsem již výše zmínila, doplnila údaje o spotřebičích, které má fotovoltaická elektrárna napájet. Zadávala jsem zde údaje o velikosti příkonů, denní době provozu a v kolika dnech týdnů jsou spotřebiče v provozu, přičemž pokud tento údaj nezádám, program automaticky bere provoz spotřebiče 7 dní.



Obr. 5.1 Zátěžový profil

Dále jsem zadala, v jakých hodinách budou spotřebiče v provozu (obr. 5.2).



Obr. 5.2 Určení doby provozu spotřebiče za den



Poté jsem přešla na záložku Systémy, kde mám za úkol nadefinovat baterii, panely a střídače. V horní části okna je možné zvolit tzv. autonomní dobu, kterou pokud nezvolím jinak, program automaticky volí 4 dny. Jde o časový úsek, po který by baterie měla být schopna napájet spotřebiče bez toho, aniž by byla připojena ke zdroji. Program PVsyst nabízí dva druhy baterie, a to lithiové a olovené. Lithiové baterie v porovnání s olovenými bateriemi mají tyto výhody: jsou výrazně lehčí, snesou vyšší nabíjecí i vybíjecí proudy, nižší hloubku vybití. Na druhou stranu lithiové baterie mají nižší vodivost než olovené baterie, což může působit značný problém, pokud je potřeba odebrat z akumulátoru velké množství energie. Olovené baterie jsou ekologičtější a ekonomičtější, neboť při jejich výrobě se vynaloží menší množství energie a také se vyprodukuje menší množství CO<sub>2</sub> a míra znovuzpracování činí téměř 100 %. [51, 52] Z těchto důvodů jsem vybrala olovené baterie. Dále jsem baterii navrhla tak, aby do ní bylo možné uložit alespoň 35,2 kWh (4x8,8) energie. Zvolila jsem tedy baterii, do které je možné uložit energii až o velikosti 47,9 kWh. Celkové napětí baterií se volí s ohledem na velikost zátěže. Pro spotřebiče o maximálním příkonu větším než 1 kW a menším než 3 kW se používají baterie o celkovém napětí 48 V. Navrhované spotřebiče mají celkový příkon 2,941 kW. Zvolila jsme tedy olovené baterie (obr. 5.3) od firmy Oerlikon typu 4CP225 o kapacitě 39 Ah a o napětí 12 V. Jedná se o zapojení 4 článků do série a 32 článků zapojených paralelně o celkovém napětí 48 V a o celkové kapacitě 1248 Ah. Do baterie je tedy možné uložit energii o velikosti 47,9 kWh. Systém automaticky přenastavil úhel sklonu na 20° a azimut na 0°, pro něž následně navrhl jmenovitý FV výkon 8664 W<sub>p</sub>.

Program PVsyst navrhovaný výkon spočetl dle následujícího vzorce: [8]

$$P_{PV} = \frac{W}{Z_2 \cdot Z_3 \cdot Z_4 \cdot V} (\text{kW}_p) \quad (5.1)$$

kde W je denní spotřeba energie, Z<sub>2</sub> je faktor zahrnující vliv umístění a měsíc, Z<sub>3</sub> faktor zahrnující odchylku od horizontály, Z<sub>4</sub> faktor pro korekci teploty a V ztráty způsobené úbytkem na vedení, přeměnou elektrické energie na chemickou a opačně při nabíjení a vybíjení a nesouladem fotovoltaických panelů.

Stand-alone system definition, Variant "New simulation variant", Variant "New simulation variant"

Av. daily needs **8.8 kWh/day** Enter accepted PLOL **5.0 %** Enter requested autonomy **4.0 day(s)** Battery (user) voltage **48 V**  
 Suggested capacity **1239 Ah**  
 Suggested PV power **8664 Wp (nom.)**

Detailed pre-sizing

Storage PV Array Back-Up Simplified sketch

**Procedure**

The Pre-sizing suggestions are based on the Monthly meteo and the user's needs definition

- Pre-sizing Define the desired Pre-sizing conditions (PLOL, Autonomy, Battery voltage)
- Storage Define the battery pack (default checkboxes will approach the pre-sizing)
- PV Array design Design the PV array (PV module) and the control mode. You are advised to begin with a universal controller.
- Back-Up Define an eventual Genset

**Specify the Battery set**

Sort batteries by  voltage  capacity  manufacturer

Oerlikon 12 V 39 Ah Pb Sealed Plates Compact Power

Lead-acid

batteries in series Number of batteries **128**

batteries in parallel Number of elements **768**

% Initial State of Wear (nb. of cycles)

% Initial State of Wear (static)

Battery pack voltage **48 V**  
 Global capacity **1248 Ah**  
 Stored energy (80% DOD) **47.9 kWh**  
 Total weight **2752 kg**  
 Nb. cycles at 80% DOD **292**  
 Total stored energy during the battery life **15549 kWh**

Obr. 5.3 Návrh baterie

Dále pokud neurčíme jinak, program automaticky volí tzv. pravděpodobnost nepokrytí zátěže na 5 %. Jedná se o pravděpodobnost, s jakou systém nebude schopen pokrýt spotřebu elektrické energie. Dále jsem zadala další údaje o elektrárně (obr. 5.4). Zde jsem tedy stejně jako u síťového systému zvolila moduly od firmy Isofoton. Jedná se o monokrystalické články typu I-110/24 v zapojení 8 modulů v sérii s počtem 9 stringů. Při výběru střídače program nabízí 3 druhy střídačů: klasické střídače, střídače s převodníkem MPPT a střídače s vestavěným DC/DC měničem. Při výběru druhu střídače jsem se rozhodovala na základě mnoha hledisek, jako je cena, technologie a účinnost střídače. Střídače s vestavěným DC/DC měničem sice disponují oproti klasickým střídačům vyšší účinností, a to zpravidla o 15-18 %, nicméně na trhu je již nenajdeme. Jak jsem již v kap. 3 zmínila, klasické střídače disponují mnoha nevýhodami. Na základě těchto skutečností jsem zvolila střídač s převodníkem MPPT.

The screenshot shows a software interface for defining a stand-alone PV system. The main configuration area includes:

- Av. daily needs:** 8.8 kWh/day, 5.0% PLOL, 4.0 days autonomy.
- Battery (user) voltage:** 48 V, Suggested capacity: 1239 Ah, Suggested PV power: 8664 Wp (nom.).
- Storage:** PV Array, Back-Up, Simplified sketch.
- Sub-array name and Orientation:** Name: PV Array, Tilt: 20°, Azimuth: 0°.
- Pre-sizing Help:** No sizing selected, Enter planned power: 7.7 kWp, or available area: 0 m².
- Select the PV module:** Isofoton, 110 Wp 29V Si-mono, I 110/24, Until 2005, Manufacturer. Sizing voltages: Vmpp (60°C) 29.6 V, Voc (-10°C) 48.1 V.
- Select the control mode and the controller:** Universal controller selected, MPPT power converter. Operating mode: MPPT converter selected. Max. Charging - Discharging current: MPPT 1000 W, 48 V, 181 A, 30 A.
- PV Array design:**
  - Number of modules and strings: Mod. in series 8, Nb. strings 9. No constraint selected.
  - Operating conditions: Vmpp (60°C) 237 V, Vmpp (20°C) 284 V, Voc (-10°C) 385 V.
  - Plane irradiance: 1000 W/m².
  - Imp (STC) 28.5 A, Isc (STC) 30.9 A, Isc (at STC) 30.4 A.
  - Max. operating power (at 1000 W/m² and 50°C): 7.9 kW.
  - Array nom. Power (STC): 7.9 kWp.
  - Nb. modules: 72, Area: 61 m².

Obr. 5.4 Návrh systému

Při zkoumání závislosti sklonu a azimutu panelu jsem nechala simulaci vykreslit pro úhly s krokem 15° a azimuty s krokem 90°.

### 5.2.2 Výsledky simulace

Při hodnocení efektivity systémů s různými sklony a azimuty jsem se zaměřila na množství nevyužité energie a množství chybějící energie. Termínem nevyužité energie je myšleno množství energie, které nebylo využito při pokrytí spotřeby ani nebylo uloženo do baterie z důvodu plného nabití baterie. V případě chybějící energie se jedná o energii, která chyběla pro plné pokrytí spotřeby. Vhodným nastavením autonomní doby a systému lze docílit neustálého napájení spotřebičů. V následující tabulce můžeme vidět množství chybějící a nevyužité energie pro navrhovanou zátěž při různých sklonech a azimutech:

Tab. 5.1 Množství nevyužitá a chybějící energie pro různé sklony a azimuty

Sklon (°)	Azimut (°)	$E_{\text{nevyužitá}}$ (kWh)	$E_{\text{chybějící}}$ (kWh)
45	3	5111,9	104,24
0	-180	4230,7	424,9
0	-90	4230,7	424,9
0	0	4230,7	424,9
0	90	4230,7	424,9
15	-180	3455,5	756
15	-90	4195	439,1
15	0	4873,2	223,9
15	90	4076,4	97,6
30	-180	2528,6	983,9
30	-90	3989,1	456
30	0	5182,1	136,28
30	90	3782,3	386,5
45	-180	1511	1097,5
45	-90	3646,9	471,2
45	3	5111,9	104,24
45	0	5125,2	104,99
45	90	3385,4	381,6
60	-180	672,3	1164,7
60	-90	3161,1	487,4
60	0	4675,6	106,98
60	90	2899,5	397,4
75	-180	339,8	1239,5
75	-90	2612,6	579
75	0	3855,9	115,51
75	90	2330	452,9
90	-180	157,57	1366,8
90	-90	1960,9	696,4
90	0	2651,6	123,12
90	90	1722,9	583,6

Zde vidíme, že nejméně nevyužitá energie je v případě systému se sklonem  $90^\circ$  s azimutem  $-180^\circ$ , kde tato nevyužitá energie činí 157,57 kWh. Největší nevyužitá energie je pak při sklonu  $30^\circ$  s azimutem  $0^\circ$ , při této konfiguraci činí nevyužitá energie 5182,1 kWh. Pokud se podíváme do tab. 5.11, pak při sklonu  $45^\circ$  s orientací  $3^\circ$  nevyužitá energie činí 5111,9 kWh, což je pouze o 70,2 kWh méně než pro orientaci  $30^\circ$  s azimutem  $0^\circ$ . Nejvíce energie tedy vyrobí elektrárna, pokud jsou panely natočeny  $30^\circ$  a orientovány na jih. Tento model elektrárny má sloužit pro zhodnocení různé konfigurace natočení a

orientování fotovoltaických panelů. Pokud bychom chtěli tuto nevyužitou energii eliminovat, bylo by vhodné zvolit větší kapacitu baterie.

Dále můžeme vidět, že nejmenší množství chybějící energie je při sklonu panelu  $15^\circ$  o azimutu  $90^\circ$ , kde tato energie činí 97,6 kWh. Malé množství chybějící energie vykazují i systémy se sklonem  $75^\circ$  a  $90^\circ$  s azimuty  $0^\circ$ . U systému se sklonem  $45^\circ$  s orientací  $3^\circ$  činí nevyužitá energie 104,24 kWh, což je ve srovnání se systémem s orientací  $15^\circ$  s azimutem  $0^\circ$  o 6,64 kWh více. Největší množství chybějící energie je pak zaznamenáno pro systémy se sklonem  $90^\circ$  s azimutem  $-180^\circ$ , kde tato chybějící energie činí 1366,8 kWh. Nejlepší konfigurace z hlediska chybějící energie je zajištěno u systému se sklonem  $15^\circ$  s orientací na sever.

Z výše uvedených důvodů bych se rozhodla pro systém se sklonem  $15^\circ$  s orientací na sever.

Při uvažování změny orientace a azimutu elektrárny by byla potřeba kompletní přestavba systému, v prvé řadě by bylo nutné pořídit novou nosnou konstrukci, provést výměnu klasických střídačů za střídače s převodníkem MPPT, pořízení daného bateriového systému, atp.. Jenom nová nosná konstrukce vyjde pro 72 panelů na 108792 Kč [53], přičemž úspora energie za chybějící energii vyjde ročně na 32 Kč ( $4,83 \times 6,64$ ). Z těchto skutečností vyplývá, že tuto variantu je možné zvažovat při nové výstavbě, nikoliv při přestavbě.

### 5.3 Zhodnocení stávajícího střídače analyzované elektrárny

Při výběru střídače je nutné zaměřovat se nejen na účinnost daného střídače, ale i na další parametry. Na produkci elektrické energie totiž nemá vliv pouze účinnost střídače, ale i např. konfigurace systému, kdy v případě poruchy 1 střídače, můžeme provozovat zbylou část fotovoltaického systému připojenou k ostatním střídačům. Z hlediska konfigurace hodnotím elektrárnu za vyhovující, neboť analyzovaná elektrárna se skládá z 8 elektricky oddělených polí připojených ke střídačům. Velkou roli hraje i účinnost. Max. účinnosti dosáhne střídač pouze za optimálních podmínek (obvykle při jmenovitém DC napětí a středních hodnotách AC výkonu). Mnohem důležitějším srovnávacím parametrem při výběru střídače je evropská účinnost, která je měřena při měnících se

klimatických podmínkách, a lze ji tak použít pro srovnání střídačů s různými vlastnostmi. Dalším parametrem, který se významně podílí na produkci vyrobené elektrické energie je rozsah MPP, který udává rozsah napětí, ve kterém střídač pracuje optimálně. Dále je nutné zaměřit se i na účinnost přizpůsobení MPP, což je parametr, který udává rychlost a přesnost přizpůsobení se střídače při měnících se klimatických podmínkách. [54]

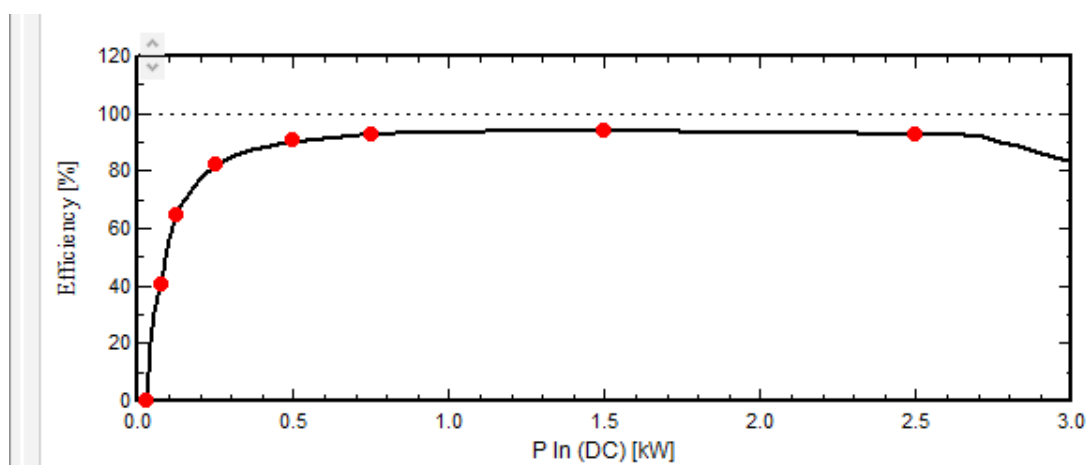
Nejprve jsme tedy vybrali několik jednofázových střídačů s provozní frekvencí 50 Hz. Nejdůležitější vlastnosti jednotlivých střídačů jsou uvedeny v tab. 5.2, včetně množství vyrobené elektrické energie FVE při jejich připojení.

Tab. 5.2 Základní informace o vybraných střídačích

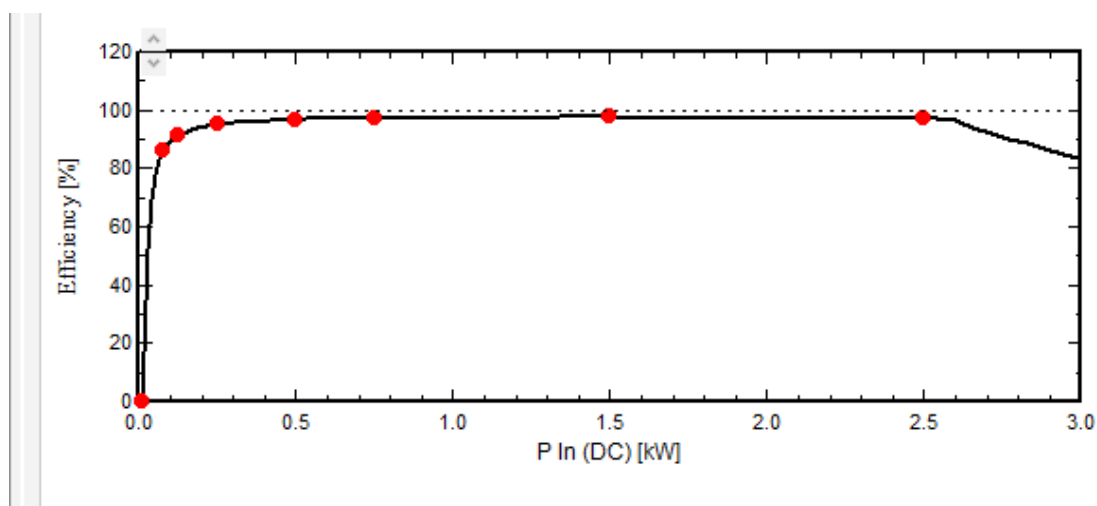
Výrobce	Typ	Jmenovitý AC výkon (kW)	Maximální účinnost (%)	Evropská účinnost (%)	Vyrobená elektrická energie (kW)
Goodwe	GW2500-NS	2,5	96,97	95,22	22035
Omnik	Omniksol-2.5k-TL2-s	2,5	97,7	96,9	22277
Sunways	STS-2.5KTL-S	2,5	97,5	97	22338
AEG Industrial Solar GmbH	AS-IR01-5000 (5KW)	5	98	96,8	22256
Delta Energy	Solar Inverter SOLIVIA 2.5 AP G3	2,5	96	94,8	21791
Delta Energy	Solar Inverter SOLIVIA 5.0 AP G4	5	95,6	94,6	21765
Hypontech	HPK-2500	2,5	97,6	97	22311
Canadian Solar Inc.	CSI-2.5KTL1P-GI-FL	2,5	97,5	96,22	22191
Ginlog Technologies	Solis-2.5K-2G	2,5	97,5	96,8	22288
Kostal	Piko MP Plus 2.5-1	2,5	97,4	96,6	22188
Mastervolt	Sunmaster XS 3200	2,5	95,5	94,4	21714
Mitsubishi	PV-PNS03ATL-GER	2,5	96,1	94,6	21703
Santerno	Sunway R5-2.5K-S1	2,5	97,7	97,1	22338
SofarSolar	SOFAR 2700TL	2,5	97,1	96,4	22194
Steca	StecaGrid 2500	2,5	98	96,58	22224
Tranergy	SGN2700TL	2,5	97,5	96,9	22313
Xantrex	GT 2.8 SP	2,5	95	94	21625

Vzhledem k tomu, že za poslední roky vývoj fotovoltaických střídačů prudce vzrostl, můžeme očekávat, že stávající střídač Sun Power SP2500-450 instalovaný v roce 2004 je, co se týče technologie, zastaralý. Tomu nasvědčuje i skutečnost, že střídač již na trhu nenajdeme. Pokud se podíváme do tab. 5.2, pak vidíme, že nejvíce elektrické energie vyrobí systém se střídačem typu STS-2.5KTL-S od firmy Sunways. Elektrárna vyrobí

22338 kWh (obr. 5.7, obr. 5.8), což je o 1266 kWh více než vyrábí se stávajícím střídačem. Střídač od Sunways dosahuje evropské účinnosti 97 %, přičemž střídač od Sun Power dosahuje evropské účinnosti 94 %. Při porovnání průběhu účinností u střídačů STS-2.5KTL-S a Sun Profi SP2500-450 (obr. 5.5, obr. 5.6) můžeme vidět, že účinnost u střídače STS-2,5KTL-S roste rychleji a dosahuje vyšší hodnoty než u střídače Sun Profi SP2500-450. To je dáno především schopností rychleji se přizpůsobit při dané změně výkonu a větší účinností střídače STS-2.5KTL-S. Základní informace o střídači STS-2.5KTL-S od firmy Sunways najdeme na obr. 5.7.



Obr. 5.5 Průběh účinnosti v závislosti na výkonu u střídače SP2500-450

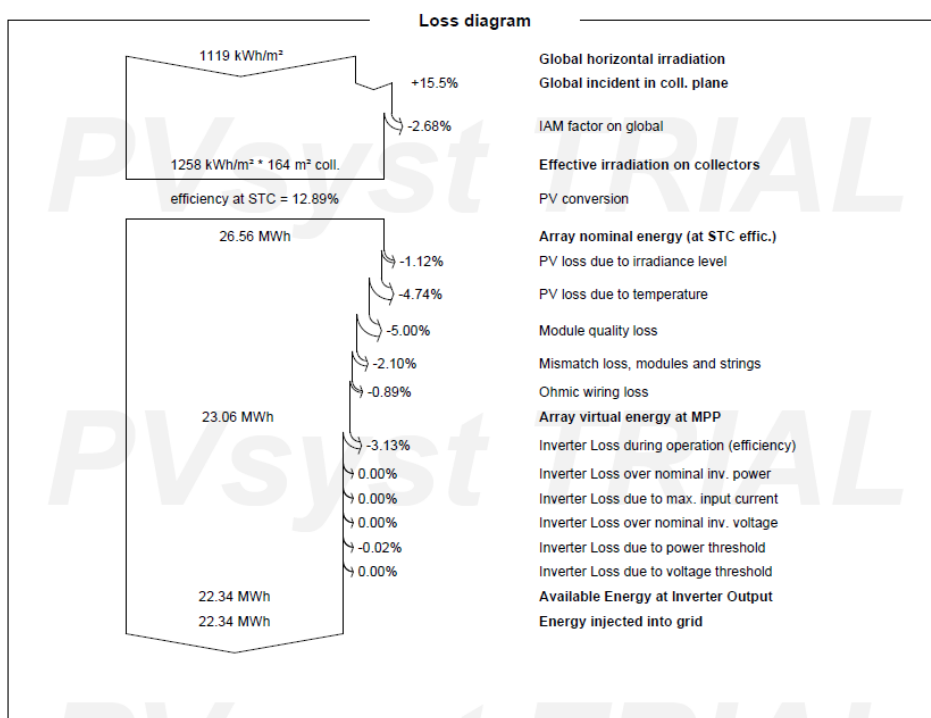


Obr. 5.6 Průběh účinnosti v závislosti na výkonu u střídače STS-2.5KTL-S

**Inverter**

Manufacturer	Generic
Model	STS-2.5KTL-S
(Original PVsyst database)	
Unit Nom. Power	2.50 kWac
Number of inverters	8 units
Total power	20.0 kWac
Operating voltage	80-450 V
Pnom ratio (DC:AC)	1.06

Obr. 5.7 Základní údaje o střídači STS-2.5KTL-S od firmy Sunways



Obr. 5.8 Ztrátový diagram při použití střídače od firmy Sunways

V tomto případě by náklady na výměnu stávajících střídačů Sun Power Profi SP2500-450 za střídače Sunways STS-2.5KTL-S zahrnovaly nejen pořizovací cenu střídače, ale i cenu za demontování starého a namontování nového střídače. Zdroj [55] udává, že cena tohoto střídače je 180 000 huf, to je v přepočtu 12797 Kč. Celková cena 8 střídačů je 102376 Kč. Souhrn všech počátečních investic za výměnu střídače je uveden v tab. 5.3. Vyrobena elektrická energie za rok bude navýšena o 1266 Kč, přičemž uvažují, že cena za



1 kWh činí 4,83 Kč. Za rok tedy elektrárna s nově vybudovaným střídačem ušetří 6115 Kč ( $1266 \times 4,83$ ). Doba návratnosti investice činí přes 20 let. Vzhledem k době návratnosti investice a stáří elektrárny a střídačů, která činí 17 let hodnotím, že výměna střídačů se nevyplatí.

Tab. 5.3 *Vykalkulování pořizovacích nákladů [55]*

Výrobek/služba	Cena za 1 kus (Kč)	Počet kusů (-)	Celková cena (Kč)
Sunways STS-2.5KTL-S	12797	8	102376
Demontáž	10000	-	10000
Montáž	10000	-	10000

#### 5.4 Zhodnocení umístění stávajícího střídače analyzované elektrárny

Další možností, jak zefektivnit výrobu je přemístění samotného střídače spolu s rozvaděčem nebo zvětšení průřezů stejnosměrného a střídavého vedení. Celkově jsem provedla 12 simulací, které obsahovaly různé průřezy a délky modulového, stejnosměrného a střídavého vedení (tab. 5.4)

Nejprve jsem simulaci nechala vykreslit pro skutečné parametry vedení, kde DC ztráty činili 1,84 % a AC pak 0,16 %, množství vyrobené energie tak činí 20833 kWh (viz tab. 5.4 - simulace 1). V simulacích č. 2-7 jsem uvažovala o přemístění střídače a rozvaděče blíže k fotovoltaickým modulům. V simulacích č. 8-11 jsem uvažovala o přemístění střídače.

Největší množství vyrobené energie a nejnižší DC ztráty jsou zajištěny při simulaci č. 6, kde uvažujeme průřez  $10 \text{ mm}^2$  pro modulové a průřez  $4 \text{ mm}^2$  pro stejnosměrné vedení. Celková hmotnost modulového a stejnosměrného vedení pak činí 534 kg. V tomto případě bych však pro zefektivnění výroby s přihlédnutím optimalizace elektrárny zvolila variantu č. 4, neboť hmotnost vedení činí 325 kg, což je o 209 kg méně. U této varianty průřezy modulového a stejnosměrného vedení činí  $6 \text{ mm}^2$ . Jak uvádí tab. 5.4 vidíme, že i malá změna průřezu se významně podílí na ohmických ztrátách.

Tab. 5.4 Množství vyrobené elektrické energie v závislosti na délce a průřezu vedení

Simulace	Modulové vedení		Stejnoseměrné vedení		Střídavé vedení		Ohmické ztráty (%)		Hmotnost modulového a DC vedení (kg)	Množství vyrobené energie (kWh)
	Délka (m)	Průřez (mm <sup>2</sup> )	Délka (m)	Průřez (mm <sup>2</sup> )	Délka (m)	Průřez (mm <sup>2</sup> )	DC	AC		
1	280	4	100	4	5	2,5	1,84	0,16	237	20833
2	280	4	50	4	5	2,5	1,36	0,16	224	20935
3	280	4	20	4	5	2,5	1,08	0,16	217	20996
4	280	6	20	6	5	2,5	0,72	0,16	325	21074
5	280	6	20	4	5	2,5	0,78	0,16	322	21060
6	280	10	20	4	5	2,5	0,54	0,16	534	21111
7	280	6	100	16	5	2,5	0,83	0,16	418	21050
8	280	4	20	4	85	2,5	1,08	2,82	217	20438
9	280	4	20	4	85	4	1,08	1,76	217	20660
10	280	4	20	4	85	6	1,08	1,18	217	20784
11	280	4	20	4	85	10	1,08	0,71	325	20883
12	280	6	20	4	85	6	0,78	1,18	322	20846

V dalším kroku jsem nechala program PVsyst vykreslit stejné průřezy a délky jako v simulacích 1-12, ale s použitím hliníkových kabelů (tab. 5.5), tedy kabelů AYKY. Pokud bychom chtěli snížit hmotnost vedení, lze na místo měděných kabelů CYKY použít hliníkové kabely AYKY. Při stejných délkách a průřezích hliníkový kabel sice vykazuje téměř o 1,5 x menší hmotnost, ale to s sebou přináší i 1,5 x větší ztráty vznikající ve vedení, což má za následek i pokles produkce vyrobené energie. Větší ztráty vznikající v Al vedení jsou způsobeny menší vodivostí Al materiálu. Uvádí se, že měď má rezistivitu  $0,0178 \Omega\mu\text{m}$ , zatímco hliník má rezistivitu  $0,0285 \Omega\mu\text{m}$ . Proto bych z důvodu efektivnosti systému volila měděné kabely, které jsou sice dražší, ale přináší menší ztráty a tím i vyšší produkovanou energii.

Tab. 5.5 Množství vyrobené el. energie v závislosti na délce a průřezu vedení

Simulace	Modulové vedení		Stejnoseměrné vedení		Střídavé vedení		Ohmické ztráty (%)		Hmotnost modulového a DC vedení (kg)	Množství vyrobené energie (kWh)
	Délka (m)	Průřez (mm <sup>2</sup> )	Délka (m)	Průřez (mm <sup>2</sup> )	Délka (m)	Průřez (mm <sup>2</sup> )	DC	AC		
13	280	4	100	4	5	2,5	3,08	0,27	137	20543
14	280	4	50	4	5	2,5	2,28	0,27	128	20714
15	280	4	20	4	5	2,5	1,8	0,27	124	20816
16	280	6	20	6	5	2,5	1,2	0,27	186	20946
17	280	6	20	4	5	2,5	1,31	0,27	184	20923
18	280	10	20	4	5	2,5	0,91	0,27	305	21008
19	280	6	100	16	5	2,5	1,39	0,27	239	20906
20	280	4	20	4	85	2,5	1,8	4,68	124	19898
21	280	4	20	4	85	4	1,8	2,92	124	20264
22	280	4	20	4	85	6	1,8	1,95	124	20467
23	280	4	20	4	85	10	1,8	1,17	124	20630
24	280	6	20	4	85	6	1,31	1,96	184	20569

Při zhotovení systému bych tedy uvažovala o variantě 4, kdy při tomto nastavení uspořena energie činí 241 kWh, což představuje úsporu 1164,03 Kč za rok (4,83x241). Náklady vzniklé z investice pak činí 10400 Kč (tab. 5.6). Odhadovaná doba návratnosti investice tak činí zhruba 9 let. Zda se projekt vyplatí realizovat, záleží i na dalších okolnostech, jako jsou volné a vhodné prostory pro umístění střídačů a rozvaděče. Z hlediska výstavby nové elektrárny bych volila umístění střídače a rozvaděče vždy tak, aby vedení bylo co nejkratší. Vyhneme se tak zbytečnému snížení produkce.

Tab. 5.6 Kalkulace modulového a stejnosměrného vedení typu CYKY 2Ax6 [56]

Vedení	Délka (m)	Cena za 1m (Kč)	Celková cena (Kč)
Modulové	280	18	5040
Stejnoseměrné	20	18	360
Montáž	-	5000	5000
Celkem	-	-	10400

## 5.5 Připojení baterie v režimu peak-shaving

### 5.5.1 Model simulace

Nejdříve je nutné zvolit typ režimu baterie, tedy vybrat za jakých podmínek se má začít akumulovat energie do baterie. Zvolila jsem režim peak shaving. Tento režim umožňuje v případě, že je správcem sítě omezen výkon dodávaný do sítě, začít nadbytečnou energii akumulovat do baterie. Dále bylo nezbytné určit limitní hodnotu udávanou správcem sítě (obr. 5.9). Tuto hodnotu jsem zvolila na 15,5 kW. Jak vidíme na obr. 5.9 přebytečná energie během slunečného dne bez mraků činí 6,22 kWh.

The screenshot displays the configuration interface for a grid system with storage management, specifically for the 'Peak shaving' mode. The 'System kind - Storage strategy' is set to 'Peak shaving'. The 'Storage pack' is also 'Peak shaving'. The 'Battery SOC thresholds' section shows 'Maximum charging (OFF)' at 95% and 'Minimum discharging (OFF)' at 20%. The 'Operating conditions' section displays 'Info: PV array Pnom' as 21.1 kWp, 'Max. output power (clear sky)' as 17.8 kWac, and 'Clear day excess energy' as 6.22 kWh/day. The 'Grid power limit' is set to 15.5 kW. The 'Discharging' mode is set to 'As soon as power is needed'. The 'Battery input charger' section shows 'Max. charging power' as 2.4 kW. The 'Battery to Grid inverter' section shows 'Max. discharging power' as 1.9 kW. Efficiency settings are 97.0% for maximum efficiency and 95.0% for EURO efficiency.

Obr. 5.9 Nastavení limitu výkonu sítě v režimu peak shaving

Dále jsem musela zadat typ baterie (obr. 5.10). Opět jsem zvolila olověné akumulátory. Dále je potřeba vybrat množství článků v sérii a zapojených paralelně. Násobkem počtu článků zapojených v sérii s hodnotou napětí jednoho článku dostaneme celkové napětí. Protože pro analyzovaný systém je nutné dosáhnout napětí akumulátoru 12 V, zvolila jsem 3 články v sérii. Jak jsem již zmínila energie během čistého dne činí 6,22 kWh, baterie tedy musí poskytovat úložiště o velikosti 6,22 kWh. Proto jsem vybrala 1 paralelní článek. Do baterie je tak možné uložit energii o velikosti 8,8 kWh.

Grid system with storage management

**System kind - Storage strategy**  
Peak shaving

Storage pack Peak shaving

**Specify the battery set**

Sort batteries by  voltage  capacity  manufacturer

Rolls  916 Ah Pb Sealed Plates 4-KS-21PS

Lead-acid

<input type="text" value="3"/>	<input type="checkbox"/> batteries in series	Number of batteries	3	Battery pack voltage	12 V
<input type="text" value="1"/>	<input checked="" type="checkbox"/> batteries in parallel	Number of elements	6	Global capacity (C10)	916 Ah
<input type="text" value="100.0"/>	% Initial State of Wear (nb. of cycles)			Stored energy (80% DOD)	8.8 kWh
<input type="text" value="100.0"/>	% Initial State of Wear (static)			Total weight	318 kg
				Nb. cycles at 50% DOD	3200
				Total stored energy during the battery life	19520 kWh

**Operating battery temperature**

Temper. mode Fixed (air-conditioned)

Fixed temperature  °C

The battery temperature is important for the aging of the battery  
An increase of 10 °C divides the "static" battery life by a factor of two

**Peak shaving System Information**

PV array Pnom	21.1 kWp
Charging power at max. irradiance	2.3 kW
This battery pack represent about :	
Charging Time during full sun conditions	3.8 hours
Specified discharging converter	1.9 kW
Discharging time with this power	4.6 hours

Obr. 5.10 Nastavení baterie

### 5.5.2 Výsledky simulace

Nejprve je nutné zmínit, že PVsyst vždy uvažuje, že baterie je na začátku roku plně nabitá. Dále musíme brát v potaz, že baterie se bude vybíjet, tedy dodávat energii do sítě vždy, kdy analyzovaný systém nebude schopen pokrýt spotřebu, to je v noci či v horších dnech (oblačnost, zataženo). Z obr. 5.11 je patrné, že pokud od energie uložené do baterie (23,1 kWh) odečteme maximální hodnotu energie uloženou v baterii (8,8 kWh), vyjde nám, že během nasimulovaného období se do baterie uložilo 14,3 kWh.

New simulation variant

Close Print Export Help

**New simulation variant**  
**Balances and main results**

	GlobHor kWh/m <sup>2</sup>	DiffHor kWh/m <sup>2</sup>	T_Amb °C	GlobInc kWh/m <sup>2</sup>	GlobEff kWh/m <sup>2</sup>	EArray kWh	E_Grid kWh	EBatDis kWh	PR ratio
January	25.3	13.71	-0.68	52.3	51.4	991	896	4.024	0.811
February	44.3	22.32	0.29	77.7	76.3	1467	1341	3.038	0.817
March	86.8	49.64	4.19	115.3	112.7	2134	1961	0.912	0.805
April	125.9	65.02	9.28	140.9	137.0	2521	2316	8.505	0.779
May	157.7	76.86	13.74	152.1	147.5	2654	2429	2.319	0.756
June	165.6	83.30	17.10	152.2	147.5	2631	2406	0.568	0.748
July	168.1	83.05	18.97	157.7	152.8	2693	2465	0.830	0.740
August	142.6	67.59	18.74	150.9	146.6	2577	2363	0.535	0.741
September	96.4	50.74	13.74	119.6	116.4	2103	1926	2.295	0.762
October	58.8	37.29	9.06	85.5	83.5	1564	1424	0.074	0.789
November	28.1	17.95	4.28	48.5	47.5	903	805	0.000	0.786
December	19.3	12.74	0.75	39.9	39.0	763	680	0.000	0.808
Year	1118.8	580.22	9.17	1292.7	1258.1	23001	21012	23.100	0.770

Obr. 5.11 Výsledky simulace

Uspořená roční energie činí 69 Kč (4,83x14,3). Jak vidíme z tab. 5.7, cena připojené baterie činí 77192 Kč a roční úspora energie tak činí 69 Kč, je tedy zřejmé, že projekt se nevyplatí realizovat.

Tab. 5.7 Kalkulace pořizovacích nákladů na baterie [57]

Baterie	Počet ks (-)	Cena za 1ks (Kč)	Celková cena (Kč)
4-KS-21PS	4	18048	72192
Montáž	-	5000	5000
Celkem	-	-	77192

## 5.6 Rozdělení systému na ostrovní a síťový systém

Dalším návrhem je rozdělení analyzovaného systému na 2 samostatné systémy, ostrovní systém a systém připojený k síti. Ostrovní systém by měl být schopen v případě nouzové situace napájet 2 nouzové výtahy o celkovém příkonu 22 kW, a to po dobu 0,5 hodiny. Minimální uložená energie v baterii by tedy měla činit 22 kWh. Systém připojený k síti by pokrýval část vlastní spotřeby budovy fakulty Elektrotechnické. Rozdělení modulů jsem provedla vždy se zapojením po 8 modulech v sérii a násobků 3 stringy (8 střídačů: 3x8stringů).

### 5.6.1 Ostrovní systém – systém pro napájení záložních výtahů

Nejprve jsem vytvořila nový ostrovní systém, kde jsem stejně jako u síťového systému zvolila přesné umístění fotovoltaické elektrárny a naimportovala meteodata z Meteornom 8.1. Poté jsem zadala sklon panelu  $45^\circ$  s azimutem  $3^\circ$ . Dále jsem zadala zátěžový profil, kde jsem zadala počet spotřebičů, příkon 1 spotřebiče a kolik dní v týdnu bude spotřebič v provozu. Poté jsem zadala do programu, v jakou hodinu bude spotřebič v provozu. Zde jsem uvažovala dobu od 00:00-00:30. Tento čas jsem vybrala z toho důvodu, že energie pro napájení výtahů musí být vždy k dispozici a v těchto hodinách nebude elektrárna vyrábět žádné množství energie, mohu tedy s jistotou tvrdit, že pokud systém pokryje spotřebu v tuto hodinu, pak i v ostatních hodinách bude schopen spotřebu pokrýt.

V dalším kroku jsem počítala s autonomní dobou 4 dny, baterii jsem tedy zvolila tak, aby bylo možné do ní uložit (11x4) 44 kWh. Pravděpodobnost nepokrytí zátěže jsem zadala 0 %. Velikost napětí systému je 48 V. Zvolila jsme tedy olovenou baterii o napětí jednoho článku 4 V a kapacitu jednoho článku 453 Ah. Konkrétně se jedná o typ 4-CS-17PS od firmy Rolls. Počet sériových článků jsem zvolila 12 a počet paralelních článků pak 3. Celková navržená kapacita tedy činí 1359 Ah s možností uložit až 52,2 kWh. Navrhovaný výkon programem PVsyst činí 24762 W<sub>p</sub>. V dalším kroku jsem zvolila monokrystalické články typu I 110/24 od firmy Isofoton v zapojení 8 modulů do série, po 30 stringách. Výkon generátoru tedy činí 26,4 kW<sub>p</sub>. Dále jsem zvolila univerzální střídač s MPPT konvertorem.

Po zadání těchto parametrů jsem nechala simulaci vykreslit. Při tomto nastavení však systém nedokáže pokrýt spotřebu výtahů, a to v měsících leden a prosinec. Celková chybějící energie tak činí 40,9 kWh/rok. Protože systém musí být schopen napájet výtahy kdykoliv, rozhodla jsem se provést více nastavení. Tato nastavení můžeme vidět v následující tabulce:

Tab. 5.8 Návrhy ostrovních systémů pro napájení záložních výtahů

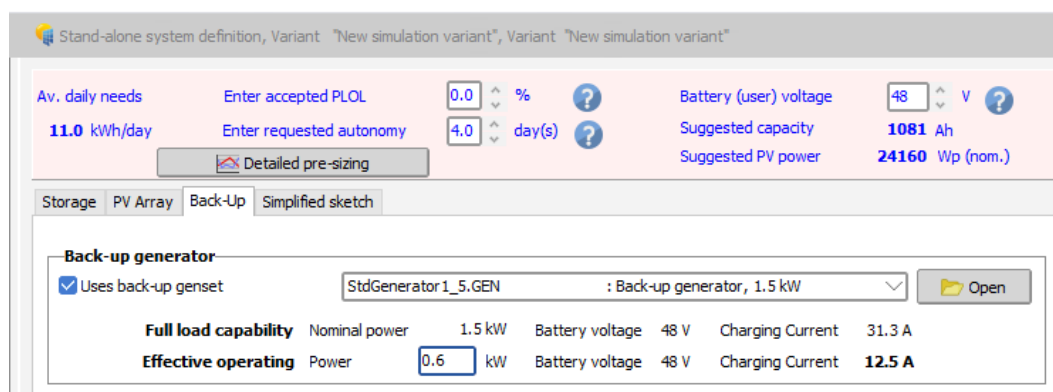
Autonomní doba	Baterie			Navrh. výkon generátoru ( $W_p$ )	Výkon gener. ( $kW_p$ )	Počet modulů v sérii	Počet modulů ve stringu	Chyb. energie (kWh)	Nevyužitá energie (kWh)
	Počet sériových článků (-)	Počet paralelních článků (-)	Max. uložená energie (kWh)						
4	12	3	52,2	24762	26,4	8	30	40,9	23680
7	12	5	87	17194	18,5	8	21	44,59	15219
7	12	5	87	16890	21,1	8	24	24,85	18063
8	12	6	104	15714	18,5	8	21	0	15189
10	12	7	122	14102	15,8	8	18	0	12325
12	12	8	139	13585	15,8	8	18	0	12293
15	12	10	174	12515	13,2	8	15	0	14023

Při těchto konfiguracích jsem se zaměřila v první řadě na chybějící energii. Energie nechybí pro autonomní dobu 8,10,12 a 15 dní. Dále jsem se zaměřila na nevyužitou energii, výkon generátoru a velikost baterie. Tomu vyhovuje autonomní doba 10 a 12 dní. Při srovnání těchto dvou variant jsem zvolila autonomní dobu 10 dní, neboť obsahuje menší počet paralelních článků baterie. U zvolené varianty nevyužitá energie činí 12325 kWh/rok. To je dáno především tím, že systém uvažuje, že výtahy jsou v provozu každý den od 00:00 – 00:30, v tuto dobu systém nevyrábí žádné množství elektrické energie a energie vyprodukovaná přes den se tak pouze ukládá do baterie. To vede k tomu, že navržená baterie, která by měla být schopna napájet výtahy po dobu 10 dnů, je tak hned plná.

Možnost, jak snížit nevyužitou energii je zvolení FV generátoru o menším výkonu. Aby napájení výtahů bylo vždy zajištěno, připojím záložní generátor (obr. 5.12). Provoz záložního generátoru tedy probíhá následovně: Regulátor záložního generátoru připojuje k systému tehdy, kdy je baterie plně vybitá a solární zisk není dostatečný. Kvůli ochraně baterie proti přebíjení regulátor odpojuje baterii tehdy, kdy je plně nabitá a pro ochranu proti úplnému vybití regulátor odpojí uživatele tehdy, kdy je baterie vybitá. Nejprve jsem tedy systém přenastavila na 8 modulů do série v počtu 3 stringů. Dále jsem připojila záložní generátor o výkonu 0,6 kW. Autonomní dobu jsem zadala 4 dny, baterie zůstala navržená stejně jako pro systém bez záložního generátoru pro autonomní dobu 4 dny. I když je spotřeba plně pokryta a nevyužitá energie činí pouze 0,177 kWh (obr. 5.13), hodnotím tento systém z hlediska provozu za neefektivní, neboť pro plné pokrytí spotřeby připojujeme další generátor. Navíc záložní generátor značně zvýší počáteční investici



systému. Kvůli těmto skutečnostem volím variantu s FV generátorem v zapojení 8 modulů v sérii po 18 stringách.



Obr. 5.12 Návrh záložního generátoru

	GlobHor kWh/m <sup>2</sup>	GlobEff kWh/m <sup>2</sup>	E_Avail kWh	EUnused kWh	E_User kWh	E_Load kWh	SolFrac ratio
January	25.3	51.4	115.7	0.017	347.5	341.7	0.270
February	44.3	76.3	173.7	0.000	312.7	308.7	0.501
March	86.8	112.7	253.7	0.027	345.1	341.7	0.623
April	125.9	137.0	299.9	0.017	333.9	330.7	0.824
May	157.7	147.5	314.6	0.027	344.8	341.7	0.794
June	165.6	147.5	311.6	0.009	333.7	330.7	0.941
July	168.1	152.8	319.2	0.034	345.1	341.7	0.812
August	142.6	146.6	305.8	0.010	344.9	341.7	0.813
September	96.4	116.4	249.5	0.000	334.2	330.7	0.680
October	58.8	83.5	184.8	0.000	345.6	341.7	0.480
November	28.1	47.5	104.7	0.000	336.1	330.7	0.243
December	19.3	39.0	88.5	0.036	347.9	341.7	0.134
Year	1118.8	1258.1	2721.7	0.177	4071.5	4023.8	0.593

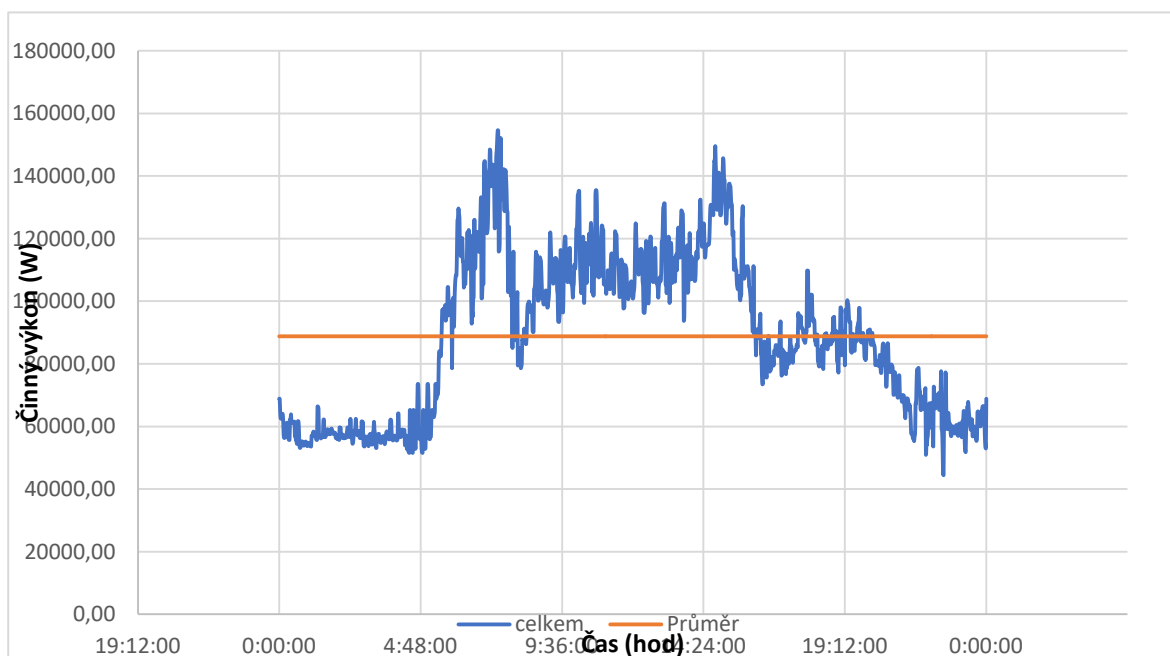
Obr. 5.13 Výsledky simulace pro systém se záložním generátorem

Při použití tohoto systému by byla nutná kompletní přestavba elektrárny, shledávám tedy, že tento systém se nevyplatí realizovat. Projekt bych navrhla realizovat v případě nové výstavby.

### 5.6.2 Síťový systém – pro napájení vlastní spotřeby budovy FEL ZČU

Nejprve jsem zvolila přesné umístění elektrárny, poté naimportovala meteorologická data. Dále jsem zadala sklon  $45^\circ$  s orientací  $3^\circ$ . Zvolila jsme monokrystalické články s typovým označením I-110/24 od firmy Isofoton. Typ střídače jsem zvolila Sun Profi SP2500-450 od firmy Sun Power o výkonu 2,5 kW. Zvolila jsem 2 střídače, počet modulů v sérii 8 a počet stringů 6. Poté jsem do programu PVsyst zadala denní spotřebu budovy fakulty Elektrotechnické.

Denní diagram zatížení pro 1. leden roku 2020 můžeme vidět v následujícím grafu:



Obr. 5.14 Diagram zatížení budovy fakulty Elektrotechnické

Dále jsem zvolila režim vlastní koncepce. Nejdříve je nutné zadat vlastní spotřebu, a to buď za pomoci denního profilu, měsíční spotřeby či roční spotřeby. Já jsem zvolila denní profil (obr. 5.15).

User's needs definition Variant: "New simulation variant", Variant "New simulation variant"

Comment:

General features | **Daily profile** | Graph

**Kind of load profile**

- No self-consumption
- Fixed constant consumption
- Monthly values
- Daily profiles
- Probability profiles
- Household consumers
- Load values from a CSV hourly/daily file

Daily profiles

- Constant over the year
- Seasonal modulation
- Monthly normalization
- Weekly modulation

**User's needs: Yearly energy defined**

Average power **88.6 kW**

Yearly energy **777 MWh/yr**

**Info system: Defined PV array**

Nominal PV Power **5.28 kWp**

Estimated system yield **5.64 MWh/yr**

PnomPV / PLoad average **8.20 Pnom ratio**

**A self-consumption with an average of 2128 kWh/day has been defined**

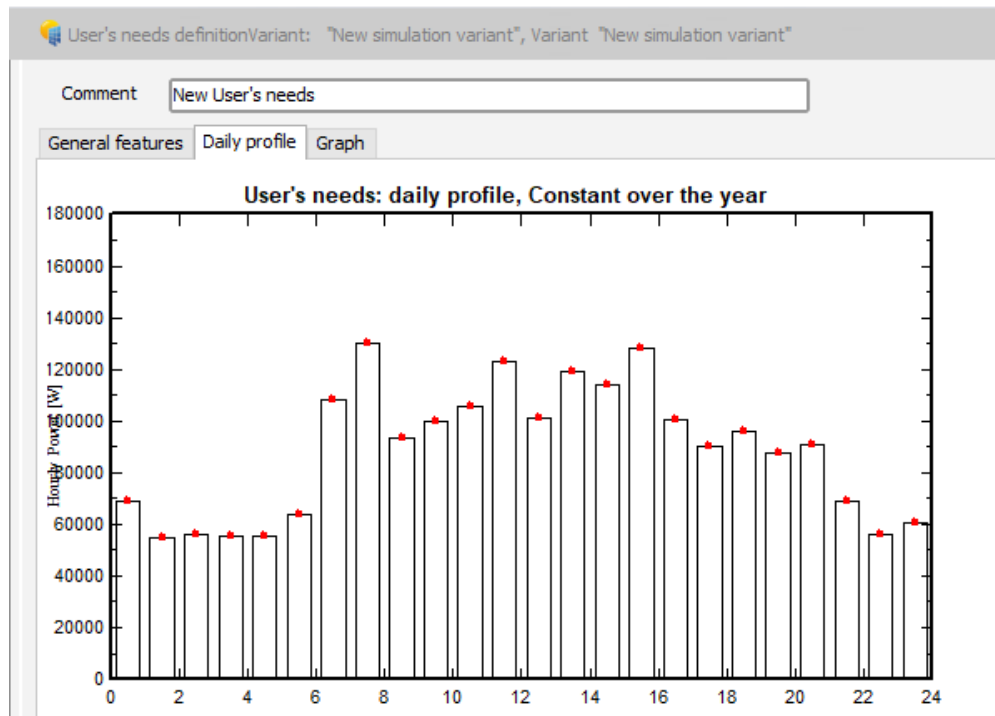
**Model**

Obr. 5.15 Volba profilu vlastní spotřeby

Poté jsem zadala okamžité hodnoty zatížení v jednotlivých hodinách (tab. 5.9). PVsyst poté vykreslí tyto hodnoty jako diagram zatížení (obr. 5.16).

Tab. 5.9 Okamžité hodnoty zatížení v jednotlivých hodinách

Hodina	Okamžité zatížení (W)	Hodina	Okamžité zatížení (W)
0	68850	12	100900
1	54610	13	119000
2	56080	14	114300
3	55710	15	128300
4	55720	16	100800
5	63720	17	89980
6	108400	18	95790
7	130000	19	87400
8	93620	20	90550
9	99520	21	69160
10	105800	22	56200
11	122700	23	60420



Obr. 5.16 Denní diagram zatížení v programu PVsyst

Vlastní spotřebovaná energie činí 776,549 MWh/rok. V tomto režimu se nejdříve vyrobená energie využívá pro vlastní spotřebu a až poté se akumuluje do baterie a v poslední řadě je energie dodávána do sítě. Protože vlastní spotřeba je mnohem větší než vyrobená energie, pak lze z obr. 5.17 vidět, že veškerá vyráběná energie se podílí pouze na pokrytí části spotřeby. Do baterie se tedy neukládá žádná energie a do sítě taktéž není dodávána žádná energie.

New simulation variant

Close Print Export Help

**New simulation variant**  
**Balances and main results**

	GlobHor kWh/m <sup>2</sup>	DiffHor kWh/m <sup>2</sup>	T_Amb °C	GlobInc kWh/m <sup>2</sup>	GlobEff kWh/m <sup>2</sup>	EArray kWh	E_User kWh	E_Solar kWh	E_Grid kWh	EFrGrid kWh
<b>January</b>	25.3	13.71	-0.68	52.3	51.4	248.4	65954	223.7	0.000	65730
<b>February</b>	44.3	22.32	0.29	77.7	76.3	367.7	59571	336.3	0.000	59235
<b>March</b>	86.8	49.64	4.19	115.3	112.7	534.9	65954	491.5	0.000	65462
<b>April</b>	125.9	65.02	9.28	140.9	137.0	632.0	63826	581.2	0.000	63245
<b>May</b>	157.7	76.86	13.74	152.1	147.5	665.4	65954	609.2	0.000	65344
<b>June</b>	165.6	83.30	17.10	152.2	147.5	659.7	63826	603.3	0.000	63223
<b>July</b>	168.1	83.05	18.97	157.7	152.8	675.2	65954	618.1	0.000	65335
<b>August</b>	142.6	67.59	18.74	150.9	146.6	646.0	65954	592.5	0.000	65361
<b>September</b>	96.4	50.74	13.74	119.6	116.4	527.3	63826	483.0	0.000	63343
<b>October</b>	58.8	37.29	9.06	85.5	83.5	392.0	65954	357.1	0.000	65596
<b>November</b>	28.1	17.95	4.28	48.5	47.5	226.3	63826	201.8	0.000	63624
<b>December</b>	19.3	12.74	0.75	39.9	39.0	191.2	65954	170.6	0.000	65783
<b>Year</b>	1118.8	580.22	9.17	1292.7	1258.1	5766.2	776549	5268.3	0.000	771281

Obr. 5.17 Výsledky simulace zahrnující vlastní spotřebu

## Závěr

Cílem práce je pomocí softwaru PVsyst zhodnotit stav analyzované elektrárny umístěné na budově fakulty Elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Nejprve jsem uvedla teoretický úvod do fotovoltaického systému a po nastudování technické dokumentace jsem popsala analyzovanou elektrárnu.

Ve druhé, třetí a páté části jsem použila jako vstupní údaje v programu PVsyst informace z technické dokumentace. V druhém bodě zadání jsem při porovnání výsledků simulace se skutečnými hodnotami vyrobené elektrické energie zjistila, že odchylka činí 0,06-11,48 %. Elektrárna vyrábí téměř ve všech letech větší množství elektrické energie, než je nasimulované množství elektrické energie.

Ve třetím bodě jsem simulaci zpřesnila tím, že jsem parametry simulace upravila tak, aby co nejvíce odpovídaly parametrům analyzované elektrárny. Změnila jsem tedy s ohledem na analyzovanou elektrárnu ztrátu kvality modulů z 5 % na 0 %, termální ztráty jsem upravila z 25 W/m<sup>2</sup>k na 28,8 W/m<sup>2</sup>k. Ztráty v důsledku znečištění panelů jsem změnila z hodnoty 0 % na 0,2 %. Poté jsem doplnila délky včetně průřezů modulového, stejnosměrného a střídavého vedení z hodnoty 1,5 % na 1,9%. Další zpřesnění simulace jsem provedla zohledněním časové degradace fotovoltaických panelů. Časovou degradaci jsem nechala nastavenou na 0,4 % s nesoulady mezi jednotlivými panely taktéž 0,4 %. Dále jsem simulaci zpřesnila zadáním skutečných hodnot globálního záření, teplot, rychlosti větru a vlhkosti v jednotlivých letech provozu. Odchylka mezi vyrobenou energií a nasimulovanou vyrobenou energií pak činí 0,03-14,14 %. Vzhledem k získaným výsledkům jsem shledala přesnost programu za dostačující. Program je vhodné použít tam, kde před samotnou instalací fotovoltaických modulů uvažujeme, zda-li se plánovaná výstavba vůbec vyplatí provést. Program ale může sloužit i uživatelům fotovoltaické elektrárny, kteří přemýšlí o přestavbě systémů či si chtějí ověřit, zda elektrárna je stále dostatečně produktivní.

V dalším bodě jsem měla za úkol ověřit množství vyrobené elektrické energie pomocí teoretického výpočtu vyrobené elektrické energie. Zjistila jsem, že teoretická hodnota se od nasimulované hodnoty liší o 0,75 %. Tuto odchylku jsem shledala za dostatečně malou.

Můžeme tedy říct, že vypočtené teoretické množství elektrické energie je téměř stejné jako nasimulované množství vyrobené energie.

V poslední části jsem na základě zhodnocení systému provedla několik návrhů pro jeho zefektivnění. Tyto návrhy zahrnovaly změny sklonu a orientace FV panelů včetně návrhu ostrovního systému, který by napájel PC učebnu. Dále jsem uvažovala o přemístění buďto samotného střídače nebo střídače spolu s rozvaděčem blíže k fotovoltaickým panelům kvůli zmenšení ztrát vznikajících na DC vedení. Další možností bylo připojení baterie k síťovému systému, do které by se akumulovala přebytečná elektrická energie, a to tehdy kdy je výkon sítě omezen správcem sítě. Ta by byla použita na pokrytí spotřeby v noci či v horších dnech, kdy elektrárna vyrábí buď žádné nebo jen nepatrné množství elektrické energie. Další možností je výměna střídače. Posledním návrhem je rozdělení analyzovaného systému na ostrovní systém, který by v případě stavu nouze napájel 2 nouzové výtahy a na systém připojený k síti, který by pokrýval část spotřeby budovy fakulty Elektrotechnické. Dané návrhy slouží spíše jako ukázka toho, jak lze dosáhnout většího množství vyrobené elektrické energie.

Vzhledem k tomu, že elektrárna je v provozu již 17 let, shledávám analyzovanou elektrárnu z hlediska vyrobené elektrické energie ve velmi dobrém stavu. Dané návrhy ke zvýšení efektivity systému jsou pouze teoretického charakteru, zda by se skutečně vyplatily provést, záleží na mnoha dalších parametrech, např. zda-li by uživatel dostal dotace od státu a v jaké výši, možnost zajištění materiálů za nižší cenu či zajištění nižší ceny při demontáži a montáži.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Fotovoltaika a princip fungování fotovoltaických panelů. [*Vytápění, průmyslové energetické systémy, chladicí systémy*] [online]. Allendorf: Viessmann [cit. 2020-12-04]. Dostupné z:  
<https://www.viessmann.cz/cs/rady-a-tipy/princip-fungovani-fotovoltaickych-panelu.html>
- [2] Fotovoltaická elektrárna – princip funkce a součásti. [*O Energetice*] [online]. Třebíč: OM Solutions, 2016 [cit. 2020-12-04]. Dostupné z:  
<https://oenergetice.cz/elektrarny-cr/fotovoltaicka-elektrarna-princip-funkce-a-soucasti>
- [3] [*Princip činnosti fotovoltaického článku*] [online]. [cit. 2021-04-17]. Dostupné z:  
<https://www.solartec.cz/system/images/BAhbBlshOgZmSSI8MjAxMi8wNS8zMC8xMi80OS8xMi81NDUvc2NoZWlhX3ByaW5jaXBfZm90b3ZvbHRhaWt5LmpwZwY6BkVU/schema-princip-fotovoltaiky.jpg>
- [4] LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. *Solární energie: fotovoltaika - perspektivní trend současnosti i blízké budoucnosti*. V Praze: ČZU, 2005. ISBN 80-213-1335-8.
- [5] [*Princip FVE*] [online]. [cit. 2020-12-04]. Dostupné z:  
<https://www.eon-solar.cz/upload/c/5/b/5bb8e1421257b580b55e218f9f4d84db.jpeg>
- [6] Úvod do FV systémů. [*Czech Nature Energy*] [online]. Plzeň: CNE Czech Nature Energy, © 2020 [cit. 2020-12-04]. Dostupné z:  
<http://www.cne.cz/fotovoltaicke-systemy/uvod-do-fv-systemu/>
- [7] Fotovoltaická elektrárna. [*Isofen Energy - dodavatel fotovoltaických systémů*] [online]. České Budějovice: Isofen Energy, ©2009 [cit. 2020-12-04]. Dostupné z:  
<http://www.isofenenergy.cz/fotovoltaicka-elektrarna.aspx>
- [8] HASELHUHN, Ralf a Petr MAULE. *Fotovoltaické systémy: energetická příručka : pro elektrikáře, techniky, instalatéry, projektanty, architekty, inženýry, energetiky, manažery, stavitele, studenty, učitele, ostatní odborné a profesní soukromé nebo veřejné instituce a zájemce o fotovoltaický obor a energetickou nezávislost*. Přeložil Anna ROHÁČOVÁ, přeložil Pavel ROHÁČ, přeložil Anna ŽENÍŠKOVÁ, přeložil Eva HOŘEJŠÍ, přeložil Jana KLAMO, přeložil Jitka HICKOVÁ, přeložil Veronika MARTINOVSKÁ, přeložil Tomáš BAROCH. Plzeň: Česká fotovoltaická asociace, 2017. ISBN 978-80-906281-5-1.
- [9] [*Připojení FVE do rozvodů v objektu*] [online]. [cit. 2020-12-04]. Dostupné z:  
[https://lh3.googleusercontent.com/proxy/GTonr1nz54VelKv41XXLI\\_HAOrTw5fbkGLJ2rTXLOhhPtm7v27jBmmoTjS7oI84y1J8KnuQgXtmkmSc1GMSE8ydZVXVw](https://lh3.googleusercontent.com/proxy/GTonr1nz54VelKv41XXLI_HAOrTw5fbkGLJ2rTXLOhhPtm7v27jBmmoTjS7oI84y1J8KnuQgXtmkmSc1GMSE8ydZVXVw)



- [10] *[Off grid připojení FVE]* [online]. [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: [https://lh3.googleusercontent.com/proxy/Rw22-i6tok\\_BBzep69XaciAHigOHC\\_kx747e\\_PWAIH0umuWIwJfieA6H6xLAINiorxQVbB02pVQIKncoOeKOXYKrTU6n](https://lh3.googleusercontent.com/proxy/Rw22-i6tok_BBzep69XaciAHigOHC_kx747e_PWAIH0umuWIwJfieA6H6xLAINiorxQVbB02pVQIKncoOeKOXYKrTU6n)
- [11] *Umístění solárního systému* [online]. Přerov: Solární systém, ©2013 [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <http://www.solarni-system.eu/umisteni-solarniho-systemu>
- [12] *[Diagram vlivu sklonu a orientace FV panelů na energetický výnos]* [online]. [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: [https://lh3.googleusercontent.com/proxy/HN5KjfDDz32GvZJv8tCtviMrFXvaL\\_0v4jKwwm53SQZjLRwhYStrJ91usts\\_9FPZ\\_DIW\\_13EGQ38Tf2--m90Go7gpNokg](https://lh3.googleusercontent.com/proxy/HN5KjfDDz32GvZJv8tCtviMrFXvaL_0v4jKwwm53SQZjLRwhYStrJ91usts_9FPZ_DIW_13EGQ38Tf2--m90Go7gpNokg)
- [13] *[Diagram vlivu sklonu a orientace FV panelů na energetický výnos]* [online]. [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <https://lh3.googleusercontent.com/proxy/Y-MHRleucgNKPibwFRQ6Rm7EeU6-CV1h5VvIG4nK7TBsB1BdNcJUPAzKqmVh3CSav30YEypfn42RaauRhdUaqYteqe1uFgMCDxZMXEBVilVaDTP->
- [14] *[Označení referenčních spekter pro různé pozice Slunce na obloze zadané zenitovým úhlem]* [online]. [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/docs-images/91/106358805/images/29-1.jpg>
- [15] Západočeská univerzita zprovoznila solární elektrárnu. *[Český rozhlas - portál]* [online]. Praha: Český rozhlas, 2005 [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <https://plzen.rozhlas.cz/zapadoceska-univerzita-zprovoznila-solarni-elektrarnu-8308213>
- [16] Vědci z Plzně vyvinuli technologii, která lépe využívá solární energii. *[iDNES.cz]* [online]. Praha: MAFRA, 2018 [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: [https://www.idnes.cz/plzen/zpravy/zcu-plzen-slunecni-zareni-fotovoltaika-fakulta-elektrotechnicka-vedci.A180509\\_141952\\_plzen-zpravy\\_vb](https://www.idnes.cz/plzen/zpravy/zcu-plzen-slunecni-zareni-fotovoltaika-fakulta-elektrotechnicka-vedci.A180509_141952_plzen-zpravy_vb)
- [17] Technická dokumentace analyzované elektrárny nacházející se na střeše FEL ZČU
- [18] *[FVE malého výkonu]* [online]. [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: [https://www.kee.zcu.cz/images/laboratore/minipark\\_PVE.jpg](https://www.kee.zcu.cz/images/laboratore/minipark_PVE.jpg)
- [19] *[Monokrystalický panel]* [online]. [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: [https://www.solareconomic.cz/fotky7975/fotos/\\_vyr\\_1303\\_170wm1.gif](https://www.solareconomic.cz/fotky7975/fotos/_vyr_1303_170wm1.gif)
- [20] *[Polykrystalický panel]* [online]. [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: [https://cdn.myshoptet.com/usr/www.4sun.cz/user/shop/big/459\\_fotovoltaicky-solarni-panel-200w-24v-polykrystalicky-i22828.jpg?5b0c4d11](https://cdn.myshoptet.com/usr/www.4sun.cz/user/shop/big/459_fotovoltaicky-solarni-panel-200w-24v-polykrystalicky-i22828.jpg?5b0c4d11)
- [21] *[Tenkovrstvý panel]* [online]. [cit. 2020-12-04]. Dostupné z:

- [https://asset.conrad.com/media10/isa/160267/c1/-/cs/1780539\\_LB\\_00\\_FB/image.jpg](https://asset.conrad.com/media10/isa/160267/c1/-/cs/1780539_LB_00_FB/image.jpg)
- [22] *FV panel I-110/24 od firmy Isofoton* [online]. [cit. 2021-5-22]. Dostupné z: <https://www.sunsolar24.com/view/products/images/00015940.jpg>
- [23] *V-A charakteristika FV článku* [online]. [cit. 2021-5-22]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/docu/clanky/0117/011772o3.png>
- [24] *Hodnocení provozu malých fotovoltaických elektráren s připojením do sítě nn* [online]. Brno, 2010 [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=26994](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=26994).
- [25] *I-110/24 Solar Panel from Isofoton. POSHARP - The Source for Renewables* [online]. Quincy: Possharp, ©2020 [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: [http://www.possharp.com/i-11024-solar-panel-from-isofoton\\_p367821021d.aspx](http://www.possharp.com/i-11024-solar-panel-from-isofoton_p367821021d.aspx)
- [26] *[FV panely nainstalované na sedlovou střechu]* [online]. [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: [https://lh3.googleusercontent.com/proxy/t2FsxULx5eQEjyM4d\\_Kp5Y3SoFHVk7miu8yCJW7doTBrHDP3PAQYZ7sCcQ4OSiYuV8hJh-jR84J5rjky1W8F1z1KR\\_s9z0UinTfVOrpmDs4NHiZRgwtRR-7ciJxfyXs13-bpTvwOYA](https://lh3.googleusercontent.com/proxy/t2FsxULx5eQEjyM4d_Kp5Y3SoFHVk7miu8yCJW7doTBrHDP3PAQYZ7sCcQ4OSiYuV8hJh-jR84J5rjky1W8F1z1KR_s9z0UinTfVOrpmDs4NHiZRgwtRR-7ciJxfyXs13-bpTvwOYA)
- [27] *[FV panely nainstalované na ploché střеше]* [online]. [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: [https://lh3.googleusercontent.com/proxy/4ySISdk66BVZBeCQq-7ChsdzxKQyyetedYD8rTpKfqCmcKsvbvya8nZxhGK--NaEbhfy\\_UN2Hj3eIqVSORadQHexirYH0H90ieU5qB7HIaa9zI](https://lh3.googleusercontent.com/proxy/4ySISdk66BVZBeCQq-7ChsdzxKQyyetedYD8rTpKfqCmcKsvbvya8nZxhGK--NaEbhfy_UN2Hj3eIqVSORadQHexirYH0H90ieU5qB7HIaa9zI)
- [28] *[FV panely nainstalované na fasádu]* [online]. [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: [https://www.asb-portal.cz/wp-content/uploads/images/ilustracne/fotovoltaicke\\_fasady\\_novy\\_prinos\\_pro\\_stavbu-503x560.jpg](https://www.asb-portal.cz/wp-content/uploads/images/ilustracne/fotovoltaicke_fasady_novy_prinos_pro_stavbu-503x560.jpg)
- [29] *[FV panely nainstalované na volném prostranství]* [online]. [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: [https://lh3.googleusercontent.com/proxy/bOxo-xXuJjf4DW3UZOO28GNCpc4Xr4iIQsiEaF7zYYJgZrf9VCCsDipzp-CTOFdkgDXtr8HtZoSor2m\\_UgnN49J31jT2-Ek\\_juxEzlKmU1jjoUVesrlUA66WgvVo2jTO6LyIsXsxxEkDXqDbxtLeSPR\\_Hnjb n4](https://lh3.googleusercontent.com/proxy/bOxo-xXuJjf4DW3UZOO28GNCpc4Xr4iIQsiEaF7zYYJgZrf9VCCsDipzp-CTOFdkgDXtr8HtZoSor2m_UgnN49J31jT2-Ek_juxEzlKmU1jjoUVesrlUA66WgvVo2jTO6LyIsXsxxEkDXqDbxtLeSPR_Hnjb n4)
- [30] *[Polohovatelný FV systém]* [online]. [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: [https://img.cncenter.cz/img/11/normal690/4995829\\_solarni-panely-v0.jpg?v=0](https://img.cncenter.cz/img/11/normal690/4995829_solarni-panely-v0.jpg?v=0)
- [31] *Konstrukce FV systému* [online]. [cit. 2021-5-22]. Dostupné z: <https://fotovoltaika.ekowatt.cz/img/4-fve.jpg>

- [32] Zhodnocení a optimalizace provozu FV elektrárny [online]. Plzeň, 2018 [cit. 2020-04-23]. Dostupné z:  
[https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/38346/1/Zhodnoceni\\_a\\_optimalizace\\_provoz\\_u\\_FV\\_eletrarny\\_Trojacek\\_Petr.pdf](https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/38346/1/Zhodnoceni_a_optimalizace_provoz_u_FV_eletrarny_Trojacek_Petr.pdf)
- [33] *[Sun Profi PV String Inverter]* [online]. [cit. 2020-12-04]. Dostupné z:  
[https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=https://shop.oeko-haus.com/wp-content/uploads/db/Sun%2520Profi%2520SP%25202000-450.pdf&ved=2ahUKEwjM6Zn6g6\\_tAhUMYxoKHRjHBYYAQFjAEegQICRAB&usg=AOvVaw1PYZA-4eXYpY\\_cEYrSCGNF](https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=https://shop.oeko-haus.com/wp-content/uploads/db/Sun%2520Profi%2520SP%25202000-450.pdf&ved=2ahUKEwjM6Zn6g6_tAhUMYxoKHRjHBYYAQFjAEegQICRAB&usg=AOvVaw1PYZA-4eXYpY_cEYrSCGNF)
- [34] Rozvaděč (elektrotechnika). *Wikipedie* [online]. San Francisco: Wikimedia Foundation, 2020 [cit. 2020-12-04]. Dostupné z:  
[https://cs.wikipedia.org/wiki/Rozvad%C4%9B%C4%8D\\_\(elektrotechnika\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Rozvad%C4%9B%C4%8D_(elektrotechnika))
- [35] [Solární kabel] [online]. [cit. 2020-04-23]. Dostupné z:  
[https://cdn.myshoptet.com/usr/www.battery-import.cz/user/shop/big/122327\\_solarni-kabel-4-0mm2--cerny.jpg?5ebbbdbe](https://cdn.myshoptet.com/usr/www.battery-import.cz/user/shop/big/122327_solarni-kabel-4-0mm2--cerny.jpg?5ebbbdbe)
- [36] Přednášky z předmětu KEE/SENS
- [37] *Strídač pro fotovoltaickou elektrárnu*. [online]. [cit. 2021-5-16]. Dostupné z:  
<https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/9555-stridac-pro-fotovoltaickou-elekrarnu-jakou-technologie-zvolite>
- [38] *Ageing general* [online]. [cit. 2021-5-16]. Dostupné z:  
[https://www.pvsyst.com/help/ageing\\_general.htm](https://www.pvsyst.com/help/ageing_general.htm)
- [39] *Array losses* [online]. [cit. 2021-5-16]. Dostupné z:  
[https://www.pvsyst.com/help/array\\_losses.htm](https://www.pvsyst.com/help/array_losses.htm)
- [40] *Solar panel degradation and the lifespan of solar panel* [online]. [cit. 2021-5-16]. Dostupné z:  
<https://www.paradisesolarenergy.com/blog/solar-panel-degradation-and-the-lifespan-of-solar-panels>
- [41] *How long do solar panels last* [online]. 2005 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z:  
<https://news.energysage.com/how-long-do-solar-panels-last/>
- [42] *Lifetime of PV panels* [online]. [cit. 2021-5-16]. Dostupné z:  
<https://www.nrel.gov/state-local-tribal/blog/posts/stat-faqs-part2-lifetime-of-pv-panels.html>
- [43] *Photovoltaic Degradation Rates - An Analytical Review: To be published in Progress in Photovoltaics: Research and Applications* [online]. 2012 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z:

- <https://www.nrel.gov/docs/fy12osti/51664.pdf>
- [44] CIHELKA, Jaromír. *Sluneční vytápěcí systémy*. Praha: SNTL, 1984. Knižnice technických aktualit.
- [45] *Mapy Google* [online]. 2005, 8. Února 2005 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://www.google.cz/maps/place/Fakulta+elektrotechnick%C3%A1+-+Z%C3%A1pado%C4%8Desk%C3%A1+univerzita+v+Plzni/@49.7237966,13.3474695,17z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x470aede1c6ec09d5:0xa93a23bfb23de0eb!8m2!3d49.7237966!4d13.3496582>
- [46] *Mapy.cz* [online]. [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://mapy.cz/zakladni?x=13.3501215&y=49.7239033&z=17&source=firm&id=362124>
- [47] Přednášky z předmětu KEE/SOES
- [48] *Geometrie slunečního záření* [online]. [cit. 2021-5-22]. Dostupné z: [https://docplayer.cz/docs-images/43/7152229/images/page\\_18.jpg](https://docplayer.cz/docs-images/43/7152229/images/page_18.jpg)
- [49] [Východ a západ Slunce v Plzni]. *Meteogram* [online]. ©2021 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://www.meteogram.cz/vychod-zapad-slunce/ceska-republika/plzen/>
- [50] *Průměrné měsíční doby slunečního svitu ve vybraných lokalitách ČR* [online]. [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/99-prumerne-mesicni-doby-slunecniho-svitu-ve-vybranych-lokalitach-cr>
- [51] *Solární baterie* [online]. [cit. 2021-5-22]. Dostupné z: <https://www.dtest.cz/clanek-7890/solarni-baterie>
- [52] *Ostrovní systém* [online]. [cit. 2021-5-22]. Dostupné z: <https://www.svp-solar.cz/ostrovni-system-2/>
- [53] *Nosná konstrukce* [online]. [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: <https://www.solar-eshop.cz/p/nosna-konstrukce-na-plochou-strechu/pocet-panelu-8-panelu/>
- [54] *Fotovoltaický střídač - účinnost není vše* [online]. [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/5571-fotovoltaicky-stridac-ucinnost-neni-vse>
- [55] *Sunways inverter STS-2.5KT-LS* [online]. [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://www.extremesolar.hu/product/sunways-inverter-sts-2-5ktl-s/>
- [56] *Kabel CYKY 2Ax6* [online]. [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: <https://www.elektrotechnika-shop.cz/cyky-2a-x-600-ce-kabel-ch>

- [57] *Baterie Rolls RB-4KS21PS* [online]. [cit. 2021-5-23]. Dostupné z:  
<http://www.windandsun.co.uk/products/Batteries/Lead-Acid-Batteries/Rolls-Batteries#.YKooRqgzaU>

