

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Měření fotovoltaické elektrárny

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Radek NATOV**
Osobní číslo: **E19N0037P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Téma práce: **Měření fotovoltaické elektrárny**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky**

Zásady pro vypracování

1. Popište základní komponenty a parametry analyzované fotovoltaické elektrárny.
2. Porovnejte skutečnou výrobu z elektrárny se softwarovou simulací.
3. Provedte kontrolu elektrárny pomocí termografie a proměřte V-A charakteristiky jednotlivých panelů.
4. Zhodnoťte aktuální stav elektrárny a navrhněte doporučení k odstranění případných problémů.

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

Seznam doporučené literatury:

1. 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 základní komponenty a parametry analyzované fotovoltaické elektrárny.
2. Zhodnoťte analyzovanou elektrárnu z hlediska efektivity a provozních ztrát.
3. Proveďte simulaci analyzované elektrárny pomocí různých softwarových nástrojů.
4. Porovnejte simulaci dlouhodobého provozu s reálnou výrobou.
5. Analyzujte dosažené výsledky s ohledem na reálná klimatická data a degradaci panelů.

V Plzni dne 6.4.2021



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

Beru na vědomí a souhlasím.

V Plzni dne 6.4.2021



.....
Student: Bc. Radek Natov

V Plzni dne



.....
prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan Fakulty elektrotechnické
Západočeské univerzity v Plzni

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na simulační analýzu fotovoltaické elektrárny umístěné na střeše Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity. Obsahem práce je popis základních komponent elektrárny, zhodnocení efektivity a ztrát FVE v programu PVsyst, dále porovnání simulací dlouhodobého provozu FVE v programech PVsyst a PV*SOL s reálnou výrobou elektrické energie. V poslední části se práce zaměřuje na určení reálných klimatických údajů a zjištění skutečné degradační charakteristiky.

Klíčová slova

Fotovoltaický panel, fotovoltaická elektrárna, fotovoltaický modul, fotovoltaický článek, intenzita slunečního záření, klimatické údaje, teplota, degradace, degradační charakteristika, PV*SOL, PVsyst

Abstract

This diploma thesis is focused on a simulation analysis of the photovoltaic power station situated on the roof of the Faculty of Electric Engineering, University of West Bohemia. The thesis contains a description of basic components of the power station, an evaluation of the efficiency and losses of the PV power station in PVsyst programme, furthermore a comparison of a simulations of a long-term operation of the PV power station in PVsyst and PV*SOL programmes with a real production of electric energy. In the last part, the thesis is focused on a specification of real climatic data and detection of real degradation characteristics.

Key words

Photovoltaic panel, photovoltaic power station, photovoltaic module, photovoltaic cell, solar radiation intensity, climatic data, temperature, degradation, degradation characteristics, PV*SOL, PVsyst

Prohlášení

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

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



.....
podpis

V Plzni dne 26. 2. 2021

Radek Natov

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce panu Ing. Milanu Bělíkovi, Ph.D., za odborné vedení práce a poskytnutí materiálů. Samozřejmě děkuji rodičům za poskytovanou podporu a oporu během celé doby mého studia.

OBSAH

ÚVOD.....	10
1 PARAMETRY FOTOVOLTAICKÉ ELEKTRÁRNY	12
1.1 GEOGRAFICKÉ UMÍSTĚNÍ FOTOVOLTAICKÉ ELEKTRÁRNY	12
1.1.1 Sluneční záření.....	12
1.1.2 Orientace a sklon panelů	14
1.2 OCELOVÁ NOSNÁ KONSTRUKCE PRO SOLÁRNÍ PANELE	16
1.3 FOTOVOLTAICKÉ PANELE	16
1.3.1 Použité FV panely na zkoumané FVE	18
1.4 STŘÍDAČE.....	19
1.5 ROZVADĚČ FVE	20
1.6 PŘIPOJOVACÍ SKŘÍŇ FV GENERÁTORU	21
1.7 KABELOVÉ ROZVODY A TRASY FVE	22
1.8 MĚŘENÍ A SBĚR DAT	23
2 ZHODNOCENÍ FVE Z HLEDISKA EFEKTIVITY A PROVOZNÍCH ZTRÁT	24
2.1 TERMOGRAFICKÁ KONTROLA SYSTÉMU FV PANELŮ	24
2.1.1 Správná volba termokamery a podmínek měření.....	24
2.1.2 Nejčastější poruchy zaznamenané termokamerou	26
2.2 FOTOVOLTAICKÝ ČLÁNEK	28
2.2.1 Volt-ampérová charakteristika	29
2.2.2 Základní parametry FV panelu.....	30
2.2.3 Účinnost FV článku.....	30
2.3 ODHAD REÁLNÉ VÝNOSNOSTI POMOCÍ SOFTWARE SIMULACE	32
2.3.1 Odhad reálného výkonu fotovoltaické elektrárny	33
2.3.2 Program PVsyst.....	34
2.3.3 Zadání hodnot do programu PVsyst a příprava simulace	35
2.3.4 Zpráva s výsledky simulace	38
3 SIMULACE DLOUHODOBÉHO PROVOZU FVE	42
3.1 DEGRADACE A STÁRNUTÍ FV PANELŮ	42
3.1.1 Degradace FV článků zářením	43
3.1.2 Potenciální indukovaná degradace.....	45
3.2 SIMULACE DLOUHODOBÉHO PROVOZU V PROGRAMU PVSYST.....	46
3.3 SIMULACE DLOUHODOBÉHO PROVOZU V PROGRAMU PV*SOL PREMIUM.....	49
3.3.1 Zadání parametrů zkoumané FVE do programu PV*SOL.....	49
3.3.2 Výsledky simulace z programu PV*SOL	53
4 POROVNÁNÍ SIMULACÍ DLOUHODOBÉHO PROVOZU S REÁLNOU VÝROBOU	55
5 SIMULACE NA ZÁKLADĚ REÁLNÝCH KLIMATICKÝCH DAT A DEGRADACE PANELŮ	58
5.1 URČENÍ REÁLNÝCH KLIMATICKÝCH DAT.....	58
5.2 ZADÁNÍ KLIMATICKÝCH DAT A DEGRADACE DO SIMULACE V PVSYSTU	61
5.3 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ SIMULACÍ SE SKUTEČNOU VÝROBOU FVE.....	64
6 SHRNUTÍ A ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	66
ZÁVĚR	68
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	70
PŘÍLOHY.....	1

Úvod

Téma fotovoltaiky je v dnešní době velmi aktuální. Kvůli požadavkům Evropské unie na snížení uhlíkové stopy a na rozšíření podílu výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů rychle přibývá nově instalovaných fotovoltaických elektráren.

Výkon FVE je ovšem velmi proměnlivý a nestálý v závislosti na sluneční intenzitě a klimatických podmínkách. Bez vyřešení akumulace přináší velký podíl výroby v elektrické soustavě z takových zdrojů problémy v síti s kolísáním napětí a frekvence. S blížícím se odstavením klasických uhelných elektráren bude zajímavé sledovat vývoj provozování elektrické soustavy. Ideálním řešením by dle mého názoru bylo provozovat více střešních fotovoltaických elektráren s akumulací v kombinaci s dalšími obnovitelnými zdroji a jadernými bloky, špičky diagramu zatížení by pokryly plynové a přečerpávací vodní elektrárny. Bohužel současná politická situace v Evropě není nakloněna jaderné energetice a naše současné jaderné bloky nemají dostatečný výkon k pokrytí nastávajícího výpadku uhelných bloků.

Tato diplomová práce se v první části zabývá popisem jednotlivých komponent a geografickým umístěním FVE, přináší obecné teoretické poznatky a údaje z technické zprávy zkoumané FVE.

Druhá část práce popisuje princip zhodnocení stavu FVE pomocí termografické kontroly a V–A charakteristiky, dále je popsán princip a parametry FV článku. Následně je provedena simulace odhadu reálného výkonu, zhodnocení náklonu a orientace FV panelů a rozbor ztrátového diagramu v programu PVsyst.

Třetí část se zabývá degradací a dlouhodobými simulacemi v programech PVsyst a PV*SOL. Získané výsledky z jednotlivých simulací jsou porovnány s reálnou výrobou elektrické energie.

Poslední část je zaměřena na získání reálných klimatických dat a vytvoření degrační charakteristiky, tak aby v porovnání s reálnou výrobou bylo dosaženo co nejpřesnějších hodnot a tím i dokázání skutečného stárnutí elektrárny. Následně provedu shrnutí a zhodnocení výsledků práce.

Seznam symbolů a zkratk

FVE.....	Fotovoltaická elektrárna
FV.....	Fotovoltaický
U_{mpp}	Napětí v bodě maximálního výkonu
I_{mpp}	Proud v bodě maximálního výkonu
MPP.....	Bod maximálního výkonu
I_{sc}	Zkratový proud
U_{0C}	Napětí naprázdno
P_{mpp}	Výkon v bodě maximálního výkonu
PB.....	Pracovní bod
V–A.....	Voltampérová
η	Účinnost
A_C	Plocha FV článku
E.....	Intenzita osvětlení
R_m	Vnitřní odpor FV článku
E_{id}	Ideální energetický výnos
A_{pv}	Plocha generátorů
e.....	Sluneční ozáření
η_{ts}	Jmenovitá účinnost FV modulu
E_{re}	Reálný energetický výnos
PR.....	Součinitel výkonnosti
E_{id}	Ideální energetický výnos
PID.....	Potenciální indukovaná degradace
LID.....	Degradace vyvolaná světlem
$\cos\varphi$	Účinník
NREL.....	Národní laboratoř pro obnovitelné zdroje energie

1 Parametry fotovoltaické elektrárny

Fotovoltaická elektrárna, která je předmětem této práce, je instalována na střeše budovy Elektrotechnické fakulty Západočeské univerzity. Elektrárna se začala stavět v roce 2003 za pomoci projektu PV Enlargement na FEL ZČU Plzeň od Evropské unie. Jednalo se o jednu z největších instalovaných FVE v České republice. Instalace byla dokončena v roce 2004.

K základním parametrům zkoumané FVE patří její geografické umístění, FV moduly, střídače FVE, rozvaděče FVE, kabely a vedení, přípojovací skříň FV generátoru, měřicí a regulační přístroje.

1.1 Geografické umístění fotovoltaické elektrárny

Zkoumaná fotovoltaická elektrárna se nachází v České republice na území města Plzeň. Město Plzeň se nachází v Plzeňském kraji na západě Čech, leží na soutoku čtyř řek – Mže, Radbuza, Úhlava a Úslava, z nichž vzniká řeka Berounka [2].

Přesná pozice je na střeše FEL ZČU, jejíž GPS souřadnice jsou 49.724N, 13.350E.

1.1.1 Sluneční záření

Sluneční energie patří k nejvíce využívané energii na Zemi. Vzniká jadernými přeměnami v nitru Slunce. Tato energie je označována jako obnovitelná, protože zásoba vodíku na slunci se odhaduje na řády miliard let.

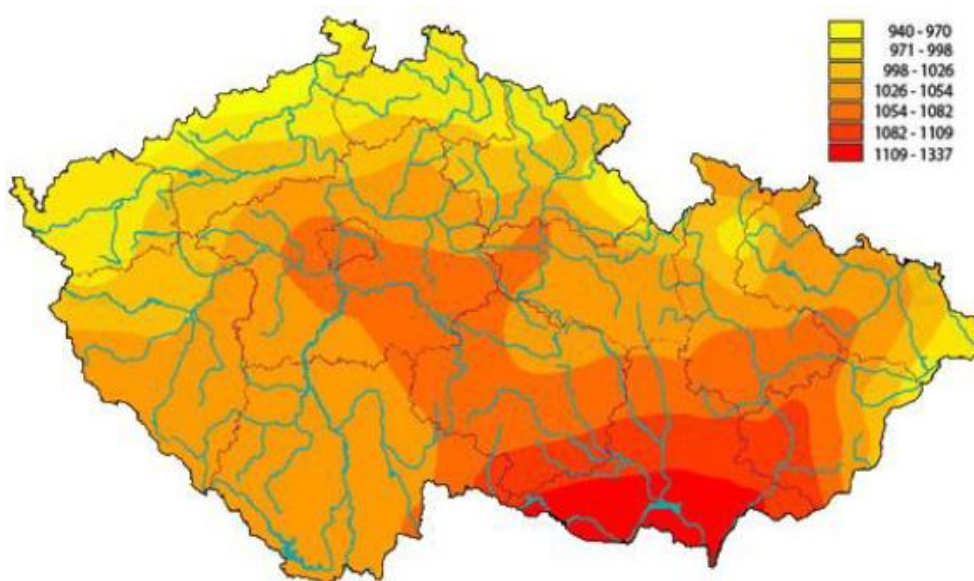
Sluneční záření dopadá na Zemi ve formě elektromagnetického záření o širokém spektru vlnových délek od 1 nm až do 10^3 m.

Nejčastější dělení je na:

- **Ultrafialové sluneční záření:** před vstupem do atmosféry tvoří zhruba 7 % energie celkového slunečního záření, je ve značné míře absorbováno ozónem ve stratosféře.
- **Viditelné sluneční záření:** tvoří přibližně 45 % dopadajícího záření, při zatažené obloze jeho poměr roste.
- **Infračervené záření:** atmosféra většinu tohoto záření pohltí, jeho poměr roste například na vrcholcích hor.

Intenzita slunečního záření dopadajícího na povrch atmosféry dosahuje přibližné hodnoty 1360 W/m^2 . Tuto průměrnou hodnotu označujeme jako solární konstantu, která ale kvůli eliptické dráze Země kolem Slunce není konstantní. Kvůli tvaru oběžné dráhy hodnota kolísá přibližně o 3 % (40 W/m^2) [3].

Po průchodu atmosférou hodnota intenzity slunečního záření vlivem různých odrazů a rozptylů klesá. Dále je ovlivňována počasím, roční dobou a geografickou polohou. Na povrchu Země je intenzita průměrně okolo 1000 W/m^2 . Sluneční záření dělíme na přímé a difuzní neboli rozptýlené. Přímé záření lze nejlépe pozorovat při jasné a bezmračné obloze, kdy dopadá na zemský povrch bez změny směru. Difuzní záření převládá při zatažené obloze, díky difuznímu záření vidíme efekt modré oblohy, bez tohoto záření by byla obloha i během dne černá, s ostře zářícím sluncem a hvězdami. Fotovoltaický panel dokáže využít energii obou složek slunečního záření.



Obr. 1.1 Roční úhrn globálního slunečního záření v ČR [4]

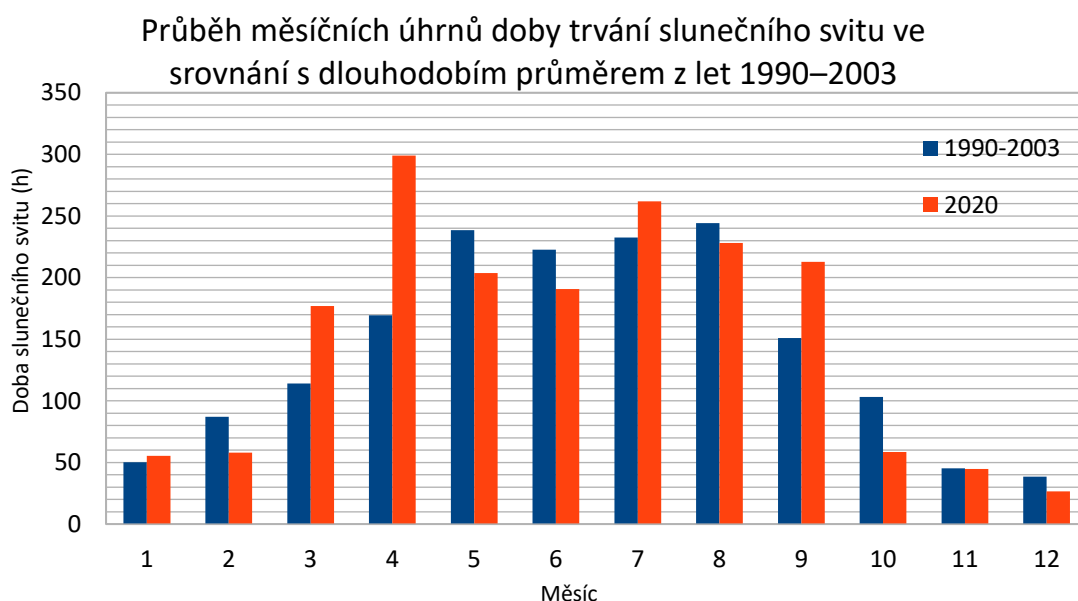
Jak je z obrázku 1.1 patrné průměrná roční intenzita v ČR dosahuje od 940 W/m² v oblasti severu České republiky do 1337 W/m² na slunné jižní Moravě. V Plzni je z mapy vidět hodnota intenzity 1026 W/m². To znamená, že při hrubém odhadu elektrárna o instalovaném výkonu 20 kW vyrobí 20,52 MWh elektrické energie za rok.

Další důležitá veličina, závislá na geografické poloze, je celková doba slunečního svitu.

Tab 1.1: Měsíční úhrny doby trvání slunečního svitu za rok 2020 a dlouhodobí průměr z let 1990-2003

Měsíc:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	celkem
1990-2003	50,2	87,2	114,1	169,5	238,4	222,5	232,5	244,2	150,9	103,1	45,2	38,6	1696,4
2020	55,4	58	176,8	298,9	203,6	190,8	261,8	228,2	212,7	58,6	44,8	26,6	1816,2

Tabulka 1.1 znázorňuje doby trvání slunečního svitu a měsíčního počtu jasných dní z měřicí stanice Plzeň Mikulka za rok 2020. Bohužel data na portálu Českého hydrometeorologického ústavu z dlouhodobé studie nejsou pro stanici Mikulka v Plzni k dispozici, proto byla použita data ze starší stanice Plzeň město. Celková doba slunečního svitu v Plzni Mikulka v roce 2020 byla nadprůměrných 1816,2 h.



Graf 1.1 Měsíční úhrny doby trvání slunečního svitu

1.1.2 Orientace a sklon panelů

Jedná se o zásadní parametr při návrhu FVE, neboť správná orientace a sklon panelů vůči Slunci má velký vliv na celkovou výnosnost elektrárny. Ideální je dopad slunečních paprsků kolmo na plochu FV panelu. Z obrázku 1.2 vyplývá, že v našich zeměpisných

podmínkách je ideální sklon plochy panelů zhruba 30–35° a azimut $0\pm 15^\circ$. Tento sklon má o více než 10 % větší výnosnost oproti vodorovné ploše.

V průběhu roku se však oblast maximálního výkonu mění, a proto, když máme nevyužitý přebytek vyrobené energie v letním období, je možné volit větší sklon (45°), který se blíží k oblasti maximálního využití v zimních měsících.

Náklon panelu (od 12°) s sebou přináší také další výhodu samočistícího efektu deštěm a gravitací. Čím máme větší náklon, tím je jev efektivnější. Ztráty způsobené znečištěním mohou v průběhu roku dosahovat od 1 do 5 %.

Problém nastává, jsou-li FV moduly stíněny například budovami, stromy či kopci. Pro maximalizaci energetického výnosu je zásadní umístit FVE na místech s minimálním zastíněním na fotovoltaických modulech v kteroukoliv denní dobu v závislosti na poloze slunce. Pokud se v návrhu nevyhneme zastínění (například v městské zástavbě), je vhodné pro určení optimálního sklonu a orientace panelů využít počítačovou simulaci [5].



Obr. 1.2 Výnos energie v závislosti na sklonu a orientaci panelu [5]

Z tohoto popisu vyplývá, že ideálním místem pro umístění FVE v městské zástavbě jsou ploché střechy s minimálním zastíněním, které umožňují zvolit vhodný sklon a orientaci FV panelů vůči Slunci.

Zkoumaná FVE na střeše Elektrotechnické fakulty Západočeské univerzity je příkladem správně zvolených požadavků na umístění s ohledem na dobu slunečního svitu a orientací na jih. Sklon FV panelů zde byl zvolen větší, a to 45°. Tento sklon byl pravděpodobně zvolen pro lepší přístupnost k modulům a vyšší výrobě energie v zimním období.

1.2 Ocelová nosná konstrukce pro solární panely

Ocelová konstrukce je umístěna na jižní straně střechy objektu SO 02 areálu ZČU Plzeň. Konstrukci tvoří nosné ocelové rámy, které jsou uchyceny do stávající nosné železobetonové monolitické konstrukce střechy. Přes ocelové plotny do nosné konstrukce střešní železobetonové desky ocelových nosníků jsou přichyceny rámy přes přesné šrouby a patní plechy. Nosné rámy jsou vyrobené z uzavřených profilů 120 × 100 × 6 mm. Příčné zavětrování je uděláno z rovnoramenných L 70 × 70 × 6 mm příčníků. Nosné rámy jsou na příčníky upevněny šroubovými spoji. Na takto sestavenou konstrukci jsou přišroubovány samotné FV panely do připravených děr o průměru 10 mm s oválným vykroužením [10].

1.3 Fotovoltaické panely

„Fotovoltaické články jsou sério-paralelně zapojeny a jako celek tvoří panel. Fotovoltaická elektrárna je poté tvořena sério-paralelní kombinací panelů. Výkon panelů je udáván v jednotkách Watt peak (Wp). Jedná se o maximální (peak) hodnotu výkonu za ideálních podmínek – nestíněné světelné záření směřující kolmo na panel, ideální teplota, panel bez nečistot. Při polojasnu klesá výkon přibližně na 35 %, při zatažené obloze na 10 % udávaného maximálního výkonu. Běžné nominální napětí panelů je 12, nebo 24 V, méně často 48 V“ [11].

Pro výrobu fotovoltaických článků je nyní nejvíce využíván materiál křemík. V přírodě se křemík nachází v čistotě 97–99 %. Tato čistota není pro výrobu FV článků dostatečná, proto je třeba čistý křemík průmyslově vyrobit. Tento prvek je časově odolný a stálý, ale křehký materiál. Nejčastější volba FV panelu je mezi monokrystalickým a polykrystalickým.

Oba typy panelů mají stejnou funkci – zachycují energii ze slunce a přeměňují ji na elektřinu. Polykrystalický i monokrystalický panel může být dobrou volbou, ale mezi

těmito dvěma typy technologií jsou klíčové rozdíly, které by měly být při výběru brány v potaz.

Hlavní rozdíl je typ křemíkového solárního článku, který používají. Monokrystalické články jsou vyrobené z jediného krystalu křemíku, zatímco polykrystalický článek je vyroben z mnoha roztavených křemíkových fragmentů.

Monokrystalický FV panel je obecně považován za prémiový solární produkt. Jeho hlavní výhoda je vyšší účinnost při vyšších intenzitách záření a „lepší“ vzhled. Vyrábí se za pomoci řízené krystalizace z taveniny tzv. Czochralského metodou, kdy se křemík formuje do tyčí a rozřezává se na destičky. Protože se každý článek skládá z jediného krystalu, mají elektrony, které generují tok elektrické energie, více prostoru pro pohyb a tím pádem jsou účinnější než polykrystalické články. Hodnota účinnosti může přesahovat i 20 %.



Obr. 1.3 Monokrystalické panely na střeše FEL ZČU [25]

Polykrystalický FV panel se vyrábí za pomoci chemických metod, například Siemensovou metodou, kdy se roztaví mnoho fragmentů křemíku dohromady a vytvoří destičky pro panel, označují se také jako „multikrystalické“ neboli mnohokrystalické destičky. Protože v každé buňce je mnoho krystalů, existuje menší volnost pohybu elektronů. Oproti monokrystalickému křemíku je výroba méně nákladná. Účinnost těchto FV článků se pohybuje standardně okolo 15–17 % [11].

Osobně bych vybíral monokrystalický panel tam, kde jsem omezený prostorem střechy a kde dává smysl platit dodatečné náklady za efektivnější technologii, která maximalizuje výrobu elektrické energie. Naopak pokud je hodně střešního prostoru nebo navrhují pozemní FVE, může být ekonomicky výhodnější zvolit polykrystalické panely.

Druhý nejpoužívanější materiál využívaný pro výrobu panelů je arsenid galia. Tento materiál má vysokou účinnost, okolo 29 %. Nevýhodou je jeho vysoká cena, větší křehkost a hustota. Je využíván hlavně ve vesmírných družicích, díky vyšší účinnosti a odolnosti proti kosmickému záření [11].

1.3.1 Použité FV panely na zkoumané FVE

Fotovoltaická elektrárna je tvořena 192 FV panely o celkovém výkonu 20,352 kWp. Panely jsou rozděleny do osmi samostatných polí, označených jako sestava E1–E8. Každá tato sestava obsahuje 24 kusů FV panelů zapojených sérioparalelně (3 větve po 8 modulech) a připojených ke svému střídači.

FV panely jsou na střeše umístěny po šesti FV panelech nad sebou ve 30 sloupcích s výjimkou ½ sestavy E1, která má čtyři FV panely nad sebou, ve třech sloupcích. Sklon panelů je zvolený pod úhlem cca 45°. Přístup k panelům je z obou stran k případné údržbě a kontrole.

Ve fotovoltaickém systému byly zvoleny panely typu Isofoton I-110/24 s FV články z monokrystalického křemíku. Barva FV článků byla zvolena tmavě modrá, díky nejvyšší účinnosti za nejvýhodnější cenu. Jeden FV modul je složený ze 72 monokrystalických křemíkových článků. Výrobce udává účinnost 12,84 %.

Výkon panelu je 110 Wp s tolerancí 10 %. Celková plocha panelů tvoří dohromady 164 m². Přehled dalších parametrů FV panelu je uveden v tabulce 1.2 a teorie k jednotlivým pojmům v kapitole 2.2.2.

Tab. 1.2: Parametry FV panelu udané výrobcem

Rozměr	1310x654 mm
Váha	11,5 kg
Výkon	110 Wp
Napětí naprázdno U_{oc}	43,2 V
Zkratový proud I_{sc}	3,4 A
U_{mpp}	34,8 V
I_{mpp}	3,2A

1.4 Střídače

Fotovoltaické panely obsahují FV články, které na principu fotovoltaického jevu generují stejnosměrný proud. Principu FV jevu se věnuji v kapitole 2.2. Stejnosměrný proud se může využít k napájení akumulátorových baterií nebo k ohřevu teplé užitkové vody. Pro využití elektrické energie pro domácí spotřebiče a pro připojení elektrárny do sítě je třeba zařízení, které přemění signál ze stejnosměrného na střídavý o parametrech požadovaných v dané soustavě. V České republice je vyžadována hodnota frekvence 50 Hz a sdruženého napětí v distribuční síti 400 V, případně 22 kV, kam připojujeme FVE větších výkonů (nad 100 kWp). Tuto přeměnu zajišťuje střídač.

Střídače dělíme na:

- Symetrické: rozdělují energii rovnoměrně mezi fáze.
- Asymetrické: rozdělují energii dle zatížení dané fáze až do 1/3 výkonu.

Symetrické střídače můžeme bez obav použít tam, kde je spotřeba na všech fázích přibližně stejná, jinak se nedoporučuje [7].

Správně zvolený střídač pracuje s relativně vysokou účinností (malými ztrátami) díky provedení s výkonovou elektronikou. Účinnost je závislá na zatížení střídače, nejvyšší účinnosti dosahuje při maximálním výkonu FVE.

Z hlediska životnosti je třeba střídač správně dimenzovat, lze jej přetížit jen krátkodobě. Ze statistického hlediska je životnost odhadována přibližně na osm let. Při životnosti FVE 20–30 let se předpokládá po deseti letech jeho oprava nebo výměna.

Nejčastější poruchy jsou způsobeny výpadky pojistek, poruchami v síti nebo přepětím při bouřkách. Poruchy a účinnost střídače mají výrazný vliv na celkovou výnosnost FVE, proto se vyplatí zainvestovat do kvalitního zařízení a jeho pravidelné údržby.

Dále střídač může mít i další doplňkové funkce, například digitální displej, na kterém jsou uvedeny údaje o okamžitém výkonu FVE, době činnosti celého systému, hodnotě vyrobené elektrické energie za určité časové období a poruchy, které se vyskytly v dané FVE. Dále bývá možnost připojit zařízení k počítači a internetu. Bezpečnostní zařízení bývají také součástí těchto měničů, jedná se o ochrany proti přepětí, přepólování a přetížení.

V naší zkoumané elektrárně jsou použity střídače řady SunProfi typ SP 2500-450. Zajišťují přímou dodávku vyrobené elektrické energie náfázováním na místní síť 230 V, 50 Hz v budově fakulty. Celkové množství střídačů je osm, pro každou sestavu E1–E8 jeden. Jsou vybaveny bezpečnostní ochranou, která zajišťuje automatické odpojení FV panelů od sítě při poklesu napětí v síti. Dále mají datový výstup RS485 pro komunikaci s řídicím PC, který sbírá data ze střídačů. Konkrétní parametry použitých střídačů jsou uvedeny v tabulce 1.3 [10].

Tab. 1.3: Štítkové hodnoty střídače SP 2500-450

Jmenovitý výkon při 25 °C	3100 W
Vstupní napětí MPP_{min}	196 V _{dc}
Vstupní napětí $V_{oc_{max}}$	450 V _{dc}
Rozvodná síť	230 V _{ac} / 50 Hz
Proud I	11 A _{ac}
Teplota T_a	0 – 40 °C

1.5 Rozvaděč FVE

Vyrobena energie ze všech osmi střídačů je vyvedena do rozvodné skříně RDAC, kde je automaticky náfázována k síti (rovnoměrně k fázím L1, L2, L3) do patrového rozvaděče RO 02.5 umístěného na chodbě v 5. NP objektu SO 02.

Rozvaděč RDAC je umístěn spolu se střídači v technické místnosti FV systému v 5. NP objektu SO 03. Jeho rozměry jsou $800 \times 1350 \times 250$ mm. Proud $I_n=40$ A, provedení je v krytí IP40/20.

V rozvaděči se nachází ve stejnosměrné prostorově oddělené části moduly přepětových ochran stupně „C“ DEHNguard T320, odpojení včetně odjištění od DC zdroje je zajištěno jističi LSN DC 13C/2. Ve střídavé části rozvaděče je instalován elektroměr s příslušenstvím pro měření elektrické energie, jističe LSN-13B/1N pro odjištění každého střídače, dále přepětová ochrana typu „C“ DEHNguard TSN 230/400V a hlavní vypínací jistič LSN40B/3N-40A. Při instalaci musí být zajištěno plnění platných norem a přípojovacích podmínek na síť nn.

1.6 Přípojovací skříň FV generátoru

Přípojovací (svorkové) skříň je třeba použít, pokud se FV systém skládá z více větví. Rozvržení zkoumaného systému je popsáno v kapitole 1.3.1. Při venkovním umístění přípojovací skříň je třeba, aby splňovala krytí alespoň IP 54, dále by měla být z materiálu odolného proti UV záření.

Pokud by fotovoltaické zařízení nebylo v třídě ochrany II s neuzemněným FV systémem, pak je třeba použít větvové pojistky, které chrání elektrické vedení proti přetížení v případě poruchy. Pojistky by měly být schopny chránit vedení jak při stejnosměrném chodu, tak i při kolísavém, který se často vyskytuje při provozu FVE.

Zkoumaná FVE je vybavena osmi plastovými svorkovými skříněmi na povrch „P“ s průhlednými dvířky MX1 až MX8 typu Ensto Cubo-S SPCK1825T s krytím IP 65. Skříň jsou vybaveny svorkami pro sério-paralelní zapojení 3×8 kusů FV panelů každé sestavy. Dále obsahují $3 \times$ přepětovou ochranu DEHNguard T320 a $3 \times$ ochrannou zpětnou diodu BY550-600. Svorková skříň MX8 je navíc vybavena převodníkem pro měření napětí (410 V / 4–20 mA) a proudu (0–60 mV / 4–20 mA) s využitím bočnicku 11 A / 60 mV [10].

1.7 Kabelové rozvody a trasy FVE

Kabelové vedení je ve venkovních podmínkách vystaveno různým nežádoucím vlivům počasí. Jedná se například o velké rozpětí teplot prostředí, UV záření, vlhkost nebo povětrnostní vlivy. Při projektu se s těmito jevy musí počítat a navrhnout odpovídající kabely, například na trhu je možné najít přímo „solární“ kabely, které jsou těmito vlivům uzpůsobeny.

Při návrhu kabelových tras by měla být použita co nejkratší celková délka kabelů z důvodu ztrát na vedení i z důvodu ekonomického hlediska. Dále se musí zohlednit, aby elektrické vedení nepřišlo do kontaktu s ostrými hranami kvůli opotřebení a mechanickému poškození izolace. Elektrická kabeláž se neumísťuje přímo na vnější střechu, ale přichycuje se k nosné konstrukci FV panelů, pokud možno, aby byla zastíněna a tím se zabránilo nadbytečnému ohřívání vedení solární energií, které by způsobilo vyšší ztráty. Oddělení slaboproudých kabelů od silnoproudých musí být od sebe alespoň v minimální vzdálenosti danou normou ČSN 33 2000-5-52.

Obecně se volí takový průřez vodiče, aby ztráty ve stejnosměrném vedení nepřesáhly 1 % při jmenovitém provozním výkonu FVE. V případě delších vedení se dovolují maximální ztráty do 2 %. Provozovatel FVE musí dle normy dodržovat napěťovou pevnost a proudovou zatížitelnost.

Dále musíme při připojování vodičů do svorkovnice dbát na správnou polaritu, na označení obou konců kabelů popisnými štítky pro snadnou orientaci v případě poruchy nebo manipulace a na barevné značení vodičů dle ČSN 33 0165.

Pro usnadnění montáže FVE se často k propojování jednotlivých elektrických částí systému využívají konektorové spoje, které jsou také zabezpečené proti dotyku s živými částmi. Stejnosměrné vedení ze svorkové skříně FV generátoru do střídače může být z finančního hlediska propojeno obyčejnými kabely s PVC izolací označenými typově jako NYM nebo NYY. Střídavé elektrické vedení ze střídače přes elektroměr až do rozvaděče pro připojení k síti nn se liší podle typu střídače. Pokud je střídač jednofázový, využíváme třípólové vodiče. U třífázového střídače pětipólové.

Zkoumaná elektrárna je vybavena Cu kabely typu CYKY pro silnoproudý rozvod. Pro slaboproudé a datové trasy jsou zvoleny kabely FTP $4 \times 3 \times 0,5$ (kat.5), ve venkovním prostředí FTPve $4 \times 2 \times 0,5$ (kat.5). Venkovní kabely jsou vedeny na kovové upevňovací konstrukci FV panelů a uloženy v oceloplechových kabelových žlabech MARS. Ve vnitřních prostorech jsou kabely uloženy v mezistropích, pod omítkou nebo na povrchu v PVC vkládacích lištách s ohledem na požadavky daného prostoru a aby nezatěžovaly nebo neznemožňovaly údržbu, opravy a výměnu. Kabelové prostupy mezi jednotlivými požárními úseky jsou utěsněny protipožární hmotou [10].

1.8 Měření a sběr dat

Fotovoltaická elektrárna je vybavena systémem měření, který je schopen snímat různé veličiny za pomoci čidel, například:

- Intenzita osvětlení FV pole (W/m^2); (A1a – čidlo osvětlení).
- Teplota čidla intenzity osvětlení FV pole ($^{\circ}\text{C}$); (A1b – Pt čidlo je součástí čidla osvětlení).
- Intenzita globálního slunečního osvětlení (W/m^2); (A2 – pyranometr).
- Teplota panelů ($^{\circ}\text{C}$); (A3 – Pt čidlo).
- Hodnota DC proudu FV pole č. 8 (A); (A4 – proudový bočník).
- Hodnota DC napětí FV pole č. 8 (V); (A5 – napěťové svorky FV pole č. 8).
- Venkovní teplota ($^{\circ}\text{C}$); (A6 – čidlo venkovní teploty).
- Výkon FV pole č. 8 (W); (D1 – jednofázový elektroměr).
- Celková vyrobená energie (kWh); (D3 – trojfázový elektroměr).

Hodnoty snímaných veličin se zavádí do skříně převodníků měřených veličin, které získaná data z čidel převádí na proudový signál 4–20 mA. Tento signál je přiveden do měřicí jednotky UDAS 1001E, ke které je připojen počítač přes USB. Počítač je vybaven programem umožňujícím aktuální zobrazení výše uvedených veličin FV systému a dále export dat do souborů pro další zpracování na počítačích vnitřní sítě univerzity a pro zobrazení na internetových stránkách.

Druhé výstupní rozhraní je připojeno k zobrazovací jednotce umístěné ve vstupním vestibulu objektu elektrotechnické fakulty. Zobrazovací jednotka ukazuje změřené hodnoty elektrické energie vynásobené osmi – počtem FV polí. Zobrazuje celkový okamžitý výkon, dodávanou energii za den a snížení emisí CO_2 .

2 Zhodnocení FVE z hlediska efektivity a provozních ztrát

V následující kapitole se budu zabírat termografickou metodou, kterou se určuje technický stav FVE, a V–A charakteristikou, kde popíši obecné parametry FV článků. Dále se budu věnovat simulaci odhadu reálného výkonu, zhodnocení celkových ztrát, orientací a náklonu panelů.

2.1 Termografická kontrola systému FV panelů

V oblasti výzkumu a vývoje jsou termokamery zavedeným nástrojem pro hodnocení solárních článků a panelů. Použití termokamer pro hodnocení solárních panelů se však neomezuje pouze na oblast výzkumu, ale v současné době se stále více používají při kontrole kvality solárních panelů ještě před samotnou instalací (například kvůli kontrole poškození při výrobě a přepravě) a při pravidelných kontrolách prediktivní údržby po instalaci panelů.

2.1.1 Správná volba termokamery a podmínek měření

Termokamery jsou v současnosti cenově dostupné, ruční a lehké. Umožňují velmi flexibilní použití v terénu. S termokamerou lze potenciální problémové oblasti FV panelů včas detekovat a zajistit opravu dříve, než nastanou skutečné problémy nebo selhání FVE.

Ne každá termovizní kamera je vhodná pro kontrolu solárních článků a existují určitá pravidla a pokyny, které je třeba dodržovat pro zajištění účinné kontroly a vyvození správných závěrů.

Během procesu vývoje a výroby jsou solární články zkoušeny buď elektricky, nebo pomocí zábleskových lamp. To zajišťuje dostatečný tepelný kontrast pro přesná termografická měření. Tuto metodu nelze použít při testování solárních panelů v terénu, proto musí provozovatel FVE zajistit měření při dostatečné intenzitě slunečního záření. K dosažení dostatečného tepelného kontrastu při kontrole solárních článků v terénu je nutná intenzita alespoň 500 W/m^2 nebo vyšší. Pro maximálně přesný výsledek měření se doporučuje intenzita slunečního záření 700 W/m^2 .

Další parametr ovlivňující přesnost termografního měření je teplota. Platí, že při nízké venkovní teplotě se také zvýší tepelný kontrast mezi měřeným objektem a okolím.

Ruční termokamery pro prediktivní kontroly údržby mají obvykle nechlazený mikrobolometrický detektor citlivý ve vlnovém pásmu 8–14 μm . Toto vlnové pásmo infračerveného záření není průchozí přes sklo. Při kontrole solárních článků zepředu vidí termovizní kamera rozložení tepla na povrchu skla. Pouze nepřímou vidí distribuci tepla v podkladových buňkách. Proto jsou teplotní rozdíly, které lze měřit a vidět na skleněném povrchu solárního panelu, malé. Aby byly tyto rozdíly viditelné, potřebuje termokamera použitá pro tyto kontroly tepelnou citlivost $\leq 0,08 \text{ K}$.

Fotovoltaické moduly jsou obvykle namontovány na vysoce reflexní hliníkové konstrukci, která se na tepelném obrazu projevuje jako chladná oblast, protože odráží tepelné záření vyzařované oblohou. V praxi to znamená, že termokamera bude zaznamenávat teplotu základní struktury pod $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Protože se vyrovnání histogramu termovizní kamery automaticky přizpůsobuje maximální a minimální naměřené teplotě, mnoho malých tepelných anomálií nebude okamžitě viditelných. K dosažení vysoce kontrastního termálního obrazu by byla nutná manuální korekce úrovně a rozpětí teploty. Řešení poskytuje takzvaná funkce DDE (Digital Detail Enhancement). DDE automaticky optimalizuje kontrast obrazu ve scénách s vysokým dynamickým rozsahem a termální obraz již není nutné upravovat ručně. Termokamera s DDE je proto vhodná pro rychlé a přesné kontroly solárních panelů.

Další užitečnou funkcí pro termokameru je označování termálních obrazů daty GPS. To pomáhá snadno lokalizovat vadné moduly na velkých plochách, např. na solárních farmách. Termokamera by měla mít zabudovaný digitální fotoaparát, aby bylo možné související vizuální obraz (digitální fotografii) uložit spolu se souvisejícím tepelným obrazem. Užitečný je také tzv. fúzní režim, který umožňuje překrývat tepelné a vizuální obrazy.

Dále je třeba dodržet pozorovací úhel 5–60 stupňů mezi termokamerou a měřeným systémem, čímž zabráníme zobrazení odrazů tepelného záření okolních objektů na termografu. To může mít za následek nesprávné vyhodnocení snímků. Bohužel nedosáhneme nejvyšší emisivity záření, která je v kolmém směru.

Ve většině případů lze instalované fotovoltaické moduly kontrolovat také termokamerou ze zadní části modulu. Tato metoda minimalizuje rušivé odrazy od slunce a mraků. Kromě toho mohou být teploty získané vzadu vyšší, protože FV články se měří přímo, nikoli přes skleněný povrch.

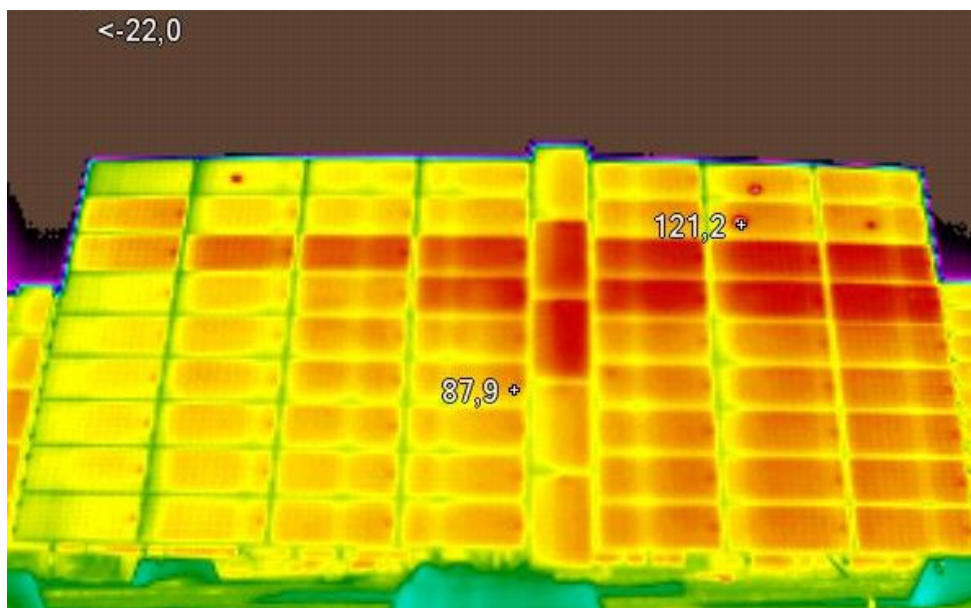
Při provádění termografického měření by obloha měla být jasná, protože mraky snižují sluneční záření a také způsobují rušení odrazy. Informativní snímky lze však získat i při zatažené obloze za předpokladu, že použitá termovizní kamera je dostatečně citlivá. Jsou žádoucí klidné povětrnostní podmínky, protože jakékoli proudění vzduchu na povrchu solárního modulu způsobí konvekční chlazení a tím sníží tepelný spád.

Dalším způsobem, jak zvýšit tepelný kontrast, je odpojit články od zátěže, aby se zabránilo toku proudu, což umožňuje zahřívání pouze slunečním zářením. Poté je připojena zátěž a články jsou pozorovány ve fázi zahřívání. Za normálních okolností by však měl být systém kontrolován za standardních provozních podmínek, zejména při zatížení. Chyby měření vznikají především kvůli špatnému umístění kamery a neoptimálním okolním podmínkám.

2.1.2 Nejčastější poruchy zaznamenané termokamerou

Termovizní měření ukazuje teplotní rozvržení jednotlivých FV článků, tím nám umožňuje zjistit různá poškození panelů. Mezi nejčastější patří:

- **Horká místa:** Jedná se o častý defekt v krystalické mřížce FV článků, který se projevuje vznikem horkých míst neboli hot spots. Vznikají v důsledku poškození během výrobního procesu, přepravě nebo kvůli zpětnému proudu přes zastíněné fotovoltaické články. Tato místa se přehřívají mnohem více než okolní články, lze je pozorovat i vizuálně díky zhnědnutí zadní strany panelu. Zhoršují efektivitu provozu celého panelu, degradují okolní články nebo se mohou v extrémních případech i vznítit (teplota hot spotů může být až 250 °C). Ztráty panelu se vlivem horkých míst odhadují na 5 až 25 %.



Obr. 2.1 Horká místa [25]

- **Šnečí cestičky:** Jev šnečích cestiček byl popsán v roce 2004 a podrobněji je zkoumán od roku 2006. Pod krycím sklem a laminační vrstvou se na povrchu FV článků vytváří po několika měsících provozu FVE změny zbarvení. Tyto změny jsou ve tvaru tmavých, rovných či různě zakřivených, případně se větvičích linií či cestiček o šířce cca 0,5–1 cm. Šnečí cestičky jsou ohraničeny jednotlivými FV články, bývá jimi obvykle postiženo více článků v modulu a tímto jevem nejsou všechny moduly ovlivněny rovnoměrně. Jev postihuje monokrystalické i polykrystalické panely. Příčiny a mechanismus vzniku jevu není příliš jasný, uvádí se hypotéza, že vzniká na základě kombinace několika faktorů. Mezi ně patří mikrotrhliny ve FV člancích, použitá EVA fólie jako podkladová vrstva spodní strany článků a specifické chemické komponenty použité při její výrobě, pravděpodobné pronikání vlhkosti do struktury FV panelu, fyzikální a chemické jevy probíhající ve FV panelu při dlouhodobé expozici slunečnímu záření a provozním teplotám ve venkovním prostředí. Nejpokročilejší hypotézy uvádí, že dochází k difúzi některých chemických komponent z EVA fólie přes mikrotrhliny v člancích na jeho lícovou stranu a k oxidaci stříbrných kontaktů. Případně dochází k depozici polymerů pocházejících z EVA fólie na lícové straně článku a vytvoření změn zbarvení. Podle výrobců FV panelů se jedná pouze o optickou vadu, která nemá vliv na výkonové parametry FV panelů [17].



Obr. 2.2 Šnečí cestičky [17]

- **Proražená/vyhořelá bypass dioda:** Bypass dioda se používá v křemíkových FV modulech k ochraně jednotlivých článků před tepelným zničením. Pokud je jeden FV článek v řetězci sériově zapojených článků zastíněn nebo poškozen, omezí to jeho současnou produkci a začíná energii naopak spotřebovávat, to může způsobit místní hot spot a nevratné poškození. Proto bypass dioda tyto zastíněné články odpojuje a umožňuje eliminovat pokles výkonu FV panelu a proudu, který by jinak procházel zastíněnými články. Zničení bypass diody ovlivní výkon i životnost panelu.

2.2 Fotovoltaický článek

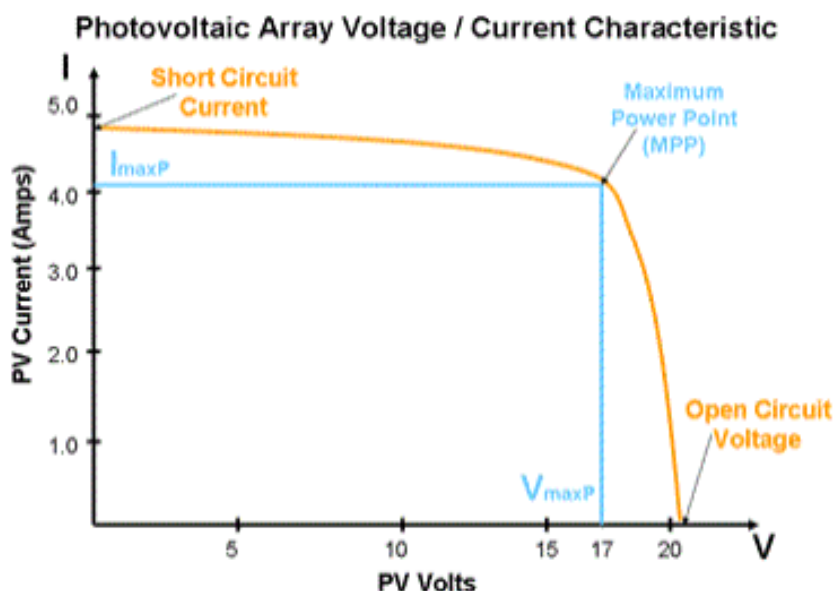
Fotovoltaický článek je vyroben z polovodičových materiálů, které absorbují fotony emitované sluncem a generují tok elektronů. Fotony jsou elementární částice, které přenášejí sluneční záření rychlostí 300 000 kilometrů za sekundu. Albert Einstein označoval fotony jako „zrna světla“. Když fotony narazí na polovodičový materiál (například křemík), uvolní elektrony z jeho atomů, prázdné místo po elektronech nazýváme díry. Uvolněné elektrony se náhodně pohybují a hledají další „díru“, kterou by zaplnily. K výrobě elektrického proudu však musí elektrony proudit stejným směrem. Toho je dosaženo použitím dvou typů křemíku. Křemíková vrstva, která je vystavena slunci, je dotována atomy fosforu, který má o jeden elektron více než křemík, zatímco druhá strana je dotována atomy boru, který má o jeden elektron méně. Představíme-li si FV článek jako zdroj, vrstva, která má přebytečné elektrony, se stává zápornou „svorkou“ (N) a strana, která má deficit elektronů, se stává kladnou svorkou (P). Mezi těmito dvěma vrstvami (PN přechod) se vytváří elektrické pole. Když jsou elektrony uvolňovány fotony, jsou tlačeny

na N-stranu elektrickým polem, zatímco díry se posouvají na P-stranu. Elektrony a díry jsou směřovány k elektrickým kontaktům přivedeným na obě strany.

Uvolněné elektrony „putují“ vodiči z N vrstvy do P vrstvy. Tím se vytvoří stejnosměrný proud. Tato přeměna se nazývá fotovoltaický efekt, který objevil v roce 1839 francouzský fyzik Edmond Becquerel. Teprve v 60. letech 20. století našly fotovoltaické články první praktické uplatnění v satelitní technologii. FV panely začaly přicházet na střechy koncem 80. let.

2.2.1 Volt-ampérová charakteristika

Volt-ampérová charakteristika je grafická závislost proudu na napětí FV článku. Lze z ní vyčíst základní parametry článku. Je možné ji využít při měření stavu FVE. Za pomoci analyzátoru změříme výstupní napětí a proud daného panelu. Pomocí čidla teploty a intenzity záření dokáže analyzátor převést jmenovité parametry udávané výrobcem při standardních zkušebních podmínkách STC na idealizovanou V–A charakteristiku při podmínkách měření. S touto charakteristikou následně srovná změřené údaje napětí a proudu. Díky tomuto srovnání může analyzátor snadno odhalit i na pohled skryté vady FV článků, které ani nemusí být odhaleny termografickou kontrolou.



Obr. 2.3 V–A charakteristika FV článku [15]

2.2.2 Základní parametry FV panelu

Z volt-ampérové charakteristiky na obrázku 2.3 vyčteme základní parametry FV panelu. Jsou určeny těmito čtyřmi veličinami:

- **Zkratový proud I_{sc}** neboli proud nakrátko, který je nejvyšší možnou hodnotou proudu dodávanou FV panelem při daném osvětlení a nulovém napětím. Velikost tohoto proudu závisí na teplotě, intenzitě osvětlení, spektrální citlivosti a ploše fotovoltaických panelů. V případě uvažování nulového sériového odporu lze tvrdit, že I_{sc} je roven proudu generovanému světlem I_L .
- **Napětí naprázdno U_{0c}** neboli maximální napětí na svorkách FV panelu bez připojené zátěže při dané intenzitě slunečního záření a teplotě. Hodnota U_{0c} u monokrystalických článků je přibližně 0,6 V a panely mohou dosahovat hodnoty až stovek V.
- **Maximální výkon P_{mpp}** udává hodnotu výkonu, kterou je panel schopen maximálně dodávat. P_{mpp} leží přibližně ve středu ohybu V–A charakteristiky. Je závislý na hodnotě napětí a proudu v bodě maximálního výkonu dle vztahu 2.1:

$$P_{mpp} = I_{mpp} \cdot U_{mpp} \quad (2.1)$$

- **Pracovní bod PB**, který se nachází na V–A charakteristice. V tomto bodě panel zrovna pracuje a jeho poloha je závislá na odběru z FV panelu. Ideální poloha PB leží v oblasti maximálního výkonu. Pro korekci PB slouží tzv. sledovač maximálního PB, jenž přizpůsobuje parametry zátěže tak, aby FV panel dodával co nejvyšší výkon. V případě polohy pracovního bodu v oblasti napětí naprázdno nebo zkratového proudu panel dodává nulový výkon [14].

2.2.3 Účinnost FV článku

Účinnost FV článku je dána již samotnými použitými materiály při výrobě, které ovlivňují spektrální citlivost článku na dopadající záření. Spektrální citlivost udává využitelnou energii z různých vlnových délek záření s jinou účinností. Základní vzorec pro získání účinnosti je popsán vztahem 2.2.

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{E \cdot A_c} \quad (2.2)$$

- Kde: η ...Účinnost (-)
 A_C ...Plocha FV článku (m^2)
 E ...Intenzita osvětlení při standardizovaných zkušebních podmínkách (W/m^2)
 P_{mpp} ...Maximální výkon FV článku (W)

Charakteristiky fotovoltaických článků se měří v laboratořích za předem definovaných světelných a tepelných podmínek. Z tohoto měření získáme základní přehled o reflexivitě, vnitřním odporu, sériovém a paralelním odporu FV panelu. Pro zlepšení účinnosti je do horní části FV článku přidána antireflexní vrstva, aby se minimalizovala ztráta fotonu v důsledku povrchového odrazu, jedná se o hodnotu reflexivity R odvozenou z indexu lomu polovodiče.

Na vnitřním odporu FV článku R_m vzniká nežádoucí úbytek napětí. Určíme ho při maximálním výkonu poměrem U_m ku I_m . Sériový odpor je udáván mezi pospojovanými FV články v panelu a měl by být co nejnižší kvůli nežádoucímu úbytku napětí na svorkách panelu. Skládá se z odporu materiálu polovodiče, odporu spojovacích kontaktů a vodičů. Malý paralelní odpor může signalizovat svodové proudy kolem okrajů FV článku a vadné články, které se chovají jako při vnitřním zkratu.

V provozních podmínkách FVE ovšem nedocílíme laboratorních podmínek k výrobě energie. Setkáme se s dvěma hlavními veličinami ovlivňujícími účinnost a provoz FV systému. Jsou jimi teplota a intenzita slunečního záření.

Teplota ovlivňuje především velikost výstupního napětí. Obecně lze tvrdit, že čím je u FV systémů venkovní teplota vyšší, tím vyšší bude i pokles napětí na výstupu FV panelu. S vyšší teplotou souvisí i zvýšené ztráty a úbytky napětí na odporu kabeláže. Například v létě při bezvětří, čímž vznikají zhoršené chladicí podmínky a venkovní teplota přesahuje $35\text{ }^\circ\text{C}$, dopadá na panel navíc sluneční záření. Výsledná teplota FV panelů může dosáhnout i $80\text{ }^\circ\text{C}$. Pokles napětí má za následek snížení dodávaného výkonu do sítě. Bohužel tento jev nastává při nejvyšší intenzitě slunečního záření a dochází ke značným ztrátám, až 70 % z dosažitelného denního výnosu panelu [14].

Druhá nejvýznamnější veličina intenzity slunečního záření se projevuje hlavně na proudu generovaného fotovoltaickým modulem. Intenzita slunečního záření je přímoúměrná generovanému proudu. Pokud o polovinu snížíme intenzitu, sníží se i proud o polovinu. Sluneční záření nemá na rozdíl od teploty na napětí příliš vliv. Z výše zmíněných údajů lze odvodit, že oba zmíněné parametry ovlivňují celkový výkon FVE. Pokud klesá napětí a proud, klesá také výkon.

2.3 Odhad reálné výnosnosti pomocí softwarové simulace

Budoucí majitelé fotovoltaické elektrárny chtějí před samotnou instalací znát výnosnost FVE a na základě meteorologických dat mít zvolené optimální umístění a sklon FV modulů pro dosažení maximální efektivity výroby. To lze nejlépe provést u nových staveb, kde se již při stavbě uvažuje o umístění elektrárny. Zde je důležitá spolupráce architekta s projektantem. Architekt odpovídá za polohu a orientaci budovy a střechy. Projektant má zase na starost uspořádání FV modulů, umístění vedení, střídačů a optimální transport energie.

Při návrhu a instalaci FVE na budovu, která pro ni nebyla určená, může dojít k navýšení nákladů na instalaci FVE a nedokonalému řešení umístění FV panelů, což má za následek pokles celkové výnosnosti.

Výnosnost FVE lze určit ručně, u této metody je přesnost spíše přibližná, mnozí majitelé se s ní nespokojí a chtějí znát přesnější údaje se započítáním reálných komponent, polohy atd. pomocí modelace.

K těmto účelům slouží softwarová simulace. Na trhu je možné najít několik simulačních programů od různých společností. Zástupci jsou například DEKSOFT FVE, PV*SOL a PVsyst, ve kterém budu provádět v tomto bodě simulaci pro zhodnocení ztrát FVE. Licence PVsystu je zdarma po dobu zkušební doby jednoho měsíce.

2.3.1 Odhad reálného výkonu fotovoltaické elektrárny

Před výpočtem odhadu reálného výkonu FVE určíme ideální energetický výnos. Jedná se o sluneční ozáření na ploše generátorů v závislosti s účinností FV modulů. V případě teoretického výpočtu bez simulace využíváme ke zjištění výnosnosti průměrný roční dopad sluneční energie na místo umístění FVE. Tento údaj musíme následně upravit v závislosti na sklonu a orientaci panelů dle kapitoly 1.1.2. Následně započítáme celkovou plochu panelů a jejich účinnost. Závislost je popsána vztahem 2.3.

$$E_{id} = A_{pv} \cdot e \cdot \eta_{tsc} \quad (2.3)$$

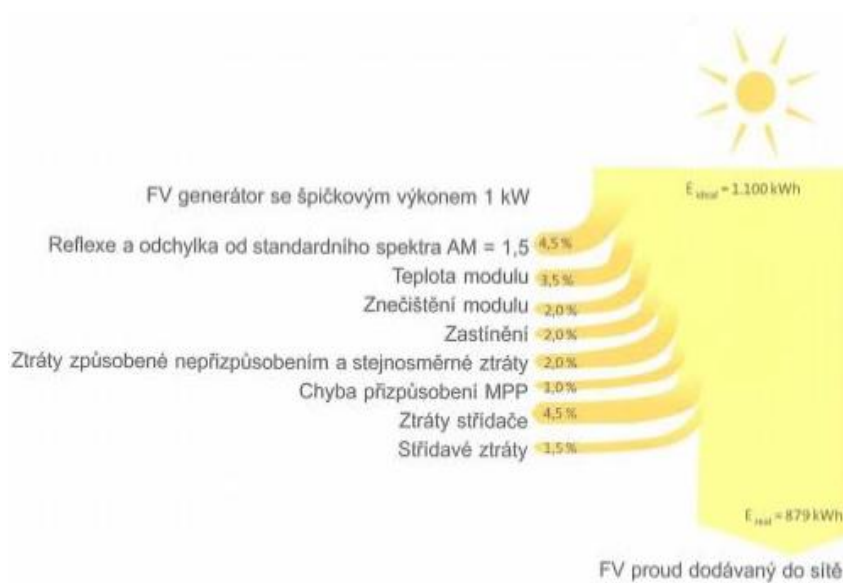
Kde: E_{id} ...Ideální energetický výnos (kWh)

A_{pv} ...Plocha generátorů (m^2)

e ...Sluneční ozáření (kW/m^2)

η_{tsc} ...Jmenovitá účinnost FV modulu

Pro získání reálného výkonu je třeba znát jakost FVE, tu znázorňujeme pomocí součinitele výkonnosti PR (Performance Ratio). Tento koeficient vyjadřuje ztráty energie FV elektrárny od FV panelů až k rozvaděči. PR lze ovlivnit kvalitními komponenty a správným naprojektováním, například co nejkratšími kabelovými spoji vedenými v zastíněné části nosné konstrukce. Celkové ztráty jsou znázorněny na obrázku 2.4.



Obr. 2.4 Tok energie a ztráty FVE [18]

Po získání PR, který se u střešních FVE pohybuje v rozmezí 70–80 %, můžeme určit reálný výkon FVE z jednoduchého vztahu popsáným vzorcem 2.4:

$$E_{re} = E_{id} \cdot PR \quad (2.4)$$

Kde: E_{re} ...Reálný energetický výnos (kWh)

PR...Součinitel výkonnosti

E_{id} ...Ideální energetický výnos (kWh)

2.3.2 Program Pvsyst

Jedná se o výkonný software pro fotovoltaické systémy. Je navržen pro použití architektky, inženýry a výzkumníky. Nabízí přívětivý přístup s podrobnou nápovědou a průvodcem k vývoji projektů. Pvsyst umí zpracovávat meteorologická data z různých zdrojů.

Například z:

- Meteonormu 7.3
- NASA-SSE
- PVGIS TMY
- Externího zdroje

Pro polohu FVE v Evropě je nejrozzumnější volit nástroj Meteonorm z důvodu velkého množství dat.

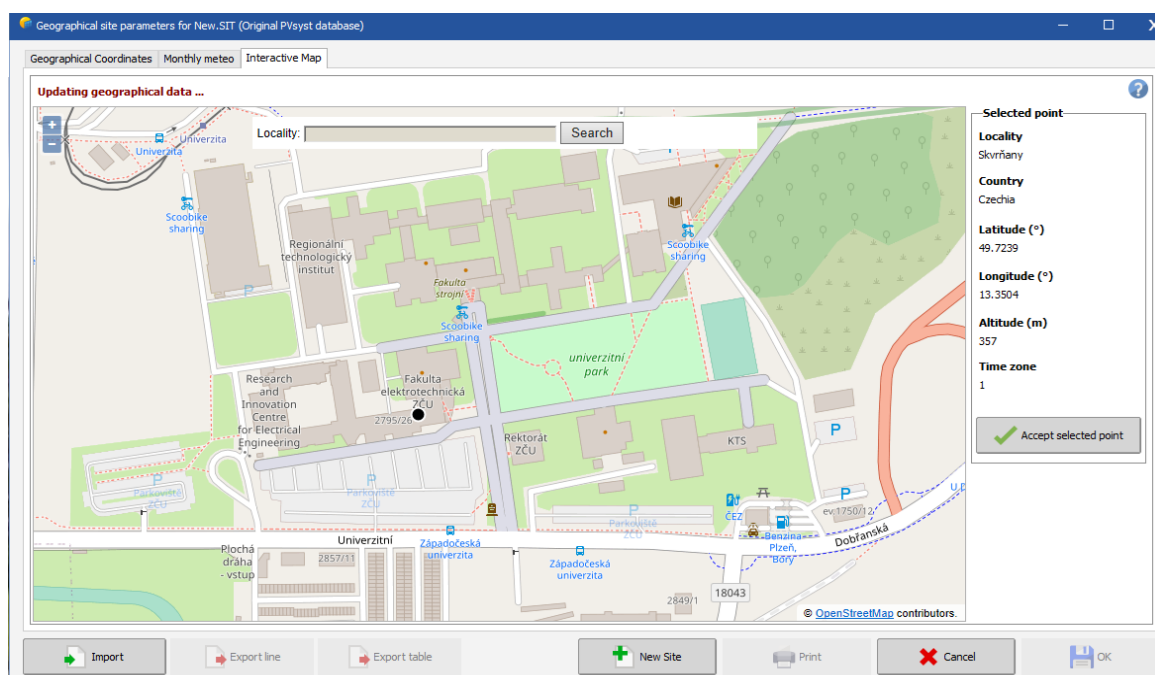
Dále program nabízí rozsáhlou knihovnu parametrů FV panelů a střídačů. Díky této knihovně a možnosti zadání dalších údajů o FVE lze ze simulace získat přehledný diagram ztrát a důvěryhodný odhad výnosu elektrárny, který si v následujících bodech ověříme.

2.3.3 Zadání hodnot do programu PVsyst a příprava simulace

Po spuštění programu se zobrazí uvítací okno, ve kterém je přehled o již vytvořených projektech, dokumentacích obsahující textovou nápovědu a video tutoriálech, dále se zde nachází výběr možných projektů podle FV systémů. Například pro FVE s akumulací do baterií, FVE s uložením energie do vody a FVE s připojením k síti. Zkoumaná elektrárna na střeše FEL je přímo připojená k síti bez možnosti akumulace, proto vybereme poslední možnost „Grid-Connected“.

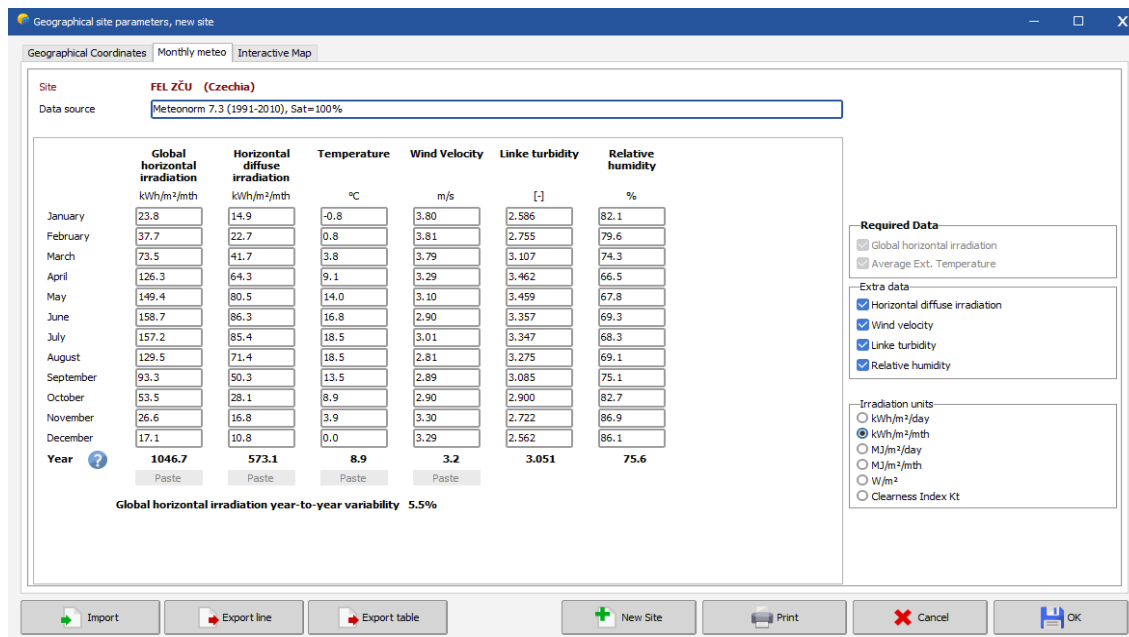
V projektu jako první navolíme přesnou geografickou polohu elektrárny, zobrazenou na obrázku 2.5 pomocí černého bodu. Po akceptování vybraného bodu překročíme k určení parametrů místa polohy FVE. Jako nepraktické hodnotím, že i přes předchozí výběr přesné lokace je nutné manuálně zadávat název země a její region.

Dále je možné vygenerovat graf sluneční dráhy, který je zobrazen v příloze A.



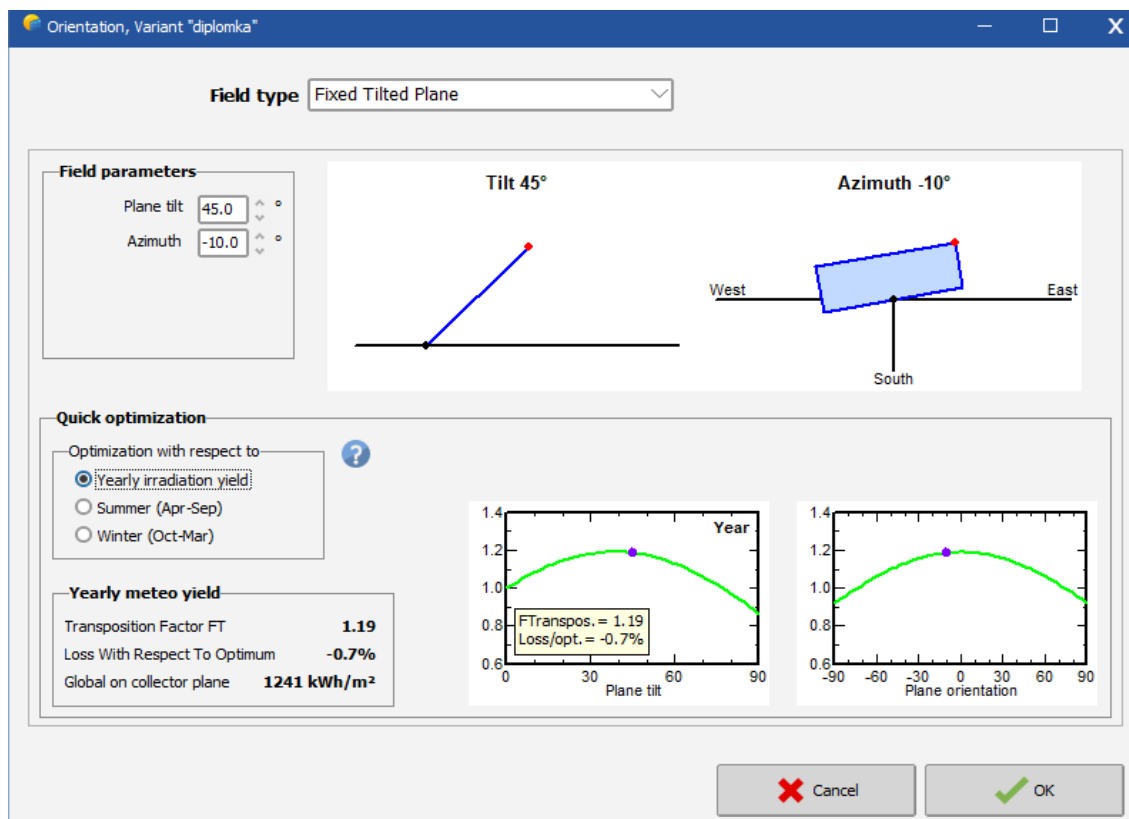
Obr. 2.5 Geografická poloha

Po vyplnění výše zmíněných údajů naimportujeme data z Meteoronu 7.3, viz obrázek 2.6. Nejdůležitějšími údaji jsou globální horizontální záření a teplota, zbylé hodnoty nejsou k simulaci nezbytné, pouze zpřesňují hodnoty.



Obr. 2.6 Metoddata z Meteonormu

Nyní, když již máme zpracovaná data o geografické poloze a naimportované údaje z Meteonormu, přejdeme k nastavení parametrů samotné elektrárny. Jako první určíme orientaci.



Obr. 2.7 Orientace a sklon FV panelů

Na obrázku 2.7 si můžeme povšimnout rozhraní pro zadání sklonu a orientace panelů a v horní části ukotvení panelů, které je zvolené jako pevné, jelikož je FVE ukotvena na ocelové nosné konstrukci. Zkoumaná elektrárna má sklon 45 stupňů a azimut -10 stupňů. Ve spodní části je vidět vhodnost zvolených parametrů zaměřenou na celoroční výrobu. Rozdíl oproti optimálnímu řešení je pouhých 0,7 %. Pokud budeme uvažovat neměnný azimut, nejideálnější bude sklon 40 stupňů, kdy rozdíl oproti optimu činí pouhých 0,3 %. Dále je na výběr ze zaměření na výrobu hlavně v letním nebo zimním období. Z energetického hlediska se u malých střešních elektráren v našem podnebném pásmu dnes vyplácí zaměření na výrobu v zimním období, z důvodů vyšší energetické náročnosti na vytápění. V oblasti Středozeří se naopak může vyplatit výroba zaměřená na letní období z důvodu napájení klimatizací.

V dalším kroku nastavíme hlavní systémové parametry. Podle obrázku 2.8 nejdříve zadáme celkovou plochu FV panelů zkoumané FVE, která činí 164 m^2 . Dále vybereme z knihovny FV panelů výrobce Isofoton a daný typ použitých panelů z monokrystalických článků I-110/24.

The screenshot shows the 'Grid system definition, Variant VCI: "diplomka"' window. The 'Sub-array' configuration is as follows:

- Sub-array name and Orientation:** Name: PV Array, Tilt: 45°, Azimuth: -10°, Orient: Fixed Tilted Plane.
- Select the PV module:** Isofoton, 110 Wp 29V Si-mono I 110/24, Maximum nb. of modules: 192.
- Select the inverter:** Sun Power, 2.5 kW 194 - 400 V LF Tr 50 Hz SP 2500-450, Output voltage: 230 V Mono 50Hz.
- Design the array:** Mod. in series: 8, Nb. strings: 24, Nb. modules: 192, Area: 164 m².
- Operating conditions:** Vmpp (60°C): 237 V, Vmpp (20°C): 284 V, Voc (-10°C): 385 V.
- Global system summary:**

Parameter	Value
Nb. of modules	192
Module area	164 m ²
Nb. of inverters	8
Nominal PV Power	21.1 kWp
Maximum PV Power	20.1 kWDC
Nominal AC Power	20.0 kWAC
Pnom ratio	1.056

Obr. 2.8 Nastavení modulů FVE

V knihovně střídačů zvolíme výrobce Sun power a typ SP 2500-450. Navolíme počet osm větvových střídačů. Díky rozsáhlosti knihoven bylo možné najít parametry modulů již přednastavené, pokud by se jednalo o typ výrobků, který se v knihovně nenachází, je možnost ho do ní zadat manuálně v databázi programu. V posledním kroku nastavíme počet modulů v sérii a počet stringů.

Nastavení parametrů stínění v případě této FVE není potřeba, jelikož se elektrárna nachází na střeše vysoké budovy, kterou v okolí nic nezastiňuje. Program ovšem nabízí detailní modelaci případných překážek.

Již můžeme přejít ke spuštění samotné simulace. Po zpracování dat se zobrazí hlavní okno výsledků simulace. Jsou zde vypsány základní parametry FV systému, čtyři okna, ve kterých lze zobrazit různé grafy, nejdůležitější z nich jsou zobrazeny ve zprávě ze simulace v příloze B. Dále zde program nabízí výpis celkové zprávy, jednotlivých tabulek, grafů, ekonomického zhodnocení a ztrátového diagramu.

Přehled hlavních veličin získaných ze simulace je zobrazen na obrázku 2.9.

Main results			
System Production	19180 kWh/yr	Normalized prod.	2.49 kWh/kWp/day
Specific prod.	908 kWh/kWp/yr	Array losses	0.50 kWh/kWp/day
Performance Ratio	0.769	System losses	0.25 kWh/kWp/day

Obr. 2.9 Hlavní veličiny simulace

2.3.4 Zpráva s výsledky simulace

Všechny hlavní hodnoty z výsledné simulace nalezneme v tabulce 2.1, kde jsou rozděleny po jednotlivých měsících během jednoho roku. Jsou zde uvedeny údaje o globálním horizontálním záření, které má v daném místě polohy FVE hodnotu 1046,7 kWh/m² za rok. Tato hodnota se liší od hodnoty 1026 kWh/m² z kapitoly 1.1.1 o pouhých 2 %.

Dále zde máme údaje o difúzním horizontálním záření, průměrné teplotě, globální udávajícím globální efektivní ozáření se započítáním znečištění vzduchu a zastínění, této hodnoty lze využít při určení ideálního energetického výnosu. E_{Array} určuje vyrobenou energii se započítáním ztrát na FV modulech. E_{Grid} je celková vyrobená energie se započítáním všech ztrát FVE, která je přivedena do rozvaděče.

PR je součinitel výkonnosti, který hodnotí celkový stav a účinnost FVE. Průměrná hodnota 0,769 je slušná, vzhledem k tomu, že většina FVE je v rozmezí 0,7–0,8. Nejnižší PR je v červenci a srpnu s hodnotou 0,748. Nejvyšší hodnota PR je v lednu 0,814. Je to ovlivněno závislostí ztrát systému, kterou dále vysvětlím pomocí přehledného grafu.

Tab. 2.1: Výpis měsíčních veličin ze simulace

Balances and main results								
	GlobHor	DiffHor	T_Amb	GlobInc	GlobEff	EArray	E_Grid	PR
	kWh/m ²	kWh/m ²	°C	kWh/m ²	kWh/m ²	MWh	MWh	ratio
January	23.8	14.86	-0.83	44.6	43.7	0.858	0.768	0.814
February	37.7	22.65	0.79	57.1	55.8	1.081	0.974	0.808
March	73.5	41.66	3.81	96.9	94.5	1.800	1.638	0.801
April	126.3	64.31	9.06	140.4	136.6	2.529	2.325	0.784
May	149.4	80.52	14.04	142.5	138.0	2.503	2.285	0.759
June	158.7	86.27	16.79	146.6	142.1	2.552	2.332	0.753
July	157.2	85.36	18.51	148.5	144.0	2.568	2.347	0.748
August	129.5	71.40	18.45	132.3	128.2	2.288	2.089	0.748
September	93.3	50.33	13.45	114.9	112.0	2.041	1.866	0.769
October	53.5	28.06	8.95	78.6	76.6	1.417	1.279	0.770
November	26.6	16.80	3.89	45.6	44.6	0.849	0.752	0.780
December	17.1	10.81	-0.01	32.4	31.7	0.606	0.525	0.767
Year	1046.7	573.04	8.95	1180.5	1147.8	21.091	19.180	0.769

Legends

GlobHor Global horizontal irradiation

DiffHor Horizontal diffuse irradiation

T_Amb Ambient Temperature

GlobInc Global incident in coll. plane

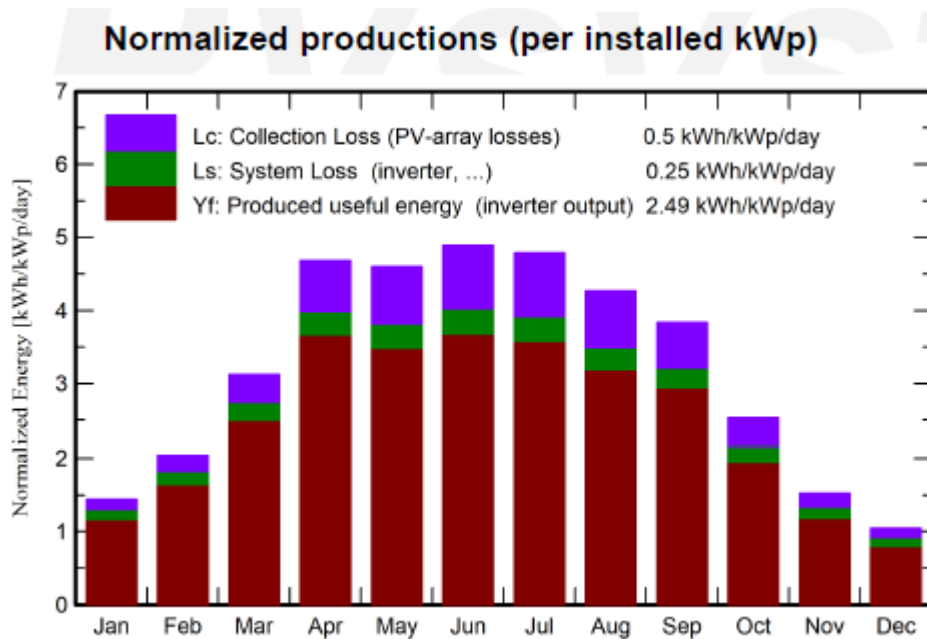
GlobEff Effective Global, corr. for IAM and shadings

EArray Effective energy at the output of the array

E_Grid Energy injected into grid

PR Performance Ratio

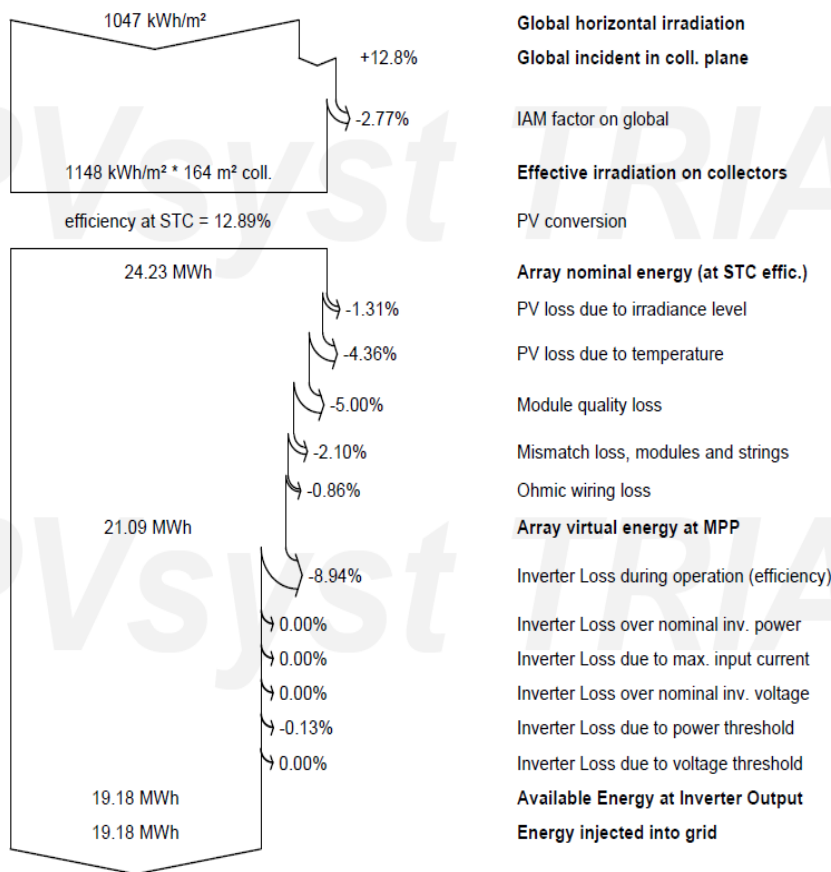
Na grafu normalizované výroby 2.1 je zobrazena vyrobená energie za den vztažená na kWp. Můžeme si povšimnout, že nejnižší výroba je v zimních měsících, prosinci a lednu. Zároveň je ale systém během tohoto období nejméně ztrátový. Během letního období máme nejvyšší podíl výroby v roce, intenzita slunečního záření je od května do srpna průměrně okolo 149 kWh/m² a teplota 17 °C. Z fialové části charakteristiky vyčteme ztráty vznikající na FV panelech, ze zelené potom ztráty na střídačích. Podle teoretických předpokladů se potvrzuje, že čím bude vyšší intenzita záření, tím vyšší bude také vyrobená energie, a čím více vzroste teplota, tím více poklesne hodnota napětí na FV člancích a začnou narůstat ztráty.



Graf 2.1 Vyrobená energie vztahovaná na kWp

Pomocí ztrátového diagramu dostaneme přehled ztrát během celého roku. Diagram začíná od celkové roční hodnoty horizontálního slunečního ozáření 1047 kWh/m^2 v místě FVE. Po přičtení 12,8 % zahrnujících navíc difúzní záření a odečtení 2,77 % kvůli IAM faktoru zahrnujícím množství vzduchu v atmosféře, přes který proniká sluneční světlo, dostaneme celkovou intenzitu záření dopadající na nakloněnou plochu FV panelů 1148 kWh/m^2 .

Nyní převedeme hodnotu intenzity záření vynásobením účinnosti FV modulů 12,89 a jejich plochou 169 m^2 na hodnotu ideálního energetického výnosu 24,23 MWh. Od této ideální hodnoty dále odečteme ztráty vlivem k úrovní slunečního ozáření, ztráty vlivem teploty okolí a panelů, kvality provedení FV modulů, jejich nesouladu a ohmických ztrát elektrického vedení. Získáme hodnotu výnosu 21,09 MWh z výstupu FV generátoru. Zbývá odečíst všechny ztráty vznikající ve střídačích, poté se již dostaneme k výslednému odhadu reálného výnosu, který činí 19,18 MWh.



Obr. 2.10 Ztrátový diagram

Kompletní údaje o simulaci jsou přiloženy k nahlédnutí v příloze B.

3 Simulace dlouhodobého provozu FVE

V této kapitole popíšeme teorii k degradaci a stárnutí panelů, provedu simulaci dlouhodobého provozu zkoumané FVE ve dvou programech PVsyst a PV*SOL. Parametry simulace pro stárnutí FVE a meteorologická data pro následné objektivní porovnání vstupních dat jednotlivých programů nechám neměnné.

3.1 Degradace a stárnutí FV panelů

Každý produkt má svoji životnost. Od výrobku požadujeme, aby měl schopnost uchovat si požadované parametry po stanovenou dobu nebo v dlouhodobém horizontu za vlivu předvídatelných podmínek. Během doby života produktu by měly být prováděny běžné údržby ke správnému chodu a splnění kladených požadavků. Správně provedená údržba pomůže k prodloužení životnosti zařízení. Výkonové parametry produktu mají být udržovány na dostatečné úrovni v porovnání s novým produktem po celou dobu životnosti. Fotovoltaické panely mají odhadovanou životnost stanovenou výrobcem na 25–30 let.

Všechny FV panely se časem pomalu degradují, to znamená, že produkují méně energie při stejných světelných podmínkách. Tento proces stárnutí je ovlivněn mnoha faktory, například již při výrobě záleží na množství nečistot, příměsích obsažených v materiálu, dále na struktuře a chemickém složení FV panelu. Materiály, ze kterých je FV panel složen, podléhají různě stárnutí a degradaci, ať již vlivem podmínek venkovního prostředí, nebo dopadajícím zářením. Degradace materiálu je definovaná jako souhrn nevratných změn vlastností materiálu za daných podmínek majících zásadní vliv na účinnost FV panelů [14].

Jedním ze způsobů degradace jsou mikrotrhliny, které se tvoří v křemíku FV článků. Tyto malé praskliny způsobují zhoršení vodivosti elektrických spojů, to znamená zmenšení potenciální elektrické energie na vstupu do střídače. Jednou možností vzniku mikrotrhlin je prostřednictvím tepelných změn. Během zimy se materiál smršťuje a naopak v teple roztáhne. Tento jev se nevyhne ani FV panelům a při teplotních změnách je materiál vystaven napětí a vznikají trhlinky.

Další degradaci může způsobit silný vítr, který na panely působí dynamickým mechanickým zatížením. Pokud ovšem jsou panely správně uchyceny a použité materiály ve FV panelu jsou kvalitní, neměl by vliv větru výrazně přispívat k degradaci. Extrémní chladné a horké teploty, vlhkost a led také přispívají k degradaci, dále i samotné sluneční světlo, jehož vlivy rozeberu v samostatné kapitole.

Životnost použitých FV panelů Isofoton I-110/24 ve zkoumané elektrárně udává výrobce na 25 let. Garantuje, že výkon po deseti letech neklesne pod 81 % nominálního výkonu a po dobu 25 let bude vyšší než 72 % nominálního výkonu. Je velmi pravděpodobné, že FV panely budou vyrábět elektrickou energii i po uplynutí doby garantované výrobcem. První moderní instalovaný FV panel stále vyrábí energii i po šedesáti letech. Otázka hospodárnosti je, zda se vyplatí provozovat takový systém dále, nebo investovat do nových panelů s vyšší výnosností.

3.1.1 Degradace FV článků zářením

Ve skutečnosti FV panely degradují jednou z nejvyšších rychlostí jen několik hodin po instalaci, když jsou poprvé vystaveny slunci a jeho UV paprskům. Toto se nazývá degradace vyvolaná světlem, z původního názvu light induced degradation se zkratkou LID. FV panely mohou za tuto krátkou dobu degradovat o 1 až 3 %, ale poté se degradace zpomalí. Degradace negativně působí na minoritní nosiče náboje tím, že jim zkracuje životnost.

K degradaci FV článků dochází vlivem dopadajícího záření jenom na polovodičové vrstvě P. Je to dáno aktivním prvkem bóru, kterým je nejčastěji křemíkový polovodič dotován. Ovlivněny jsou polykrystalické i monokrystalické články. Články typu N nejsou vlivem světelného záření degradací ovlivněny, neboť jsou dotované fosforem či arsenem, degradaci nepodléhají ani v případě vyššího obsahu kyslíku v základním materiálu [14].

Jsou zjištěny dva hlavní mechanismy degradace FV článků dotovaného bórem, a to:

- Disociace párů bór – železo
- Formování rekombinačně aktivních komplexů bór – kyslík

V obou případech se jedná o elektricky řízené reakce defektů substitučními atomy bóru, ve kterých dochází při osvětlení FV článků k výraznému zkrácení životnosti nosičů náboje do jejich rekombinace.

Disociace párů bór – železo:

K této degradaci dochází kontaminací materiálu železem. V křemíkovém polovodiči typu P se vytváří páry intersticiálního železa (Fe_i) se substitučním bórem (B_s). Vznikne molekula Fe_iB_s , která je při působení světla vystavena rekombinačnímu procesu, při kterém bór s železem disociují. V tmavém prostředí při teplotě kolem 20 °C se molekula reformuje (jednotlivé prvky se spojí) a obnoví se typická velikost rezistivity 1 Ω cm. Doba životnosti nosičů v křemíku dopovaným bórem a kontaminovaným železem je určena právě železem, páry Fe_iB_s nebo kombinací obou a je závislá na historii vzorku [18].

Záporně nabitě částice železa jsou v tmavém prostředí při pokojové teplotě nadále pohyblivé a při setkání s kladně nabitým atomem bóru dojde k obnovení molekuly Fe_iB_s . Na základě definice lze tvrdit, že původní účinnost a životnost nosičů náboje je při určité době uložení v temnu při teplotě pod 100 °C obnovena [14].

Formování rekombinačně aktivních komplexů bór – kyslík:

Degradace se může objevovat i u vysoce čistého křemíku, který není kontaminován železem, ale vyrobeného Czochralského metodou, a to vlivem formování komplexu bór – kyslík. K formování dochází při koncentraci kyslíku v materiálu vyšší než $5 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-3}$. Koncentrace bór – kyslíkových defektů je závislá lineárně na množství substitučního bóru a kvadraticky na koncentraci intersticiálního kyslíku. Účinnost článku klesá během dopadání světelného záření až do doby dosažení stabilního stavu. Tento pokles účinnosti je v několika jednotkách procent. Se stejným poklesem účinnosti klesá i doba života nosičů náboje do doby ustálení stavu. Původní parametry FV článku lze obnovit při vystavení článku teplotě nad 200 °C po dobu 10–15 minut. Celý proces zahřívání musí probíhat za tmy, neboť během zahřívání za světla by docházelo současně k degradaci i regeneraci a k obnovení původních vlastností nedojde správně. Správným postupem lze docílit dokonce zvýšení hodnot parametrů nad původní úroveň [14] [18].

Další degradace dopadajícím zářením je způsobena ultrafialovým spektrem slunečního světla. Vlivem UV záření dochází k degradaci použitých materiálů FV panelu, nejvýznamněji je ovlivněna EVA fólie. Při působení UV záření a vysoké teploty dochází ke změně barvy fólie, nejprve začíná postupně žloutnout od středu FV článku k jeho okraji, poté může barevný odstín přecházet až k hnědé barvě. Na změnu zbarvení má kromě UV záření a okolní teploty vliv i zmiňovaný hot spot v kapitole 2.1.2. Změna odstínu má v reálných podmínkách vliv na zastínění FV článku a tím k poklesu jeho energetické výnosnosti [14].



Obr. 3.1 Změna barvy EVA fólie [20]

3.1.2 Potenciální indukovaná degradace

Potenciální indukovaná degradace vychází z anglického označení PID (Potential induced degradation), jedná se o jev, který vzniká v průběhu měsíců až let. V počátečním stádiu provozu FVE může být zanedbatelný, ale postupem času se PID stává znatelnější a může způsobovat významné snížení výkonu FV panelu v závislosti na typu a umístění panelu ve stringu až o 70 %.

K potenciální indukované degradaci dochází hlavně na FV panelech umístěných nejbližší u záporného pólu, neboť v tomto místě je potenciál vůči zemi nejvyšší. Závisí na typu použitého střídače a délce daného stringu. Standardně je potenciál vůči zemi od -250 do -450 V.

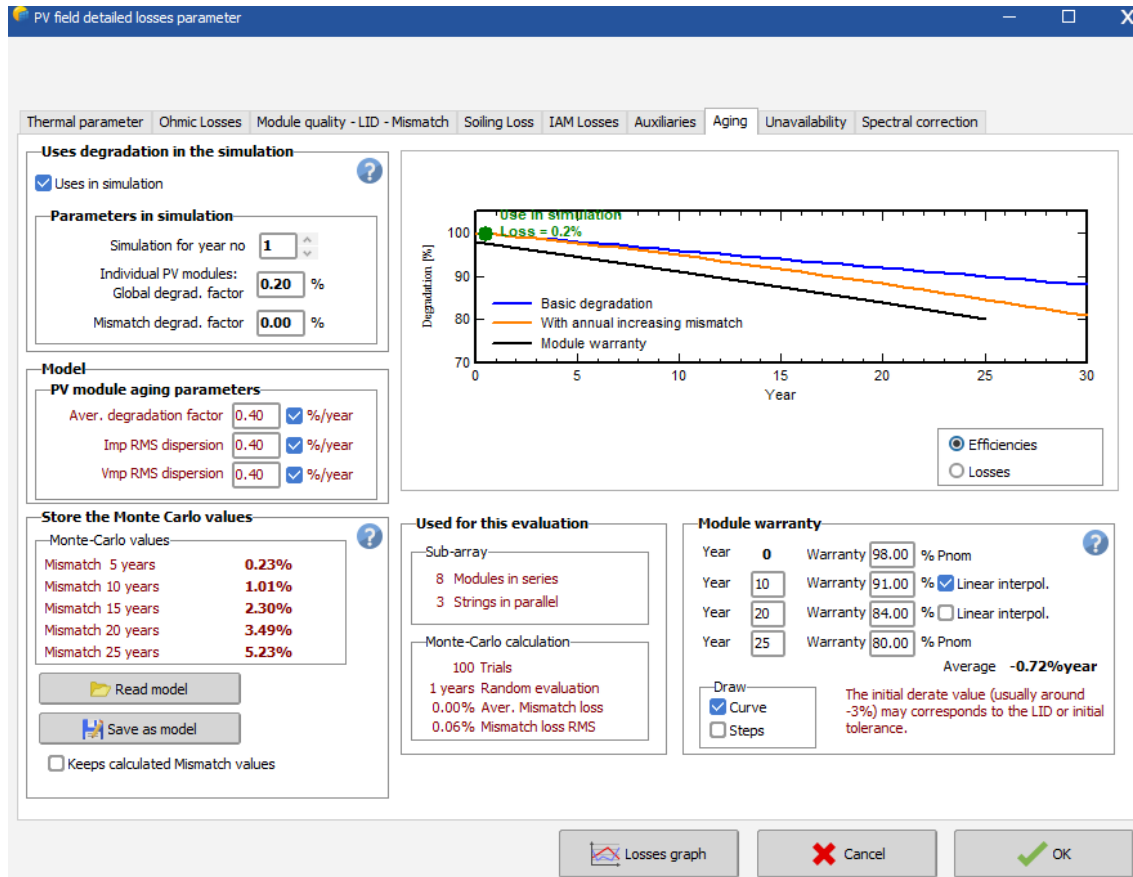
FV modul je vyroben z několika komponent, největší roli v PID jevu hrají FV články, zapouzdřovací materiál (ve většině případů EVA fólie) a hliníkový rám. Když je solární článek polarizován s vysokým záporným napětím, existuje relevantní rozdíl napětí mezi samotným článkem a rámem modulu, ten je na nulovém potenciálu, protože většinu času je uzemněn, takže kvůli velmi krátké vzdálenosti mezi FV články a rámem a kvůli možné přítomnosti nečistot v zapouzdřovacím materiálu může být mezi články a rámem díky vysokému napětí generován proud svedený z FV modulu do země. Jakmile PID jednou nastane, bude se svodový proud stále zvyšovat [19].

3.2 Simulace dlouhodobého provozu v programu PVsyst

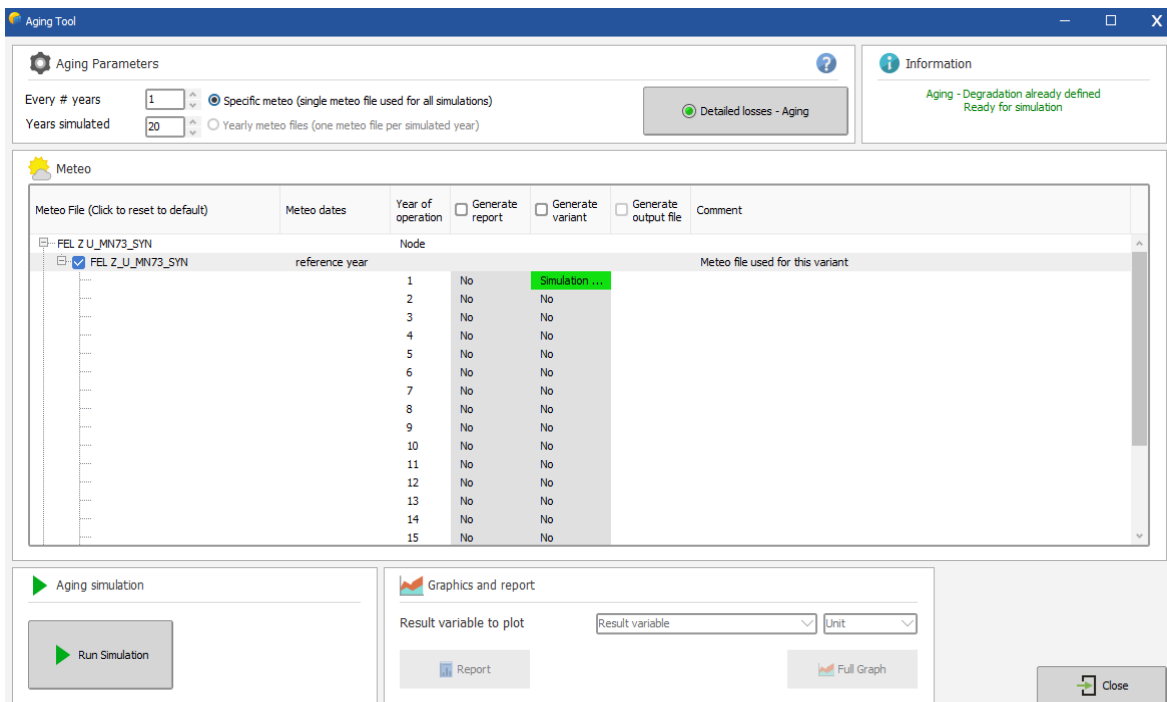
Program PVsyst mimo jiné i umožňuje plánovat dlouhodobou predikci výnosnosti FVE. Tato studie je důležitá z hlediska informací o ekonomické návratnosti elektrárny, udává vyrobenou energii v závislosti na časové degradaci během let. Meteorologická data vstupující do simulace jsou pouze orientační v závislosti na dlouhodobé studii z dřívějších let 1990–2010. Vzhledem ke globálnímu oteplování může být ovšem klima v ČR dnes v jiných podmínkách než před jedenácti lety.

V projektu PVsystu využijeme nastavené parametry systému FVE z kapitoly 2.3. V nastavení detailů ztrát FVE přejdeme do záložky Aging, kde potvrdíme použití studie v simulaci viz obrázek 3.2. Parametry necháme neměnné pro objektivní porovnání vstupních dat s programem PV*SOL.

V nastavení simulace z obrázku 3.3 zvolíme, aby se vyhodnocoval každý jednotlivý rok po dobu dvaceti let, a spustíme simulaci.



Obr. 3.2 Nastavení degradace



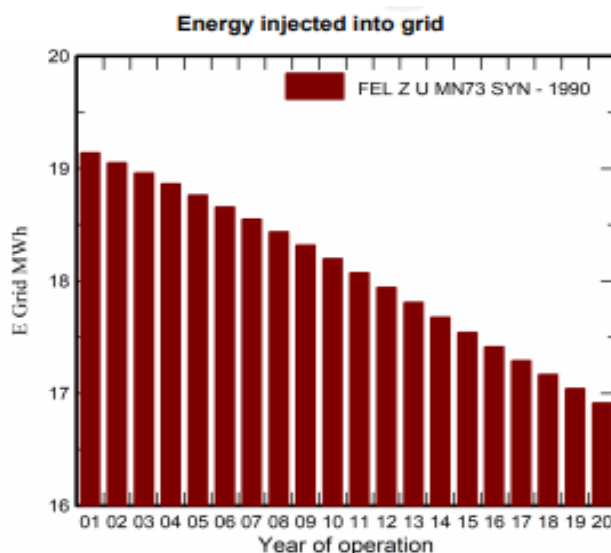
Obr. 3.3 Nastavení dlouhodobé simulace

Získané predikce z dlouhodobého provozu zkoumané elektrárny jsou zobrazeny v tabulce 3.1. Lze si povšimnout, že ve výsledcích simulace dochází k výraznému stárnutí a ztrátám výnosnosti fotovoltaické elektrárny. Meteorologická data z Meteonormu jsou nastavena jako referenční pro každý analyzovaný rok, proto lze vyloučit vlivy počasí na zkoumaném stárnutí. Ve čtvrtém sloupci tabulky pozorujeme PR loss, který souvisí s procentuální ztrátou součinitelů výkonosti a tím i celkové vyrobené elektrické energie.

Tab. 3.1: Získané dlouhodobé predikce

Aging Tool			
FEL Z U MN73 SYN			
Year	E Grid	PR	PR loss
	MWh		%
1	19.14	0.768	0%
2	19.05	0.764	-0.5%
3	18.96	0.76	-0.9%
4	18.86	0.757	-1.4%
5	18.76	0.753	-2%
6	18.66	0.748	-2.5%
7	18.55	0.744	-3.1%
8	18.44	0.739	-3.7%
9	18.32	0.735	-4.3%
10	18.20	0.73	-4.9%
11	18.07	0.725	-5.6%
12	17.94	0.72	-6.3%
13	17.81	0.714	-7%
14	17.68	0.709	-7.6%
15	17.54	0.704	-8.3%
16	17.41	0.698	-9%
17	17.29	0.693	-9.7%
18	17.17	0.689	-10.3%
19	17.04	0.684	-11%
20	16.92	0.678	-11.6%

Z grafu 3.1 pozorujeme téměř lineární závislost ztrát PR loss. Například dle simulace v prvním roce daná FVE vyrobí 19,14 MWh, v desátém roce je ztráta téměř 5 % s výrobou 18,2 MWh a v posledním dvacátém roce simulace činí ztráty 11,6 % s výrobou pouhých 16,95 MWh. Na základě těchto údajů mi přijde proces stárnutí příliš rychlý, neodpovídající reálným podmínkám. Ovšem charakteristika stárnutí je v programu zadaná obecně dle obecných parametrů panelů udávaných výrobcem. Reálným stárnutím zadané FVE se budou zabývat až v 5. bodě zadání. Zarážející pro mě byla hodnota vyrobené energie v 1. roce, neboť při stejných meteorologických i zadaných ztrátách systému je tento údaj o 40 kWh nižší oproti simulaci z bodu 2.3. Z toho vyplývá, že simulace z bodu 2.3 nezapočítává degrační ztráty, protože nebyla zaškrtnuta možnost použití degrační charakteristiky.



Graf 3.1 Závislost vyrobené energie na čase

3.3 Simulace dlouhodobého provozu v programu PV*SOL premium

PV*SOL premium je dynamický simulační program s 3D vizualizací a podrobnou analýzou stínování pro výpočet fotovoltaických systémů v kombinaci se spotřebiči, bateriovými systémy a elektrickými vozidly. S PV*SOL můžeme navrhovat a simulovat všechny typy moderních FV systémů. Od malého střešního systému s několika moduly přes středně velké systémy na komerčních střechách až po velké solární parky.

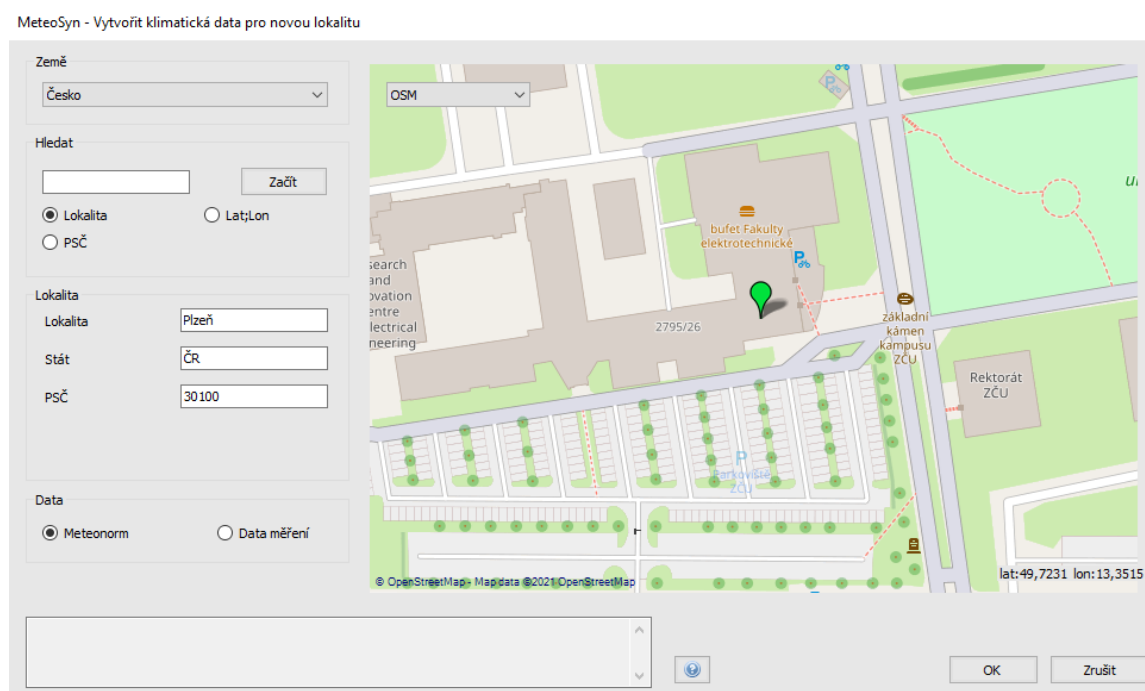
Program obsahuje rozsáhlou databázi, která v současné době zahrnuje více než 21 000 fotovoltaických modulů, 5 100 střídačů, 1 900 bateriových systémů a mnoho dalších produktů, jako jsou elektrická vozidla a optimalizátory výkonu. Je pravidelně aktualizována výrobcí produktů, takže může pracovat s nejnovějšími daty [21].

Obdobně jako program PVsyst získává PV*SOL meteorologická data z programu Meteororm 7.3. Nezahrnutá data míst v Meteorormu jsou získána pomocí satelitních dat a sousedních pozemních měřicích stanic.

3.3.1 Zadání parametrů zkoumané FVE do programu PV*SOL

Po založení nového projektu zapíšeme základní projektová data, jako je název projektu, začátek provozu FVE, adresu instalace a jméno projektanta. Jedná se o informativní údaje nemající vliv na simulaci.

V další záložce zvolíme typ systému, klimatické podmínky a parametry sítě. Nastavíme druh zařízení na FVE připojená do sítě. Parametry jsou třífázová síť s fázovým napětím 230 V a $\cos\varphi = 1$. Nyní přejdeme k nastavení metoodat, zvolíme vytvořit klimatická data pro novou lokalitu a nastavíme geografickou polohu, údaje o lokalitě, viz obrázek 3.4. Máme na výběr ze dvou možností, buď automatické generování dat z Meteonormu 7.3, nebo vložit vlastní data měsíčního pozorování během roku.



Obr. 3.4 Geografická poloha v PV*SOL

Po potvrzení Meteonorm vygeneruje data s roční sumou globálního záření 1058 kWh/m² a průměrnou roční teplotou 8,5 °C. Zajímavé je, že program PVsyst získal z databáze Meteonormu pro stejnou polohu jiné údaje (1046,7 kWh/m² a 8,9 °C) než PV*SOL. Rozdíl činí pouhých 1,1 % u globálního záření a 4,5 % u teploty. Přesto tento rozdíl bude mít vliv na určení celkové výnosnosti.

Postoupíme k nastavení modulů. V katalogu modulů se bohužel model I-110 24V od firmy Isofoton nenachází. Proto jsem našel ze zdroje [22] parametry daného modulu. V databázi jsem vytvořil nový modul, viz obrázek 3.5.

FV modul (Pouze pro čtení)

Základní údaje

Elektrické údaje

U/I charakteristiky při STC

U/I charakteristiky při ve slabém světle

Další parametry

Rozměry

U/I charakteristiky při STC	
Napětí v MPP ve V	34,8
MPP proud v A	3,2
Napětí chodu naprázdno ve V	43,2
Zkratový proud v A	3,4
Höjning i tomgångsspänning före stabilisering ve %	0
Jmenovitý výkon ve W	110
Faktor naplnění ve %	75,82
Účinnost v %	13

U/I charakteristiky při ve slabém světle	
<input checked="" type="checkbox"/> Standardní výkon při slabém světle	
Model	Dvojdiódový model
Sériový odpor R_s v Ω	1,18e-02
Paralelní odpor R_p v Ω	56,838
Parametry sytíčního proudu $Cs1$ ve A/K ³	8,999e+01
Parametry sytíčního proudu $Cs2$ ve A/K ^(2,5)	3,624e-03
Parametry fotovoltaického proudu $C1$ ve m ² /V	2,864e-03
Parametry fotovoltaického proudu $C2$ ve m ² /(V*K)	1,8e-06
Fotoelektrický proud v A	3,401

Další parametry	
Koeficient napětí (V_{oc}) ve mV/K	<input type="radio"/> mV/K <input type="text" value="-160"/>
Koeficient napětí (V_{oc}) ve %/K	<input checked="" type="radio"/> %/K <input type="text" value="-0,37"/>
Koeficient proudu (I_{sc}) v mA/K	<input type="radio"/> mA/K <input type="text" value="1,8"/>
Koeficient proudu (I_{sc}) v %/K	<input checked="" type="radio"/> %/K <input type="text" value="0,053"/>
Koeficient výstupu v %/K	<input type="text" value="-0,38"/>

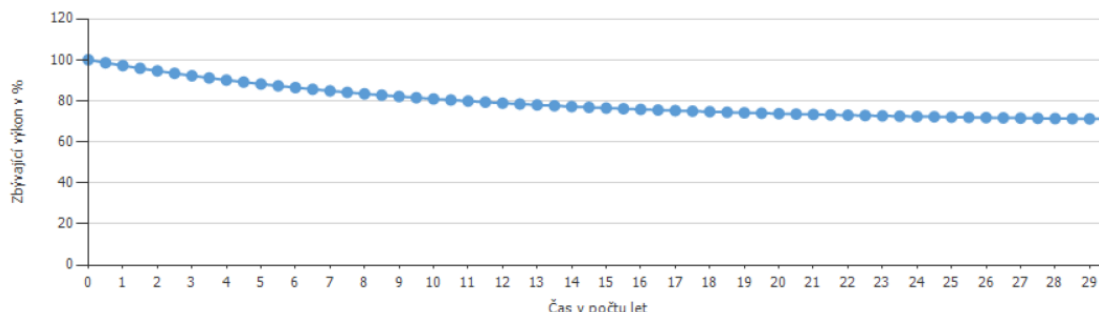
Obr. 3.5 Nastavené parametry FV modulu Isofoton I-110 24V

V základních údajích jsem vyplnil informace o výrobcí, typu modulu, dále se zde automaticky generují informace o datu vložení modulu do databáze a ID uživatele. Mé ID je generováno jako HP dle názvu počítače, na kterém pracuji.

V elektrických údajích navolím, že se jedná o monokrystalické FV články o počtu 72 na FV panel. Rozměry jsou 654×1310 mm s povrchem $0,86$ m². Další údaje jsou vypsány již na obrázku 3.7. U/I charakteristiky při slabém světle generuje program automaticky. Program umožňuje po zadání parametrů zobrazit i voltampérovou charakteristiku, křivku U–P a charakteristickou křivku účinnosti.

Po navolení parametrů FV modulu zvolíme celkový počet FV modulů 192 kusů s výkonem 21,12 kWp. Situace při vestavbě je nastavena jako montáž na stojanech na střeše se sklonem panelů 45° a orientací 170° odpovídající azimutu -10° .

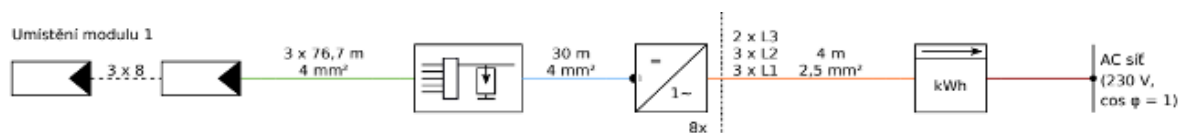
Bohužel degradace FV modulu není v PV*SOLu přednastavena, proto nastavím degradaci FV modulů z údajů od výrobce. Zvolím exponenciální křivku, zbývající výkon po deseti letech je garantován na 81 % a zbývající výkon po 25 letech na 72 %. Program vykreslí charakteristiku dle obrázku 3.6.



Obr. 3.6 Exponenciální degradační charakteristika

Parametry střídače byly zvoleny z databáze. Navolil jsem 8× Sun Power SP 2500-450. Dále se zvolí uspořádání modulů do tří větví po osmi modulech v sérii dle technické dokumentace dané FVE. PV*SOL automaticky zkontroluje vhodnost tohoto uspořádání, případně sám navrhne konfiguraci.

Program PV*SOL nabízí možnost přehledně zpracovat ztráty na kabelech. Z technické zprávy o FVE bylo zjištěno, že stejnosměrné vedení je provedeno z mědi s průřezem 4 mm² a střídavé vedení ze střídačů do elektroměru je CYKY 2,5 mm². Přehledné schéma je zobrazeno na obrázku 3.7.

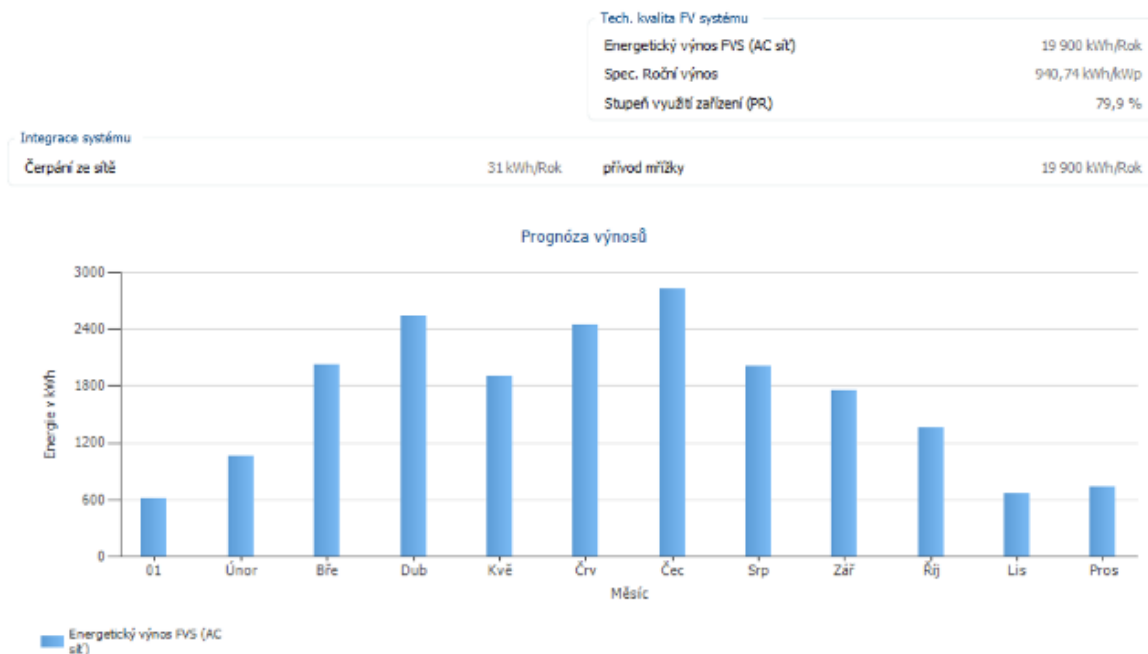


Obr. 3.7 Nastavení kabeláže FVE

Délky kabelů jsem v technické dokumentaci bohužel nenašel, proto byly zvoleny pouze orientačně na základě rozlohy FVE. Pro každou sestavu E1 až E8 jsem volil 3× 76,7 m kabelu do přípojovací skříně a 30 m do střídače. Ze střídačů dále jen 4 m kabelu do rozvaděče, jelikož se nachází ve stejné místnosti jako střídače. Celková ztráta na kabelech činí 1,1 % (232,1 W).

3.3.2 Výsledky simulace z programu PV*SOL

Základní výsledky simulace jsou zobrazeny pro první rok provozu. Výnosnost FVE vychází 19900 kWh/rok, součinitel výkonnosti je 79,9 %.



Obr. 3.8 Prognóza výsledků v PV*SOLu

Bohužel program PV*SOL neumožňuje v testovací verzi exportovat údaje z technické zprávy a ani neumožní náhled tabulky s hodnotami vyrobené elektrické energie během let. Proto na základě grafu degradace modulu z obrázku 3.6 vytvořím tabulku 3.2 s daty v programu OpenOffice.

V tabulce 3.2 jsou zaznamenány procentuální ztráty FV modulů v závislosti na stáří FVE. Je rozdělena na dvě části. První část popisuje degradaci v závislosti na hodnotách degradace garantované výrobcem, druhá část je zadána do PV*SOLu kvůli porovnání programů na základě hodnot degradace přednastavené v PVsystu, kde je dána charakteristika degradace údaji maximálního poklesu výkonnosti po 10 letech na 91 %, po 20 letech na 84 % a po 25 letech 80 %, viz obrázek 3.2.

PV*SOL umožňuje zvolit mezi lineární a exponenciální degradační charakteristikou. Já jsem volil exponenciální pro údaje garantované výrobcem a lineární pro údaje z PVsystu.

V první části je vidět rychlý pokles vyrobené energie, během 10. roku činí 17,9 % a po 20 letech celých 25,8 %. Na základě této charakteristiky lze odvodit nejhorší možný scénář, který u daných FV modulů může nastat. Pokud by totiž stárnutí bylo větší, je možnost FV moduly reklamovat v rámci záruky.

Tab. 3.2: Vyrobena el. energie v závislosti na degradaci FVE

Rok	Degradanční křivka garantovaná výrobcem			Degradanční křivka dle údajů z Pvsystu		
	Ztráty PR (%)	PR (%)	E Grid (kWh/rok)	Ztráty PR (%)	PR (%)	E Grid (kWh/rok)
1	0	79,9	19900	0	79,9	19900
2	2,8	77,1	19342,8	0,9	79	19720,9
3	5,4	74,5	18825,4	1,8	78,1	19541,8
4	7,8	72,1	18347,8	2,7	77,2	19362,7
5	9,9	70	17929,9	3,6	76,3	19183,6
6	11,8	68,1	17551,8	4,5	75,4	19004,5
7	13,6	66,3	17193,6	5,4	74,5	18825,4
8	15,1	64,8	16895,1	6,3	73,6	18646,3
9	16,6	63,3	16596,6	7,2	72,7	18467,2
10	17,9	62	16337,9	8,1	71,8	18288,1
11	19,1	60,8	16099,1	9	70,9	18109
12	20,1	59,8	15900,1	9,7	70,2	17969,7
13	21,1	58,8	15701,1	10,4	69,5	17830,4
14	22	57,9	15522	11,1	68,8	17691,1
15	22,8	57,1	15362,8	11,8	68,1	17551,8
16	23,5	56,4	15223,5	12,5	67,4	17412,5
17	24,2	55,7	15084,2	13,2	66,7	17273,2
18	24,8	55,1	14964,8	13,9	66	17133,9
19	25,3	54,6	14865,3	14,6	65,3	16994,6
20	25,8	54,1	14765,8	15,3	64,6	16855,3

Druhá část tabulky má mírnější pokles, ovšem lineární charakteristika z programu PV*SOL má větší sklon než charakteristika z PVsystu. Tato lineární charakteristika během desátého roku poklesne o 8,1 % oproti 4,9 % a během dvacátého roku o 15,3 % oproti 11,6 %. Je to dáno tvarem křivky, která je po dobu 25 let pouze lineární. Možnosti nastavování degradační křivky jsou podrobněji zpracovány v programu PVsyst, kde se křivka během prvních deseti let skládá z lineární charakteristiky a poté v 25. roce parabolicky klesá na 80 %. Proto v PVsystu není ze začátku taková procentuální ztráta.

Technická zpráva v testovací verzi bohužel neumožňuje export, proto jsou v příloze D zobrazeny snímky obrazovky z programu, kde jsou k náhledu dostupné podrobné informace ze simulace.

4 Porovnání simulací dlouhodobého provozu s reálnou výrobou

Zkoumaná FVE je vybavena vlastním systémem měření, který vyhodnocuje a zaznamenává jednotlivá data během celého dne. Data výroby elektrické energie se během dní různě mění, proto je důležité sledovat údaje během většího časového období, ideálně vyrobenou energii za rok. Tyto roční hodnoty jsou na katedře elektroenergetiky elektrotechnické fakulty sledovány od počátku instalace FVE v roce 2004 až po současnost. Pro přehled jsou roční údaje z elektroměru ručně zapsány do sešitu umístěného na katedře.

Tyto údaje reálné výroby z jednotlivých let společně s výsledky ze simulačních programů jsem zaznamenal do tabulky 4.1.

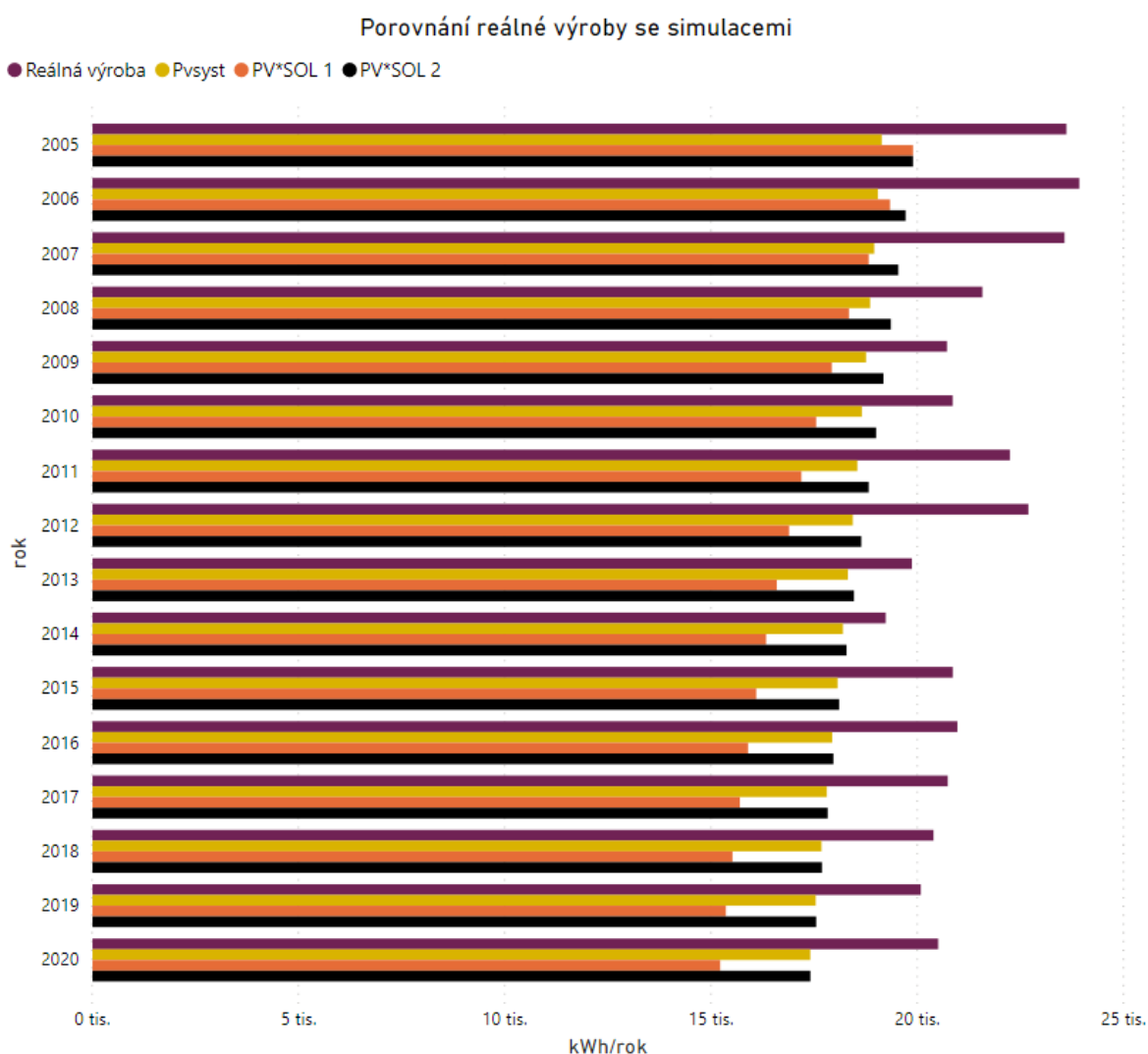
Tab. 4.1: Porovnání reálné výroby s dlouhodobými simulacemi

Rok	Reálná výroba (kWh/rok)	PV*SOL 1 (kWh/rok)	PV*SOL 2 (kWh/rok)	Pvsyst (kWh/rok)
2005	23618	19900	19900	19140
2006	23931	19342,8	19720,9	19050
2007	23573	18825,4	19541,8	18960
2008	21582	18347,8	19362,7	18860
2009	20724	17929,9	19183,6	18760
2010	20861	17551,8	19004,5	18660
2011	22249	17193,6	18825,4	18550
2012	22696	16895,1	18646,3	18440
2013	19873	16596,6	18467,2	18320
2014	19237	16337,9	18288,1	18200
2015	20864	16099,1	18109	18070
2016	20976	15900,1	17969,7	17940
2017	20743	15701,1	17830,4	17810
2018	20396	15522	17691,1	17680
2019	20088	15362,8	17551,8	17540
2020	21373	15223,5	17412,5	17410
Celkem	342784	272729,5	297505	293390
Odchylka (%)	–	20,44	13,21	14,41

Reálná výroba je ovlivněna intenzitou slunečního záření a klimatickými hodnotami, které nelze předem předvídat. Simulační programy určí meteorologické podmínky v prvním roce simulace jako referenční a poté postupně snižují energetický výnos dle degrační charakteristiky. Zároveň se simulační programy snaží predikovat výrobu z pesimistického hlediska, zohledňujícího negativní situace, které mohou nastat.

Celková reálně vyrobená energie činí 342784 kWh. Největší odchylka od reálné výroby je 20,44 % ze simulace PV*SOL 1, kde byla nastavena nejrychlejší degradace dle záruky od výrobce. V simulaci PV*SOL 2 a Pvsyst jsem degradační charakteristiku nastavil dle standardního přednastavení v PVsystu, a to s maximálním poklesem výnosnosti po 10 letech na 91 %, po 20 letech na 84 %. Rozdíl v odchylce mezi těmito simulačními programy je dán hlavně za prvé rozdílnými meteorologickými hodnotami získanými v Meteonormu a za druhé rozdílným průběhem degradační charakteristiky, viz kapitola 3.2.2.

Pro přehlednou grafickou vizualizaci jsem vytvořil graf 4.1.



Graf 4.1 Porovnání reálné výroby se simulacemi

Lze si povšimnout, že nejvyšší výnosnost měla zkoumaná FVE v prvních třech letech provozu. Následné snížení výnosnosti může mít mnoho příčin. Důvodem mohly být

nadprůměrně vhodné meteorologické podmínky. Degradace LID dle mého názoru na následném snížení mít podíl nebude, neboť se projevuje krátce po instalaci FVE, zato potenciální indukovaná degradace po třech letech pokles výroby způsobit může nárůstem svodových proudů postižených panelů. Dále může být příčina v mechanickém poškození panelů, vzniku horkých míst a poškození bypass diod.

Zároveň je na grafu pěkně viditelný přibližný tvar degradační charakteristiky. V simulaci PV*SOL 1 opravdu připomíná exponenciální pokles, PV*SOL 2 lineární. U PVsystu tvar není tak zřetelný, v prvních letech je velmi mírný lineární pokles, který se začne po desátém roce parabolicky zvětšovat.

5 Simulace na základě reálných klimatických dat a degradace panelů

V průměru se solární panely kazí každý rok rychlostí 1 %. To je podpořeno zárukou většiny výrobců solárních panelů, která zaručuje do 90 % produkce během prvních deseti let a do 80 % do 25. roku. Studie provedená Národní laboratoří pro obnovitelné zdroje energie (NREL) však ukazuje přesnější obrázek o degradaci solárních panelů. Tato studie zkoumala míru degradace téměř 2 000 solárních systémů po celém světě v různých klimatických podmínkách a zjistila, že monokrystalické panely vyrobené po roce 2000 degradovaly průměrně rychlostí pouhých 0,4 %. To je méně než polovina použité rychlosti 1 % v zárukách. Zatímco solární panely kvůli LID ztrácejí hned několik procent po instalaci, míra degradace se po zbytek jejich životnosti výrazně zpomaluje.

Na základě studie degradace z NREL jsem pro simulaci s reálnými klimatickými daty nastavil degrační charakteristiku a ověřím, jestli se shoduje s reálnými hodnotami výroby elektrické energie.

5.1 Určení reálných klimatických dat

Reálné klimatické hodnoty pro teplotu vzduchu, relativní vlhkost vzduchu a rychlost větru byly zjištěny ze stránek Českého hydrometeorologického ústavu, kde jsou tyto hodnoty v souladu se zákonem 123/1998 Sb. zpřístupněny. Měsíční charakteristiky jsou odvozeny z denních klimatologických charakteristik.

Měsíční údaje o teplotě a relativní vlhkosti vzduchu jsem zpracoval z údajů z měřicí stanice Plzeň město z let 2004–2012 a z měřicí stanice Plzeň Mikulka z let 2013–2020. Rozdělení meteorologických údajů je z důvodu, že z měřicí stanice Plzeň město jsou uvedena data pouze do roku 2012. Údaje o rychlosti větru byly brány již od začátku provozu stanice Plzeň Mikulka (rok 2005). Volil jsem tak z důvodu vyšší nadmořské výšky měřicí stanice, kde údaje nejsou ovlivněny okolními budovami. Na základě toho budou hodnoty rychlosti větru ze stanice srovnatelnější s rychlostmi větru ve výšce střechy budovy elektrotechnické fakulty, na které se nachází zkoumaná FVE.

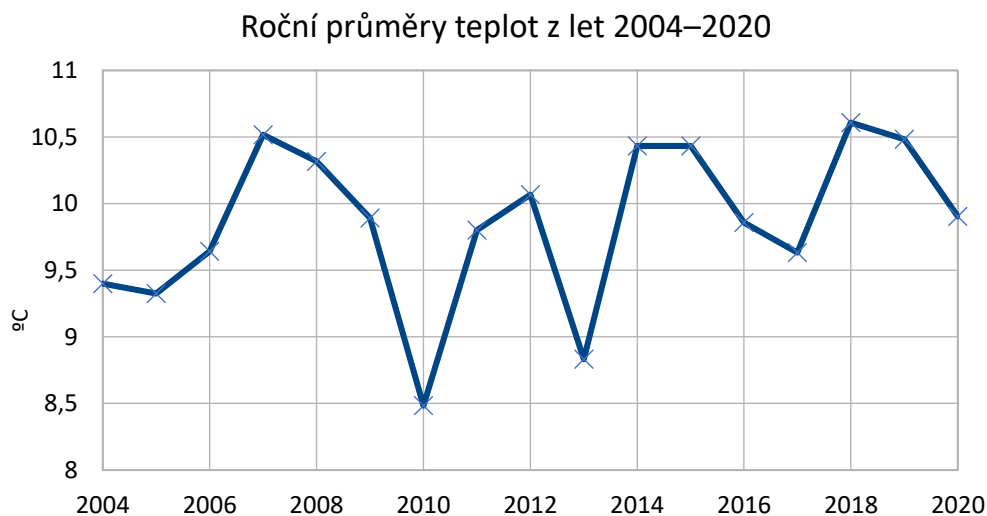
Všechny hodnoty z měsíčního pozorování jsem zpracoval do jednoho souboru Data_CHMU, který je přiložen k diplomové práci, dále jsou v souboru zpracované také roční průměry.

Tab. 5.1: Průměrné roční hodnoty z let 2004-2020

Rok	Teplota (°C)	Vlhkost vzduchu (%)	Rychlost větru (m/s)
2004	9,4	75,83	2,84
2005	9,33	75,67	2,96
2006	9,64	77,42	3,02
2007	10,52	76,92	3,51
2008	10,32	77,42	3,18
2009	9,89	78,42	3,06
2010	8,48	78,92	2,9
2011	9,8	77,33	2,92
2012	10,07	73,58	3,07
2013	8,83	75,08	2,89
2014	10,43	75,42	2,69
2015	10,43	72,25	3,06
2016	9,86	76,17	2,78
2017	9,63	73,83	3,21
2018	10,61	71,08	2,98
2019	10,48	74,5	3,04
2020	9,9	75,33	2,98

V tabulce 5.1 jsou k nahlédnutí průměrné roční hodnoty od začátku provozu FVE do současnosti.

Zajímavé je sledovat roční změny průměrných teplot vzduchu v grafu 5.1. Křivka připomíná sinusový průběh s mírným nárůstem. Nejvyšší průměrná teplota byla dosažena v roce 2018, a to 10,61 °C. Překvapilo mě, že v roce 2014 a 2015 vyšla stejná roční průměrná teplota na dvě desetinná místa. Jelikož pravděpodobnost, že k tomu dojde, je mizivá, považoval jsem to původně za chybu.



Graf 5.1 Roční průměry teplot

Intenzita slunečního záření byla získaná z hodnot měřicí stanice na střeše fakulty elektrotechnické. Data byla zpracovaná do souboru Intenzita přiloženého k diplomové práci. V souboru jsou uvedeny i výsledné hodnoty sluneční energie.

Určit měsíční hodnoty bylo velmi komplikované z důvodu velkého množství hodnot, které se během roku zaznamenávají po pěti minutách (105 107 hodnot za rok). Samotné množství údajů by ovšem nebyl problém, ale meteostanice měla každým rokem určitý počet výpadků v řádu minut, dnů i měsíců. Pro snadnou orientaci a možnost zavedení výpočetních algoritmů jsem vytvořil ideální časové rozdělení, jaké by mělo být bez výpadku meteostanice. Následně jsem nakopíroval získaná metodata, a pokud byly údaje rozhozeny rozdílně oproti ideální časové ose, poznal jsem chybu v údajích. Tyto chyby jsem musel postupně odstraňovat od začátku tabulky, zdvojené hodnoty byly odstraněny a chybějící jsem odhadl, standardně jsem doplnil polovinu hodnot výpadku z údajů před chybou a druhou polovinu z údajů po chybě, pokud nebyl výpadek delší než polovina měsíce. Pokud byl výpadek delší, byl vymyšlen celý měsíc podle údajů z podobných klimatických roků na základě teploty a slunečního svitu. Například v roce 2009 byl výpadek tři měsíce, a to od 1. 1. do 30. 3. a po celý květen. Zvolené hodnoty v těchto měsících lze vidět v tabulce 5.2.

Tab. 5.2: Energie solárního záření z období 2009-2018

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Energie solárního záření (kWh/m ² /měsíc)										
leden	20,12	18,92	24,00	27,89	19,06	19,00	19,00	24,25	25,43	20,70
únor	37,58	38,46	41,31	47,27	30,50	30,20	38,60	46,57	37,64	45,80
březen	75,24	84,81	90,52	94,52	78,29	78,20	85,20	74,50	79,10	69,34
duben	112,32	133,49	129,78	118,65	101,48	102,10	132,90	111,86	101,40	139,79
květen	135,94	118,51	183,20	181,89	116,97	115,00	119,30	149,10	166,39	169,98
červen	152,99	166,18	159,89	162,32	158,66	159,10	167,10	156,98	186,33	156,94
červenec	166,42	187,89	143,11	152,57	182,93	181,00	188,20	157,10	163,65	181,37
srpen	160,61	123,39	139,28	150,00	110,52	111,00	124,10	149,41	141,93	152,47
září	96,33	86,47	99,36	103,11	87,08	85,00	85,80	100,13	71,37	95,08
říjen	49,22	56,07	58,01	53,94	65,14	65,00	57,10	41,19	49,28	59,40
listopad	27,93	24,25	21,21	23,89	22,63	22,50	24,70	24,76	22,74	21,32
prosinec	17,24	20,26	17,65	22,85	21,16	21,20	21,10	15,32	17,05	14,20
Suma/rok	1051,95	1058,71	1107,33	1138,90	994,42	989,30	1063,10	1051,17	1062,30	1126,38

Mezi lety 2014–2015 byl veliký výpadek, proto byly měsíční údaje zvoleny orientačně, některé na základě změřených, jiné domyšlených hodnot (dle teploty a délky svitu v jednotlivých měsících). V tabulce jsou uvedeny výsledné měsíční hodnoty. V letech 2007–2008 jsou tak neúplná a neuspořádaná data (ani polovina dnů v roce), že jsem se je z důvodu velké zavedené chyby v případě domýšlení dat rozhodl nezavádět do simulace. Data z let 2004–2006 a 2019–2020 nebyla k dispozici.

Výpočetní algoritmus jsem volil tak, že jednotlivé upravené a správně seřazené hodnoty v jednotlivých měsících jsem nechal sečíst. Následně vzhledem k tomu, že během jedné hodiny je zaznamenáno dvanáct údajů, jsem měsíční sumu vydělil dvanácti. Tím jsem docílil přesné hodnoty energie slunečního záření v kWh/m²/měsíc, kterou následně uplatním v simulaci.

5.2 Zadání klimatických dat a degradace do simulace v PVsystu

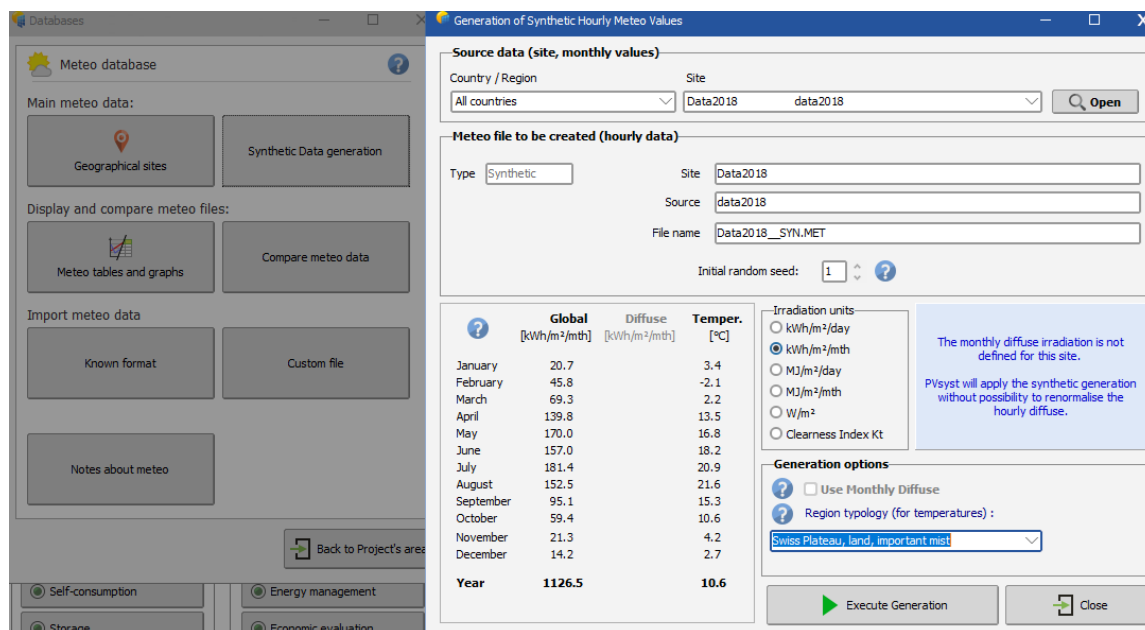
Program PVsyst byl pro analýzu s reálnými daty vybrán z důvodu podrobnějšího nastavování ztrát FV modulů a také protože umožňuje na rozdíl od zkušební verze PV*SOLu exportovat výsledky simulace. Další výhodou PVsystu je možnost nastavit v degrační charakteristice rovnou zkoumaný rok, pro který bude provedena simulace, a nemusím již hodnoty přepočítávat ručně.

Jako nevýhodu vidím zbytečně složité zadávání vlastních meteodat. V tomto ohledu do PV*SOLu stačí pouze zadat hodnoty do tabulky a potvrdit je. PVsyst má komplikované řešení tím, že se prvně zadají hodnoty do tabulky, hlavní je údaj o měsíční sluneční energii a teplotě, rychlost větru a relativní vlhkost vzduchu jsem zadával jako zpřesňující doplňující údaj. Na obrázku 5.1 lze vidět zadané klimatické hodnoty pro rok 2014, které byly z energetického hlediska nejslabší za celých 17 let provozu FVE.

	Global horizontal irradiation kWh/m ² /mth	Temperature °C	Wind Velocity m/s	Relative humidity %
January	19.0	1.4	2.30	88.0
February	30.2	3.0	2.80	78.0
March	78.2	7.1	3.00	69.0
April	102.1	11.2	2.60	68.0
May	115.0	13.1	3.20	69.0
June	159.1	17.6	2.40	56.0
July	181.0	20.0	2.50	66.0
August	111.0	16.4	2.50	73.0
September	85.0	14.9	2.20	81.0
October	65.0	11.2	2.20	86.0
November	22.5	6.5	2.30	87.0
December	21.2	2.8	4.30	84.0
Year	989.3	10.4	2.7	75.4

Obr. 5.1 Reálné klimatické údaje pro rok 2014

Po zadání hodnot do tabulky a jejich potvrzení ovšem program nezačne uvažovat tyto zapsané hodnoty, ale vygeneruje si vlastní data z Meteoronu. Po podrobném prozkoumání manuálu a programu jsem přišel na to, že musím přejít do meteo databáze a zvolit možnost generování dat „Synthetic Data generation“, viz obrázek 5.2. Následně vyhledáme název souboru dat, která jsme zadali manuálně. Program na základě švýcarského modelu vygeneruje hodinové údaje podle zadaných meteo dat do nového souboru, který po jeho zvolení začne v simulaci používat.



Obr. 5.2 Generace hodinových hodnot z reálných měsíčních údajů

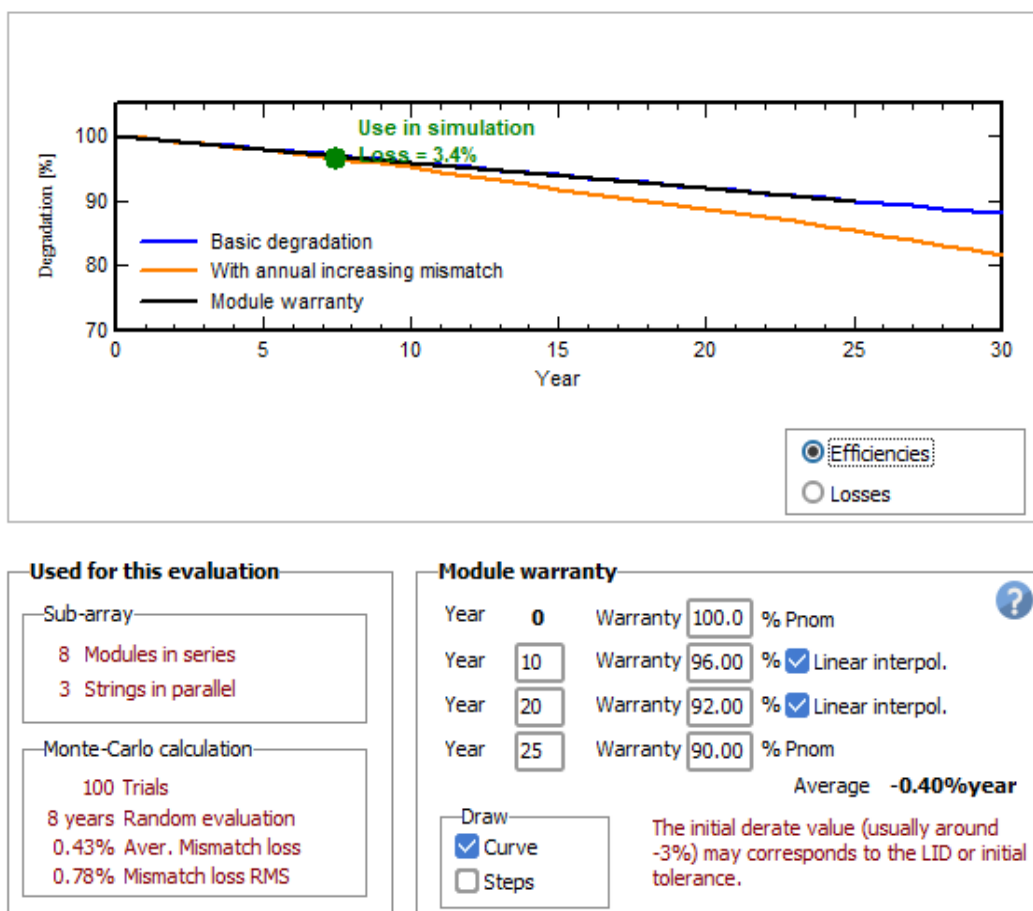
Výsledné datové soubory byly vytvořeny tímto způsobem pro jednotlivé roky 2009–2018 z hodnot popsanych v kapitole 5.1.

Degradace

Při nastavování degrační charakteristiky jsem prvně prováděl simulace pro degradaci 1 % za rok, podle které se řídí většina výrobců FV panelů. Výsledné hodnoty simulace byly ovšem velmi rozdílné oproti realitě. Našel jsem studii od NREL [23], v níž zkoumali míru degradace a provedli přibližně 2 000 testů FV panelů vyrobených po roce 2000 a provozovaných v různých klimatických podmínkách. Výsledek ukázal průměrné stárnutí FV panelů pouhých 0,4 % za rok.

Podle této hodnoty jsem znova přenastavil degrační charakteristiku viz obrázek 5.3. Výsledky se sice zpřesnily, ale rozdíl byl oproti realitě stále příliš velký. Tento rozdíl již však nebyl způsoben degradací, ale ztrátami FV systému. Úpravy ztrát proběhly následovně:

- Započítal jsem ochlazování plochy panelů prouděním vzduchu (větrem) na $4 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot \text{m/s}$.
- Konstantu ztrátového faktoru U_c , která souvisí s odvodem tepla z panelů, jsem navýšil z 20 na $22 \text{ W/m}^2\text{K}$.
- Ztrátu kvůli výrobnímu provedení FV panelů jsem nastavil z 5 % na 0 %, panely totiž mají toleranci $\pm 10 \%$ a výpočetní programy počítají spíše s pesimistickým hlediskem.
- Ohmické ztráty kabelů jsem nastavil dle výsledků ze zadaných délek a průměrů vodičů v programu PV*SOL na 1,1 % místo defaultně zvolených 1,5 %.



Obr. 5.3 Skutečná degrační charakteristika

Takto upravené parametry zůstaly po celou dobu neměnné, pouze se posouval zelený bod na degrační charakteristice (obrázek 5.3) podle zadaného roku stáří FVE. Tím se zajistilo, že při proměnlivých klimatických údajích bude simulovaná vyrobená energie při správně zvolené degradaci co nejvíce odpovídat realitě.

5.3 Porovnání výsledků simulací se skutečnou výrobou FVE

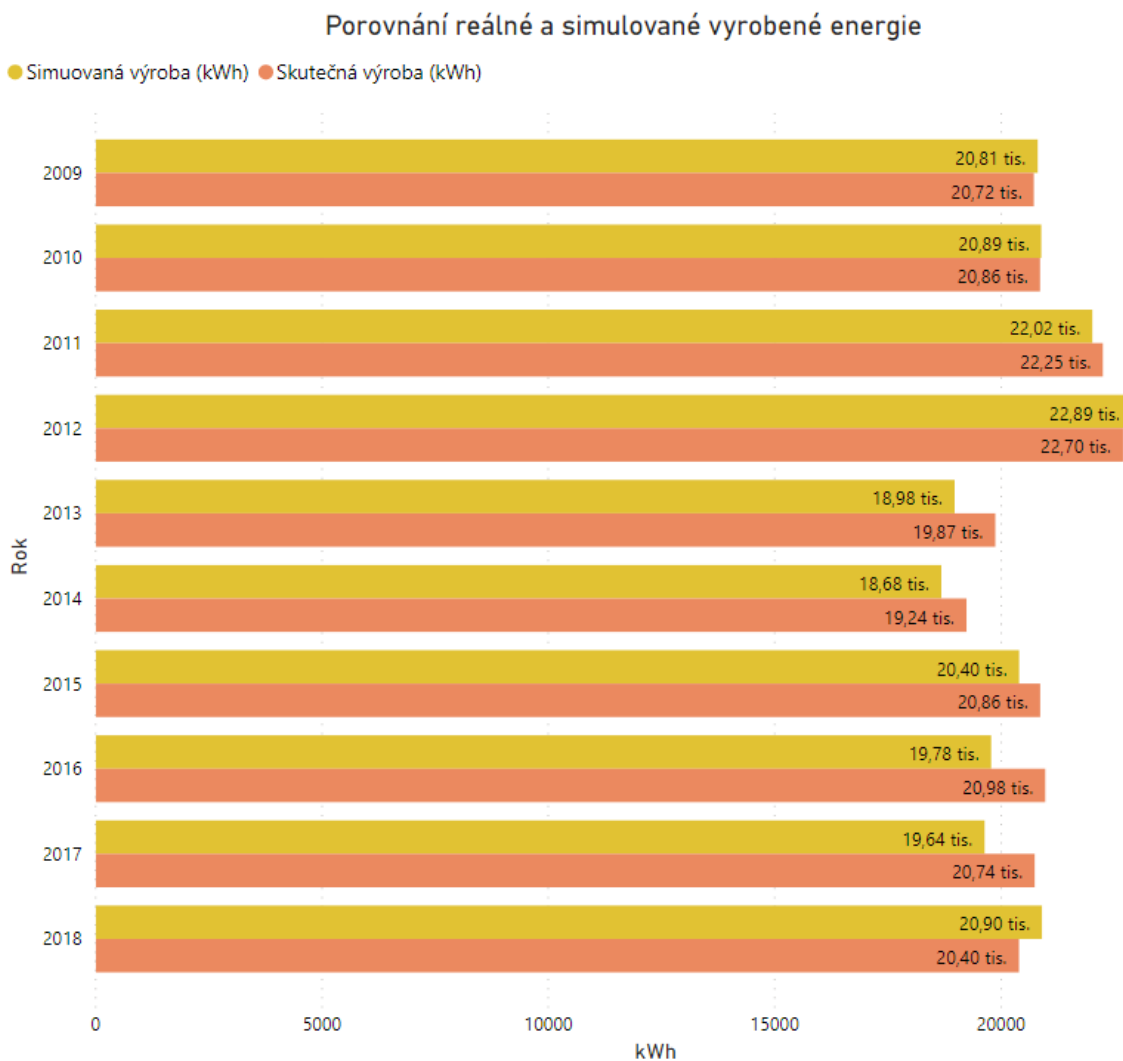
Simulaci jsem spustil pro každý jednotlivý rok od 2009 do 2018, výsledky simulací jsem exportoval do deseti PDF zpráv, zprávu z roku 2010 vložím do tištěné přílohy pro zobrazení parametrů, zbylé zprávy k práci přiložím elektronicky v souboru.

V tabulce 5.3 jsou zobrazeny výsledné hodnoty simulací z jednotlivých let, k nim odpovídající skutečná hodnota a procentuální odchylka. Nejvyšší odchylka byla v roce 2016, a to pouhých 5,7 %, nejmenší odchylka v roce 2010 s odchylkou 0,13 %. Celková skutečná výroba elektrické energie v letech 2009–2018 se od simulované lišila o pouhých 3639 kWh (1,74 %).

Tab. 5.3: Porovnání simulace se skutečnou výrobou

Rok	Skutečná výroba (kWh)	Simulovaná výroba (kWh)	Odchylka výsledků (%)
2009	20724	20810	0,41
2010	20861	20888	0,13
2011	22249	22016	1,05
2012	22696	22892	0,86
2013	19873	18975	4,52
2014	19237	18680	2,90
2015	20864	20399	2,23
2016	20976	19781	5,70
2017	20743	19636	5,34
2018	20396	20903	2,43
Celkem	208619	204980	1,74

Pro přehledné porovnání výsledných hodnot jsem vytvořil řádkový graf 5.2. Z výsledků je patrné, že degrační charakteristika byla nastavena správně a téměř odpovídá reálným hodnotám.



Graf 5.2 Porovnání reálné a simulované vyrobené energie

Kvůli vyšší procentuální odchylce v letech 2013–2017 se může zdát, že degradace je v simulaci v tomto období nastavena příliš strmě, ovšem údaje z roku 2018 to vylučují. V těchto letech jsou odchylky pravděpodobně způsobeny menšími nepřesnostmi hodnot intenzity slunečního záření, neboť docházelo k výpadkům dat, která jsem následně doplnil, viz kapitola 5.2. Další možné nepřesnosti jsou způsobeny samotným výpočtem klimatických údajů v programu ze zadaných měsíčních hodnot.

6 Shrnutí a zhodnocení výsledků

V první, praktické části práce jsem zjistil, že zkoumaná FVE se sklonem panelů 45 stupňů a azimutem -10 stupňů má tyto parametry odchýlené oproti optimálnímu řešení o pouhých 0,7 %. Pokud budeme uvažovat neměnný azimut (budovou natáčet nelze), nejideálnější bude sklon 40 stupňů, kdy rozdíl oproti optimu činí pouhých 0,3 %. Sklon panelů byl pravděpodobně zvolen pro lepší přístupnost k modulům a vyšší výrobě energie v zimním období.

Odhad reálné výnosnosti v programu PVsyst vyšel 19180 kWh/rok, porovnáme-li hodnotu s výnosností během let s podobnými klimatickými údaji, je tato hodnota podhodnocená přibližně o 8 %. Je to dáno tím, že simulační programy počítají s pesimistickým odhadem, aby zákazník nebyl po instalaci FVE nespokojen. Ze ztrátového diagramu je vidět, že při intenzitě 1047 kWh/m² je možné dosáhnout ideálního výnosu 24,23 MWh/rok, po odečtení všech ztrát dostáváme výsledný odhad výroby 19,18 MWh/rok.

Druhá část praktické práce je zaměřena na porovnání dlouhodobých simulací s reálnou výrobou. Tabulka 6.1 ukazuje součet energie od roku 2005 do roku 2020.

Tab. 6.1: Porovnání celkové reálné výroby s dlouhodobými simulacemi

	Reálná výroba	PV*SOL 1	PV*SOL 2	PVsyst
E (kWh)	342784	272729,5	297505	293390
Odchylka (%)	–	20,44	13,21	14,41

Největší odchylka od reálné výroby je 20,44 % ze simulace PV*SOL 1, kde byla nastavena nejrychlejší degradace dle záruky od výrobce. V simulaci PV*SOL 2 a PVsyst jsem degradační charakteristiku nastavil dle standardního přednastavení v PVsystu, a to s maximálním poklesem výnosnosti po 10 letech na 91 %, po 20 letech na 84 %. Rozdíl v odchylce od reálné výroby mezi těmito simulačními programy je dán především za prvé rozdílnými meteorologickými hodnotami získanými v Meteonormu a za druhé rozdílným průběhem degradační charakteristiky.

Během poslední, praktické části jsem získal a upravil reálná meteorologická data, která jsem zadal do parametrů simulace, na základě těchto dat a studie NREL jsem nastavil

pravděpodobnou skutečnou degradační charakteristiku a ztráty systému.

Tab. 6.2: Porovnání reálné výroby se simulací z let 2009-2018

	Reálná výroba	Pvsyst _{realdata}	PV*SOL 1	PV*SOL 2	PVsyst
E (kWh)	208619	204980	165727,2	184015,3	182430
Odchylka (%)	–	1,74	20,56	11,79	12,55

Z tabulky 6.2 je vidět, že odchylka simulace s reálnými údaji je od skutečné výroby pouhých 1,74 %. Oproti tomu klasicky počítané dlouhodobé simulace mají výrazně nižší predikci vyrobené energie. Je to dáno tím, že dopředu nelze přesně odhadnout klimatické hodnoty ani stárnutí, jelikož může dojít k různým poruchám.

Osobně bych pro návrh nové fotovoltaické elektrárny upřednostnil program PV*SOL, z důvodu přehlednosti a jednoduchosti návrhu. Pokud bych analyzoval starší FVE, volil bych PVsyst, který nabízí mnohem více možností k úpravě degradační charakteristiky a nastavení ztrát systému.

Závěr

V této diplomové práci jsem se zabýval simulačními odhady v programech PVsyst a PV*SOL, zhodnotil jsem efektivitu a ztráty fotovoltaické elektrárny, která je umístěna na střeše budovy Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Dále jsem na základě reálných klimatických údajů nastavil degrační charakteristiku fotovoltaické elektrárny a výsledky porovnal se skutečnou výrobou.

V první části jsem se zabýval popsáním geografických podmínek a komponentů FVE. Seznámil jsem se s obecnými poznatky o jednotlivých částech FVE, dále s parametry, které ovlivňují výslednou efektivitu elektrárny, jako je orientace a sklon FV panelů. V technické zprávě elektrárny jsem zjišťoval údaje jednotlivých komponentů z dané fotovoltaické elektrárny.

Ve druhé části jsem provedl popis fotovoltaického článku a diagnostických metod FVE (měření termokamerou a V–A analyzátozem). Následně jsem vytvořil odhad reálného výkonu v programu PVsyst se vstupními daty získanými v technické dokumentaci a z databáze Meteororm. Získal jsem základní přehled v prostředí programu, který jsem rozvíjel v dalších bodech. Z výsledků jsem vyhodnotil sklon, orientaci panelů a ztrátový diagram.

Třetí část jsem věnoval popisu druhů degračních FV panelů. Zhotovil jsem dlouhodobé simulace v programech PV*SOL a Pvsyst. Meteodata získaná z databáze Meteorormu jsou automaticky považována za referenční rok. Výnos FVE se v závislosti na době provozu snižuje dle nastavené degrační charakteristiky. Výsledky jsem porovnal s reálnou výrobou fakultní FVE, kterou jsem získal z údajů od vedoucího práce.

Poslední část práce je zaměřena na určení reálných klimatických údajů. Teplota, rychlost větru a relativní vlhkost vzduchu jsou získané z portálu ČHMÚ. Energii slunečního záření jsem vypočetl na základě intenzity slunečního záření z hodnot databáze měřicí stanice umístěné na střeše Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity. Tyto hodnoty byly poskytnuty vedoucím práce. Reálná meteodata z jednotlivých let jsem zadal do simulace v PVsystu, následně jsem určil skutečnou degrační charakteristiku a ztráty FVE díky porovnání výsledků simulace s reálnou výrobou FVE.

Díky této diplomové práci jsem si rozšířil pohled na tematiku fotovoltaických elektráren a softwarových nástrojů. Již bych byl schopen provést návrh a optimalizaci nové elektrárny. Zjistil jsem, že daná FVE je i po sedmnácti letech ve velmi dobrém stavu, překvapující je dlouhá životnost použitých střídačů. Průměrná degradace FV panelů je pouhých cca 0,4 % za rok.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV. Měsíční přehledy pozorování. *Chmi.cz* [online]. © 2020 [cit. 2020-11-26]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/historicka-data/pocasi/mesicni-data/mesicni-prehledy-pozorovani#>
- [2] PECUCH, M. O městě Plzeň. In: *Plzen.eu* [online]. 28. 8. 2018 [cit. 2020-12-01]. Dostupné z: <https://www.plzen.eu/o-meste/o-meste-plzen.aspx>
- [3] Sluneční energie. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2021 [cit. 2020-12-2]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Slune%C4%8Dn%C3%AD_energie
- [4] ISOFEN ENERGY. Fotovoltaika v podmínkách České republiky: Sluneční záření. *Isofenenergy.cz* [online]. © 2009 [cit. 2020-12-02]. Dostupné z: <http://www.isofenenergy.cz/Slunecni-zareni-v-CR.aspx>
- [5] BECHNÍK, B. Tzbinfo: Optimální orientace a sklon fotovoltaických panelů. In: *Oze.tzb-info.cz* [online]. 23. 6. 2014 [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/114865-optimalni-orientace-a-sklon-fotovoltaickych-panelu>
- [6] ŠEBESTA, J. *Klimatické údaje pro výpočet solárních systémů* [online]. Praha, 2018 [cit. 2020-12-03]. Bakalářská práce. ČVUT, Fakulta strojní. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/79418/F2-BP-2018-Sebesta-Jan-BakPSebesta.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>.
- [7] ZEMKOVÁ, B. Střídače do fotovoltaické elektrárny: Jak vybrat ten nejvhodnější? In: *Elektrina.cz* [online]. 28. 4. 2020 [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: <https://www.elektrina.cz/stridace-do-fotovoltaicke-elektrarny>
- [8] HASELHUHN, R. *Fotovoltaika - Budovy jako zdroj proudu*. Ostrava: HEL, 2010. 176 s. ISBN 978-80-86167-33-6.
- [9] PLANETE ENETGIES. How Does a Photovoltaic Cell Work? In: *Planete-energies.com* [online]. 8. 4. 2019 [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <https://www.planete-energies.com/en/medias/close/how-does-photovoltaic-cell-work>
- [10] Projektová dokumentace fotovoltaické elektrárny ZČU FEL 20 kW
- [11] VOBŮRIL, D. O energetice: Fotovoltaické elektrárny - princip funkce a součásti, elektrárny v ČR. In: *Oenergetice.cz* [online]. 16. 12. 2016 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/technologie/obnovitelne-zdroje-energie/fotovoltaicka-elektrarna-princip-funkce-a-soucasti>
- [12] *Energysage: Monocrystalline and polycrystalline solar panels: what you need to know* [online]. 15. 7. 2020 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://www.energysage.com/solar/101/monocrystalline-vs-polycrystalline-solar-panels/>
- [13] *PVsys* [online]. [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://www.pvsyst.com/>
- [14] KLADIVA, R. *Dlouhodobé sledování parametrů fotovoltaických panelů*. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [15] ELECTRICAL4U. Solar Cell: Working Principle & Construction (Diagrams Included). In: *Electrical4u.com* [online]. 28. 11. 2020 [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: <https://www.electrical4u.com/solar-cell/>
- [16] SAVE ME MONEY. What is a Hotspot in a P.V array? *Savememoney.ie* [online]. © 2021 [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.savememoney.ie/services/solar-pv-faq/hotspot-solar-pv/>

- [17] JAKUBES, J. Fenomén „Snail Trails“ / „šnečí cestičky“ – je ohrožen výkon FVE? In: *Oze.tzb-info.cz* [online]. 8. 9. 2012 [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/9020-fenomen-snail-trails-sneci-cesticky>
- [18] RANDA, S. *Kontrolní měření malé fotovoltaické elektrárny*. Plzeň, 2020. Diplomová práce. FEL, ZČU.
- [19] STRÁNSKÝ, M. *Analýza vadných fotovoltaických panelů* [online]. Plzeň, 2014 [cit. 2021-04-12]. Diplomová práce. FEL, ZČU. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/12362/1/stransky.pdf>.
- [20] TUMINO, P. Causes and Solutions of the Potential Induced Degradation (PID) Effect in PV Modules. In: *Eepower.com* [online]. 9. 7. 2020 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://eepower.com/technical-articles/causes-and-solutions-of-the-potential-induced-degradation-effect-in-pv-modules/#>
- [21] *International Journal of Photoenergy* [online]. 2012, Vol. 2012 [cit. 2021-04-15]. doi: 10.1155/2012/396792. Dostupné z: <https://downloads.hindawi.com/journals/ijp/2012/396792.pdf>
- [22] *Valentin software: The design and simulation software for photovoltaic systems* [online]. [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://valentin-software.com/en/products/pvsol-premium/>
- [23] SUNSOLAR24. I-110/24. *Sunsolar24* [online]. © 2021 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://www.sunsolar24.com/index.php/item.html?i--110/24>
- [24] NREL. Photovoltaic Degradation Rates — An Analytical Review. *Nrel.gov* [online]. © 2012. [cit. 2021-04-27]. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/docs/fy12osti/51664.pdf>
- [25] Fotografie poskytnuté vedoucím práce

Přílohy

Seznam příloh

Příloha A – Graf sluneční dráhy

Příloha B – Exportovaná zpráva z odhadu reálného výkonu v programu PVsyst

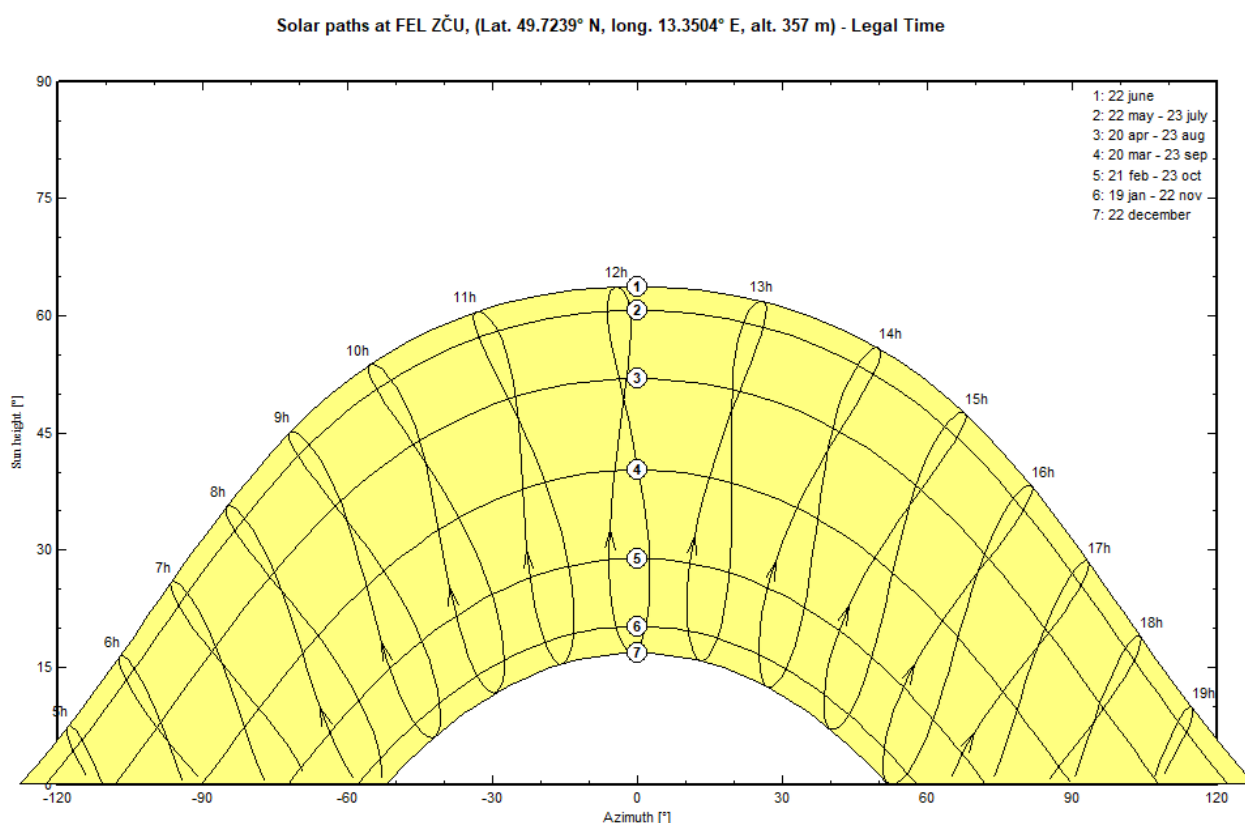
Příloha C – Exportovaná hlavní část zprávy ze simulace dlouhodobého provozu v programu PVsyst

Příloha D – Printscreen zprávy ze simulace dlouhodobého provozu v programu PV*SOL

Příloha E – Exportovaná zpráva ze simulace v roce 2010 s reálnými klimatickými údaji v programu PVsyst

Příloha F – Přiložené CD s klimatickými daty, simulací z PV*SOLu, exportovanými zprávami simulace s reálnými klimatickými daty z jednotlivých let v PVsystu

Příloha A



Příloha B



Version 7.1.7

PVsyst - Simulation report

Grid-Connected System

Project: FVE FEL

Variant: diplomka

No 3D scene defined, no shadings

System power: 21.12 kWp

FEL ZČU - undefined

PVsyst TRIAL

PVsyst TRIAL

PVsyst TRIAL

| Author

**PVsyst V7.1.7**

VCO, Simulation date:
30/03/21 09:45
with v7.1.7

Project: FVE FEL

Variant: diplomka

Project summary

Geographical Site FEL ZČU undefined	Situation Latitude 49.72 °N Longitude 13.35 °E Altitude 357 m Time zone UTC+1	Project settings Albedo 0.20
Meteo data Skvrňany Meteonorm 7.3 (1991-2010), Sat=100% - Synthetic		

System summary

Grid-Connected System	No 3D scene defined, no shadings	
PV Field Orientation Fixed plane Tilt/Azimuth 45 / -10 °	Near Shadings No Shadings	User's needs Unlimited load (grid)
System information		
PV Array	Inverters	
Nb. of modules 192 units	Nb. of units 8 units	
Pnom total 21.12 kWp	Pnom total 20.00 kWac	
	Pnom ratio 1.056	

Results summary

Produced Energy 19.18 MWh/year	Specific production 908 kWh/kWp/year	Perf. Ratio PR 76.93 %
--------------------------------	--------------------------------------	------------------------

Table of contents

Project and results summary	2
General parameters, PV Array Characteristics, System losses	3
Main results	4
Loss diagram	5
Special graphs	6
CO ₂ Emission Balance	7



Project: FVE FEL

Variant: diplomka

PVsyst V7.1.7
 VCO, Simulation date:
 30/03/21 09:45
 with v7.1.7

General parameters

Grid-Connected System	No 3D scene defined, no shadings	
PV Field Orientation	Sheds configuration	Models used
Orientation	No 3D scene defined	Transposition Perez
Fixed plane		Diffuse Perez, Meteonom
Tilt/Azimuth 45 / -10 °		Circumsolar separate
Horizon	Near Shadings	User's needs
Free Horizon	No Shadings	Unlimited load (grid)

PV Array Characteristics

PV module	Inverter
Manufacturer Generic	Manufacturer Generic
Model L_110/24	Model SP 2500-450
(Original PVsyst database)	(Original PVsyst database)
Unit Nom. Power 110 Wp	Unit Nom. Power 2.50 kWac
Number of PV modules 192 units	Number of inverters 8 units
Nominal (STC) 21.12 kWp	Total power 20.0 kWac
Modules 24 Strings x 8 In series	Operating voltage 194-400 V
At operating cond. (50°C)	Pnom ratio (DC:AC) 1.08
Pmpp 19.02 kWp	
U mpp 249 V	
I mpp 76 A	
Total PV power	Total inverter power
Nominal (STC) 21 kWp	Total power 20 kWac
Total 192 modules	Nb. of inverters 8 units
Module area 164 m²	Pnom ratio 1.08
Cell area 145 m²	

Array losses

Thermal Loss factor	DC wiring losses	Module Quality Loss
Module temperature according to irradiance	Global array res. 55 mΩ	Loss Fraction 5.0 %
Uc (const) 20.0 W/m²K	Loss Fraction 1.5 % at STC	
Uv (wind) 0.0 W/m²K/m/s		
Module mismatch losses	Strings Mismatch loss	IAM loss factor
Loss Fraction 2.0 % at MPP	Loss Fraction 0.1 %	ASHRAE Param: IAM = 1 - bo(1/cos(i) - 1)
		bo Param. 0.05



Project: FVE FEL

Variant: diplomka

PVsyst V7.1.7

VC0. Simulation date:
30/03/21 09:45
with v7.1.7

Main results

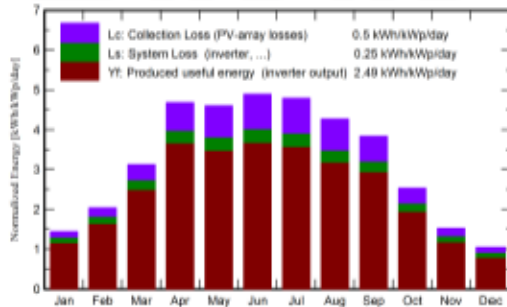
System Production
Produced Energy

19.18 MWh/year

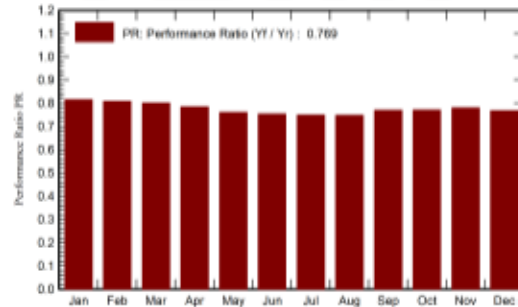
Specific production
Performance Ratio PR

908 kWh/kWp/year
78.93 %

Normalized productions (per installed kWp)



Performance Ratio PR



Balances and main results

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray MWh	E_Grid MWh	PR ratio
January	23.8	14.86	-0.83	44.6	43.7	0.858	0.768	0.814
February	37.7	22.65	0.79	57.1	55.8	1.081	0.974	0.808
March	73.5	41.66	3.81	96.9	94.5	1.800	1.638	0.801
April	126.3	64.31	9.06	140.4	136.6	2.529	2.325	0.784
May	149.4	80.52	14.04	142.5	138.0	2.503	2.285	0.759
June	158.7	86.27	16.79	146.6	142.1	2.552	2.332	0.753
July	157.2	85.36	18.51	148.5	144.0	2.568	2.347	0.748
August	129.5	71.40	18.45	132.3	128.2	2.288	2.089	0.748
September	93.3	50.33	13.45	114.9	112.0	2.041	1.866	0.769
October	53.5	28.06	8.95	78.6	76.6	1.417	1.279	0.770
November	26.6	16.80	3.89	45.6	44.6	0.849	0.752	0.780
December	17.1	10.81	-0.01	32.4	31.7	0.606	0.525	0.767
Year	1046.7	573.04	8.95	1180.5	1147.8	21.091	19.180	0.769

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

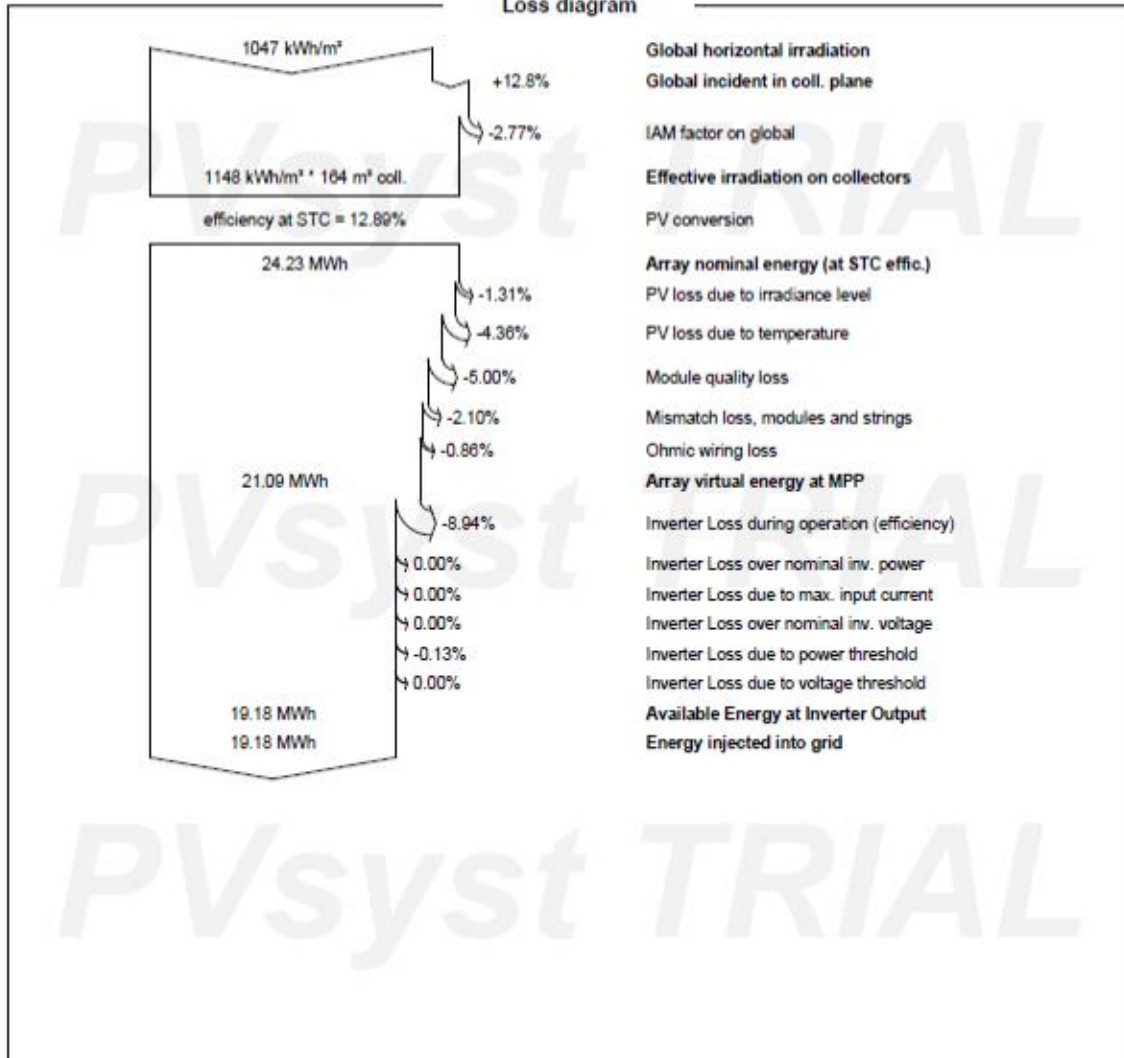


PVsyst V7.1.7
 VCO, Simulation date:
 30/03/21 09:45
 with v7.1.7

Project: FVE FEL

Variant: diplomka

Loss diagram

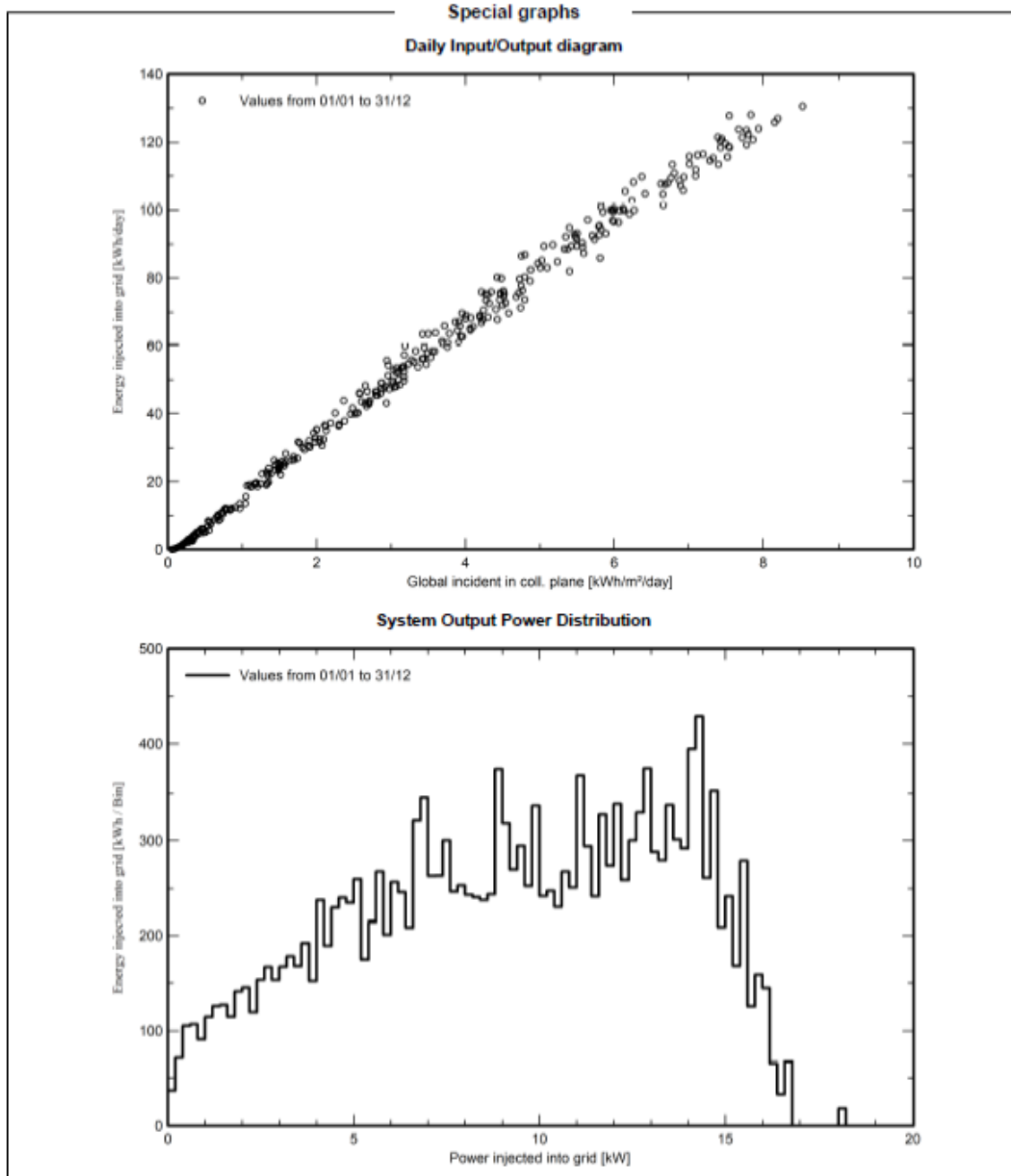




PVsyst V7.1.7
 VCO, Simulation date:
 30/03/21 09:45
 with v7.1.7

Project: FVE FEL

Variant: diplomka





Project: FVE FEL

Variant: diplomka

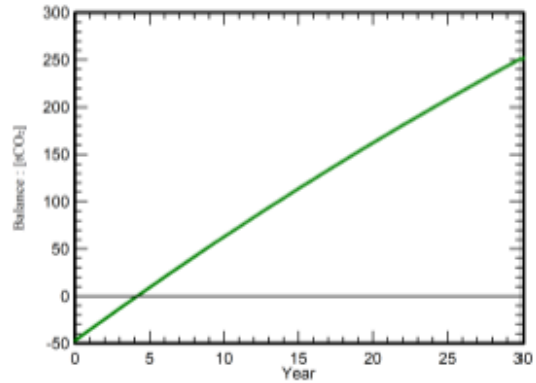
PVsyst V7.1.7

VCO, Simulation date:
30/03/21 09:45
with v7.1.7

CO₂ Emission Balance

Total: 252.0 tCO₂
Generated emissions
Total: 47.01 tCO₂
 Source: Detailed calculation from table below:
Replaced Emissions
Total: 344.7 tCO₂
 System production: 19.18 MWh/yr
 Grid Lifecycle Emissions: 599 gCO₂/kWh
 Source: IEA List
 Country: Czech Republic
 Lifetime: 30 years
 Annual degradation: 1.0 %

Saved CO₂ Emission vs. Time



System Lifecycle Emissions Details

Item	LCE	Quantity	Subtotal
			[kgCO ₂]
Modules	1713 kgCO ₂ /kWp	21.1 kWp	36173
Supports	4.00 kgCO ₂ /kg	1920 kg	7671
Inverters	396 kgCO ₂ /	8.00	3167

PVsyst TRIAL

PVsyst TRIAL

Příloha C



PVsyst V7.1.8
 VCO. Simulation date:
 06/04/21 09:50
 with v7.1.8

Project: DP FVE

Variant: Diplomka

General parameters

Grid-Connected System		No 3D scene defined, no shadings	
PV Field Orientation		Sheds configuration	Models used
Orientation		No 3D scene defined	Transposition Perez
Fixed plane			Diffuse Perez, Meteorom
Tilt/Azimuth	45 / -10 °		Circumsolar separate
Horizon	Near Shadings	User's needs	
Free Horizon	No Shadings	Unlimited load (grid)	

PV Array Characteristics

PV module		Inverter	
Manufacturer	Generic	Manufacturer	Generic
Model	L_110/24	Model	SP 2500-450
(Original PVsyst database)		(Original PVsyst database)	
Unit Nom. Power	110 Wp	Unit Nom. Power	2.50 kWac
Number of PV modules	192 units	Number of inverters	8 units
Nominal (STC)	21.12 kWp	Total power	20.0 kWac
Modules	24 Strings x 8 In series	Operating voltage	194-400 V
At operating cond. (50°C)		Pnom ratio (DC:AC)	
Pmpp	19.02 kWp	1.06	
U mpp	249 V		
I mpp	76 A		
Total PV power		Total inverter power	
Nominal (STC)	21 kWp	Total power	20 kWac
Total	192 modules	Nb. of inverters	8 units
Module area	164 m²	Pnom ratio	1.06
Cell area	145 m²		

Array losses

Thermal Loss factor		DC wiring losses		Module Quality Loss	
Module temperature according to irradiance		Global array res.	55 mΩ	Loss Fraction	5.0 %
Uc (const)	20.0 W/m²K	Loss Fraction	1.5 % at STC		
Uv (wind)	0.0 W/m²K/m/s				
Module mismatch losses		Strings Mismatch loss		Module average degradation	
Loss Fraction	2.0 % at MPP	Loss Fraction	0.1 %	Year no	1
				Loss factor	0.4 %/year
				Mismatch due to degradation	
				Imp RMS dispersion	0.4 %/year
				Vmp RMS dispersion	0.4 %/year
IAM loss factor					
ASHRAE Param: IAM = 1 - bo(1/cos(i) - 1)					
bo Param.		0.05			



Project: DP FVE

Variant: Diplomka

PVsyst V7.1.8

VCO, Simulation date:
06/04/21 09:50
with v7.1.8

Main results

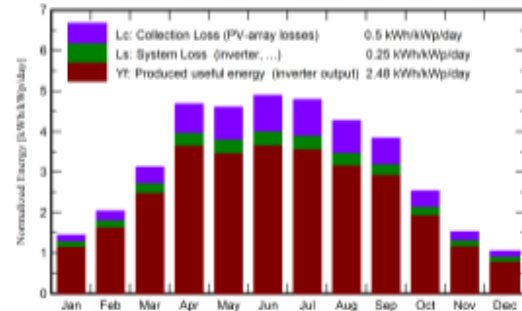
System Production

Produced Energy 19.14 MWh/year

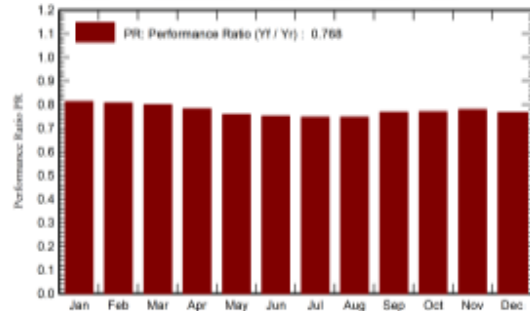
Specific production
Performance Ratio PR

906 kWh/kWp/year
78.76 %

Normalized productions (per installed kWp)



Performance Ratio PR



Balances and main results

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray MWh	E_Grid MWh	PR ratio
January	23.8	14.86	-0.83	44.6	43.7	0.857	0.766	0.813
February	37.7	22.65	0.79	57.1	55.8	1.079	0.972	0.807
March	73.5	41.66	3.81	96.9	94.5	1.797	1.635	0.799
April	126.3	64.31	9.06	140.4	136.6	2.523	2.320	0.782
May	149.4	80.52	14.04	142.5	138.0	2.498	2.280	0.758
June	158.7	86.27	16.79	146.6	142.1	2.546	2.327	0.751
July	157.2	85.36	18.51	148.5	144.0	2.562	2.341	0.747
August	129.5	71.40	18.45	132.3	128.2	2.283	2.084	0.746
September	93.3	50.33	13.45	114.9	112.0	2.037	1.862	0.767
October	53.5	28.06	8.95	78.6	76.6	1.414	1.276	0.769
November	26.6	16.80	3.89	45.6	44.6	0.847	0.751	0.778
December	17.1	10.81	-0.01	32.4	31.7	0.605	0.524	0.766
Year	1046.7	573.04	8.95	1180.5	1147.8	21.047	19.139	0.768

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



Project: DP FVE

Variant: Diplomka

PVsyst V7.1.8

VCO, Simulation date:
06/04/21 09:50
with v7.1.8

Aging Tool

Aging Parameters

Time span of simulation 20 years
Module average degradation Loss factor 0.4 %/year

Mismatch due to degradation

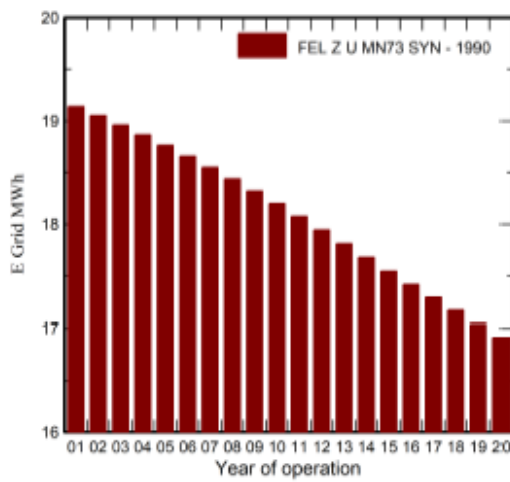
Imp RMS dispersion 0.4 %/year
Vmp RMS dispersion 0.4 %/year

Meteo used in the simulation

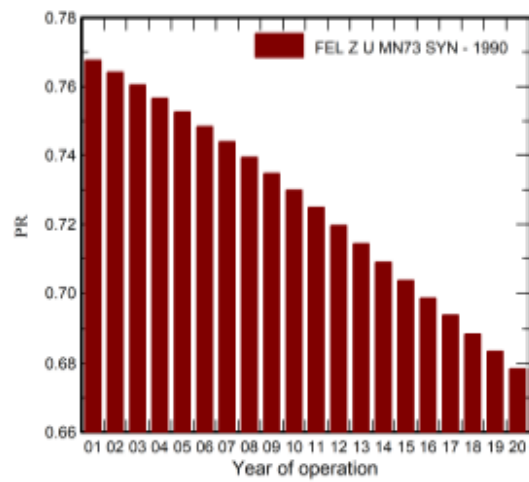
#1 FEL Z U MN73 SYN

Years 1990 (reference year)
Years simulated 1-20

Energy injected into grid



Performance Ratio





PVsyst V7.1.8
 VCO, Simulation date:
 06/04/21 09:50
 with v7.1.8

Project: DP FVE

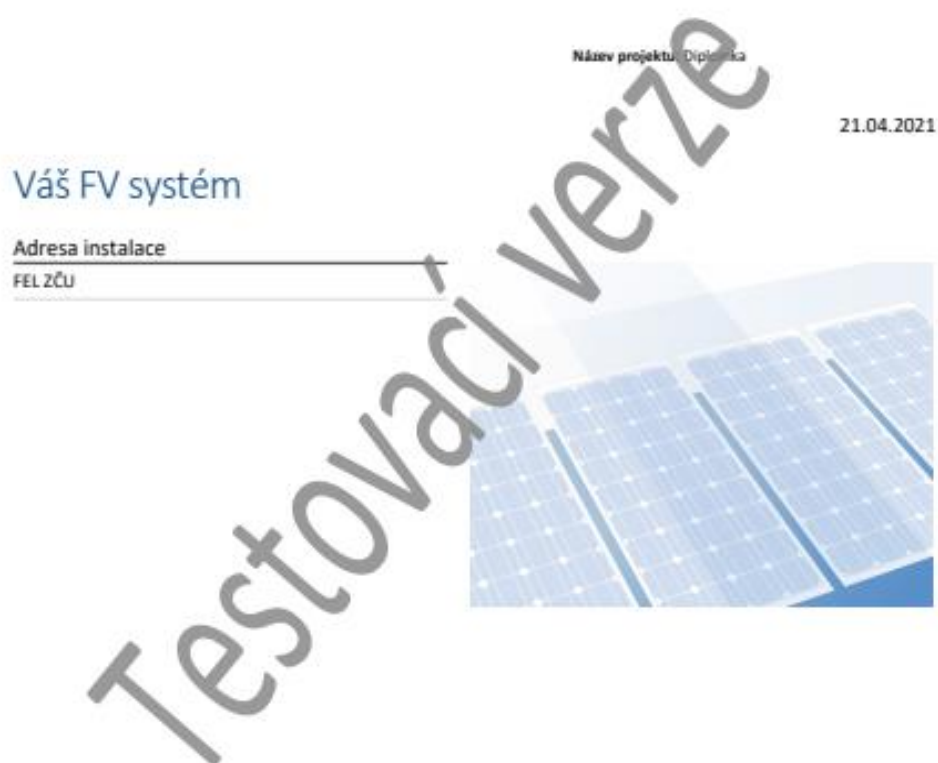
Variant: Diplomka

Aging Tool

FEL Z U MN73 SYN

Year	E Grid MWh	PR	PR loss %
1	19.14	0.768	0%
2	19.05	0.764	-0.5%
3	18.96	0.76	-0.9%
4	18.88	0.757	-1.4%
5	18.76	0.753	-2%
6	18.66	0.748	-2.5%
7	18.55	0.744	-3.1%
8	18.44	0.739	-3.7%
9	18.32	0.735	-4.3%
10	18.20	0.73	-4.9%
11	18.07	0.725	-5.6%
12	17.94	0.72	-6.3%
13	17.81	0.714	-7%
14	17.68	0.709	-7.6%
15	17.54	0.704	-8.3%
16	17.41	0.698	-9%
17	17.29	0.693	-9.7%
18	17.17	0.689	-10.3%
19	17.04	0.684	-11%
20	16.92	0.678	-11.6%

Příloha D



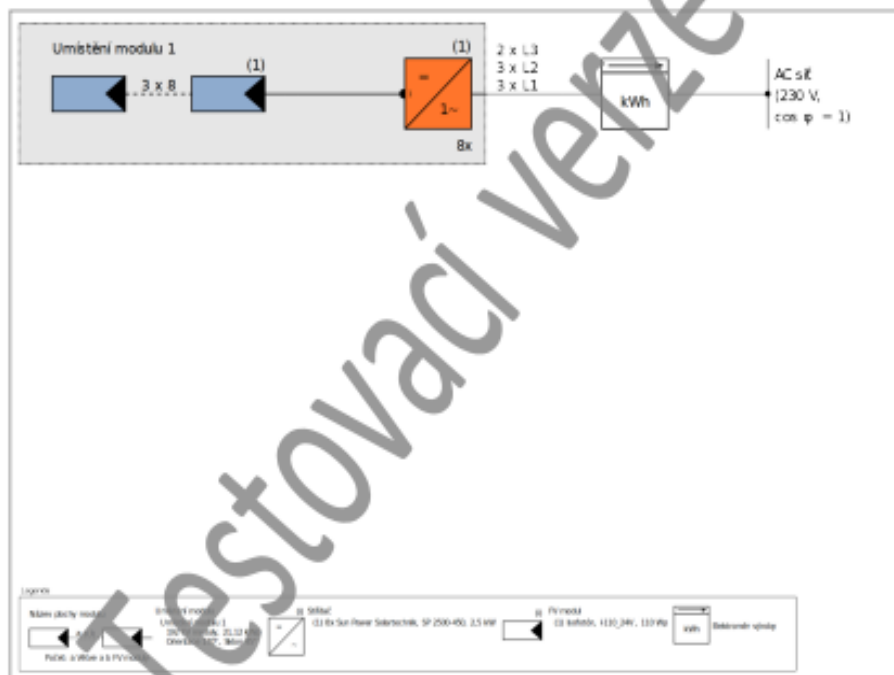
Diplomka

Přehled projektu

FV zařízení

FV zařízení připojené do sítě

Klimatická data	Plzeň, CZE (1991 - 2010)
Instalovaný výkon	21,12 kWp
Plocha FV modulů	164,5 m ²
Počet FV modulů	192
Počet měničů	8



Obrázek: Schéma zapojení

Diplomka

Roční výnos

Roční výnos	
Energetický výnos FVS (AC síť)	19 900 kWh
přívod mřížky	19 900 kWh
Ztráta energie omezením pletoků do síť	0 kWh
Podíl vlastní spotřeby	0,0 %
Podíl pokrytí solární energií	0,0 %
Spec. Roční výnos	940,74 kWh/kWp
Stupeň využití zařízení (PR)	79,9 %
Snížení emisí CO ₂	9 338 kg/rok

Výsledky byly zjištěny matematickým modelovým výpočtem firmy Valentin Software GmbH (algoritmy PV*SOL). Skutečné výnosy solární elektrárny se mohou lišit z důvodu vlivů počasí, stupně účinnosti modulů a méněžď a také jiných faktorů.



Diplomka

Konstrukce zařízení

Přehled

Data zařízení

Druh zařízení	FV zařízení připojené do sítě
Začátek provozu	01.01.2004

Klimatická data

Lokalita	Píseň, CZE (1991 - 2010)
Řešení dat	1 h
Použité simulační modely:	
- Difúzní záření na vodorovné rovině	Hofmann
- Ozařování na skloněnou plochu	Hay & Davies

Plochy modulů

1. Umístění modulu - Umístění modulu 1

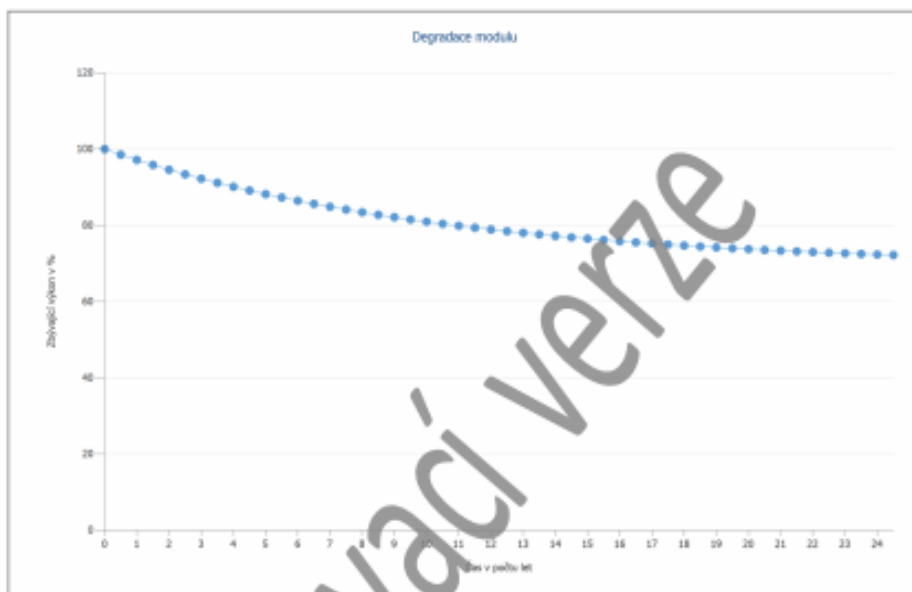
FV generátor, 1. Umístění modulu - Umístění modulu 1

Jméno	Umístění modulu 1
FV moduly	192 x I-110_24V (v1)
Výrobce	Isofotón
Sklon	45 °
Orientace	Již 170 °
Situace při vestavbě	Montáž na stojanech na střeše
Plocha FV modulů	164,5 m ²

Diplomka

Degradace modulu, 1. Umístění modulu - Umístění modulu 1

Zbývající výkon po 10 letech	81 %
Zbývající výkon po 25 letech	72 %



Obrázek: Degradace modulu, 1. Umístění modulu - Umístění modulu 1

Konfigurace měniče

Propojení stringů 1

Umístění modulu	Umístění modulu 1
Střídač 1	
Model	SP 2500-450 (v2)
Výrobce	Sun Power Solartechnik
Počet	8
Faktor dimenzování střídače	105,6 %
Propojení stringů	MPP 1: 3 x 8

AC síť

AC síť

Počet fází	3
Síťové napětí (jednofázové)	230 V
Účinnost (cos phi)	+/- 1



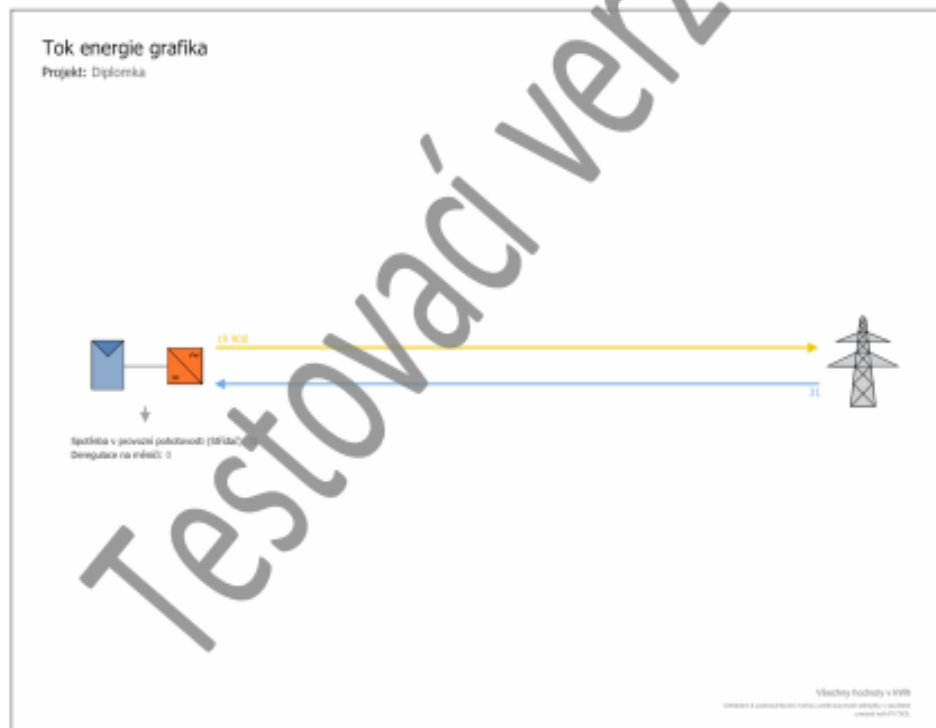
Diplomka

Výsledky simulace

Výsledky Celkové zařízení

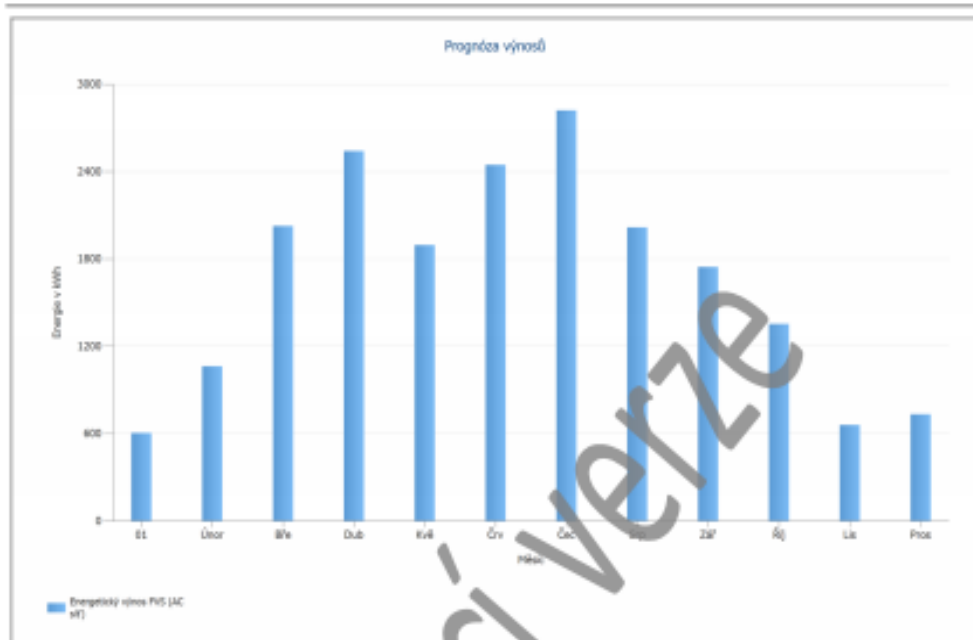
FV zařízení

Instalovaný výkon	21,1 kWp
Spec. Roční výnos	940,74 kWh/kWp
Stupeň využití zařízení (PR)	79,9 %
přívod mřížky	19 900 kWh/Rok
Síťové napájení v prvním roce (včetně degradace modulů)	19 600 kWh/Rok
Spotřeba v provozní pohotovosti (Střídač)	31 kWh/Rok
Snížení emisí CO ₂	9 338 kg/rok



Obrázek: Tok energie grafika

Diplomka



Obrázek: Prognóza výnosů

Diplomka

Energetická bilance FV zařízení

Energetická bilance FV zařízení

Globální záření horizontální	1 058,42 kWh/m²	
Odchylka od standardního spektra	-10,58 kWh/m ²	-1,00 %
Odraz od země (albedo)	30,69 kWh/m ²	2,93 %
Vyrovnnání a sklon úrovně modulu	84,60 kWh/m ²	7,84 %
Odstinění, zaclonění	0,00 kWh/m ²	0,00 %
Odraz na povrchu modulu	-51,18 kWh/m ²	-4,40 %
Globální záření na modul	1 111,95 kWh/m²	
	1 111,95 kWh/m ²	
	x 14,49 m ²	
	= 162 909,50 kWh	
FV globální záření	162 909,50 kWh	
Znečištění	0,00 kWh	0,00 %
STC konverze (stupeň jmenovitého výkonu modulu 13 %)	-159 131,18 kWh	-87,00 %
FV jmenovitá energie	29 778,32 kWh	
Chování ve slabém světle	-455,85 kWh	-1,92 %
Odchylka od jmenovité teploty modulu	-382,84 kWh	-1,64 %
Diody	-114,70 kWh	-0,50 %
Nesrovnalost (údaje výrobce)	-456,50 kWh	-2,00 %
Nesrovnalost (zapojení/odstinění)	-0,09 kWh	0,00 %
Kabel propojení do série	-49,02 kWh	-0,22 %
DC vedení	-57,55 kWh	-0,26 %
FV energie (DC) bez sestupné regulace měničem	22 261,78 kWh	
Pokles pod výchozí výkon DC	-40,07 kWh	-0,18 %
Sestupná regulace z důvodu napěťového rozsahu MPP	0,00 kWh	0,00 %
Sestupná regulace z důvodu max. DC proudu	0,00 kWh	0,00 %
Sestupná regulace z důvodu max. DC výkonu	0,00 kWh	0,00 %
Sestupná regulace z důvodu max. AC výkonu/cos phi	0,00 kWh	0,00 %
Přizpůsobení MPP	-222,22 kWh	-1,00 %
FV energie (DC)	21 999,49 kWh	
Energie na vstupu Wp	21 999,49 kWh	
Odchylka vstupního od jmenovitého napětí	-378,76 kWh	-1,72 %
DC/AC převod	-1 708,24 kWh	-7,90 %
Spotřeba v provozní pohotovosti (Střídač)	-31,01 kWh	-0,16 %
AC kabely	-12,96 kWh	-0,07 %
FV energie (AC) bez pohotovostní spotřeby	19 868,52 kWh	
Energetický výnos FVS (AC síť)	19 899,53 kWh	

Příloha E



Version 7.1.8

PVsyst - Simulation report

Grid-Connected System

Project: 2010

Variant: diplomka

No 3D scene defined, no shadings

System power: 21.12 kWp

Data2010 - Czech Republic

PVsyst TRIAL

PVsyst TRIAL

PVsyst TRIAL

| Author



PVsyst V7.1.8
 VC3, Simulation date:
 14/04/21 09:39
 with v7.1.8

Project: 2010

Variant: diplomka

Project summary

Geographical Site Data2010 Czech Republic	Situation Latitude 49.72 °N Longitude 13.35 °E Altitude 0 m Time zone UTC	Project settings Albedo 0.20
Meteo data Data2010 data2010 - Synthetic		

System summary

Grid-Connected System Simulation for year no 6	No 3D scene defined, no shadings	
PV Field Orientation Fixed plane Tilt/Azimuth 45 / -10 °	Near Shadings No Shadings	User's needs Unlimited load (grid)
System information		
PV Array	Inverters	
Nb. of modules 192 units	Nb. of units 8 units	
Pnom total 21.12 kWp	Pnom total 20.00 kWac	
	Pnom ratio 1.056	

Results summary

Produced Energy 20.89 MWh/year	Specific production 989 kWh/kWp/year	Perf. Ratio PR 82.86 %
--------------------------------	--------------------------------------	------------------------

Table of contents

Project and results summary	2
General parameters, PV Array Characteristics, System losses	3
Main results	4
Loss diagram	5
Special graphs	6
CO ₂ Emission Balance	7



PVsyst V7.1.8
 VC3, Simulation date:
 14/04/21 09:39
 with v7.1.8

Project: 2010

Variant: diplomka

General parameters

Grid-Connected System	No 3D scene defined, no shadings	
PV Field Orientation	Sheds configuration	Models used
Orientation	No 3D scene defined	Transposition Perez
Fixed plane		Diffuse Perez, Meteonom
Tilt/Azimuth 45 / -10 °		Circumsolar separate
Horizon	Near Shadings	User's needs
Free Horizon	No Shadings	Unlimited load (grid)

PV Array Characteristics

PV module	Generic	Inverter	Generic
Manufacturer		Manufacturer	
Model	I_110/24	Model	SP 2500-450
(Original PVsyst database)		(Original PVsyst database)	
Unit Nom. Power	110 Wp	Unit Nom. Power	2.50 kWac
Number of PV modules	192 units	Number of inverters	8 units
Nominal (STC)	21.12 kWp	Total power	20.0 kWac
Modules	24 Strings x 8 In series	Operating voltage	194-400 V
At operating cond. (50°C)		Pnom ratio (DC:AC)	1.06
Pmpp	19.02 kWp		
U mpp	249 V		
I mpp	76 A		
Total PV power		Total inverter power	
Nominal (STC)	21 kWp	Total power	20 kWac
Total	192 modules	Nb. of inverters	8 units
Module area	164 m ²	Pnom ratio	1.06
Cell area	145 m ²		

Array losses

Thermal Loss factor	DC wiring losses	Module Quality Loss
Module temperature according to irradiance	Global array res. 40 mΩ	Loss Fraction 0.0 %
Uc (const) 22.0 W/m ² K	Loss Fraction 1.1 % at STC	
Uv (wind) 4.0 W/m ² K/m/s		
Module mismatch losses	Strings Mismatch loss	Module average degradation
Loss Fraction 1.0 % at MPP	Loss Fraction 0.1 %	Year no 6
		Loss factor 0.4 %/year
		Mismatch due to degradation
		Imp RMS dispersion 0.4 %/year
		Vmp RMS dispersion 0.4 %/year
IAM loss factor		
ASHRAE Param: IAM = 1 - bo/(1/cos ² - 1)		
bo Param. 0.05		



PVsyst V7.1.8
 VC3, Simulation date:
 14/04/21 09:39
 with v7.1.8

Project: 2010

Variant: diplomka

Main results

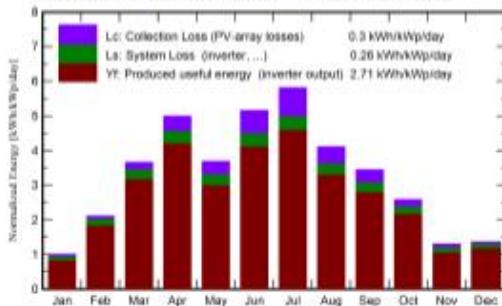
System Production
 Produced Energy

20.89 MWh/year

Specific production
 Performance Ratio PR

989 kWh/kWp/year
 82.86 %

Normalized productions (per installed kWp)



Performance Ratio PR



Balances and main results

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray MWh	E_Grid MWh	PR ratio
January	18.9	13.81	-3.10	30.9	30.2	0.633	0.552	0.845
February	38.5	25.80	-0.40	59.0	57.6	1.211	1.099	0.882
March	84.8	46.91	4.60	113.4	110.7	2.272	2.089	0.872
April	133.5	66.56	10.00	149.8	145.8	2.902	2.677	0.846
May	118.5	75.14	12.50	114.1	110.7	2.185	1.978	0.821
June	166.2	80.99	18.10	154.6	150.0	2.861	2.620	0.802
July	187.9	77.75	22.00	180.1	174.6	3.281	3.018	0.794
August	123.4	67.63	17.70	127.4	123.6	2.386	2.177	0.809
September	86.5	47.22	12.20	103.3	100.6	1.962	1.786	0.819
October	56.1	34.29	7.10	80.0	78.1	1.578	1.435	0.849
November	24.3	16.97	5.20	39.0	38.1	0.772	0.678	0.823
December	20.3	12.68	-4.10	42.1	41.2	0.869	0.781	0.878
Year	1058.9	565.74	8.52	1193.7	1161.2	22.912	20.888	0.829

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

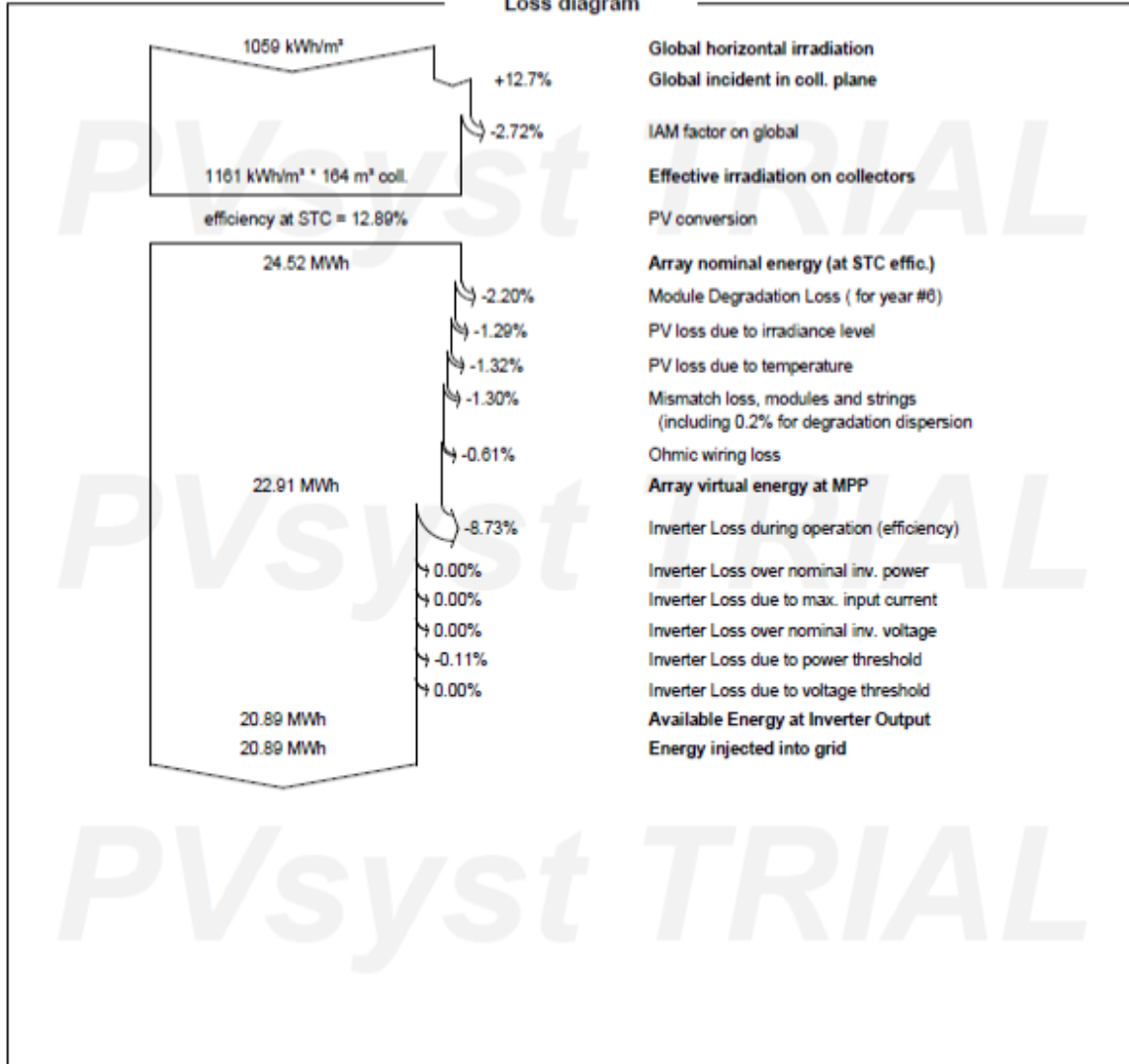


PVsyst V7.1.8
 VC3, Simulation date:
 14/04/21 09:39
 with v7.1.8

Project: 2010

Variant: diplomka

Loss diagram





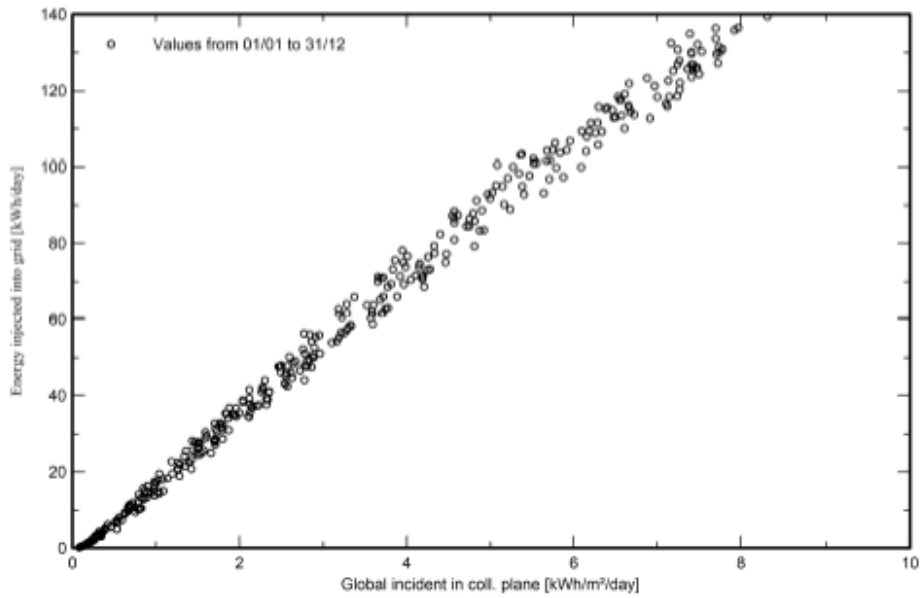
PVsyst V7.1.8
VC3, Simulation date:
14/04/21 09:39
with v7.1.8

Project: 2010

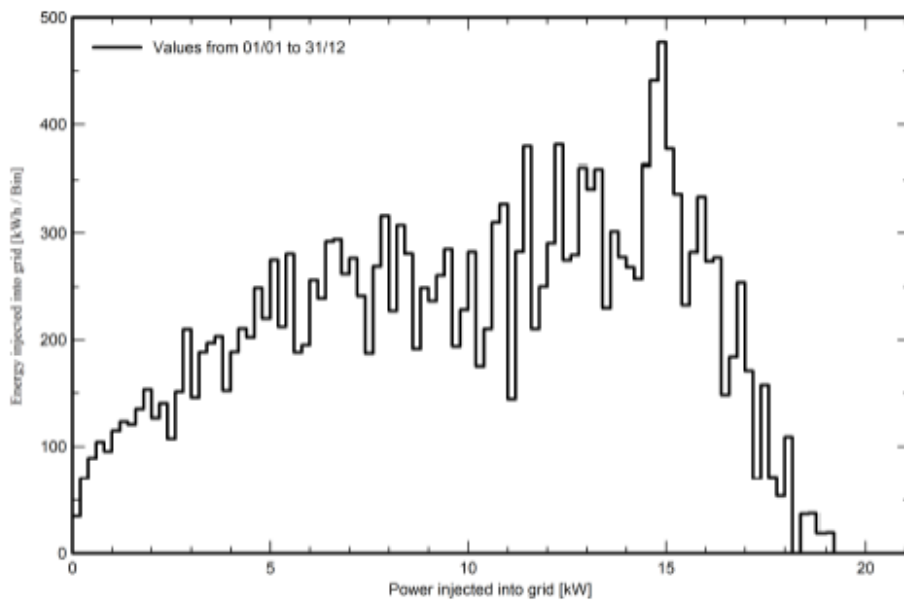
Variant: diplomka

Special graphs

Daily Input/Output diagram



System Output Power Distribution





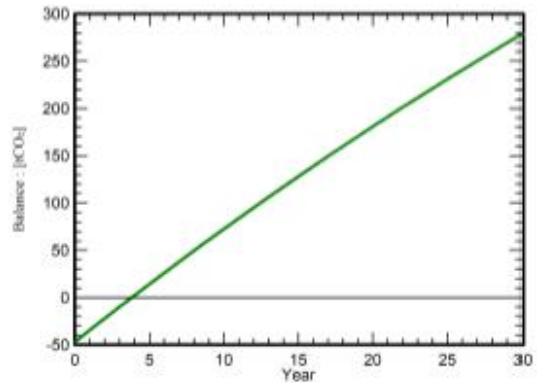
PVsyst V7.1.8
 VC3, Simulation date:
 14/04/21 09:39
 with v7.1.8

Project: 2010
 Variant: diplomka

CO₂ Emission Balance

Total: 278.7 tCO₂
Generated emissions
Total: 47.01 tCO₂
 Source: Detailed calculation from table below:
Replaced Emissions
Total: 375.4 tCO₂
 System production: 20.89 MWh/yr
 Grid Lifecycle Emissions: 599 gCO₂/kWh
 Source: IEA List
 Country: Czech Republic
 Lifetime: 30 years
 Annual degradation: 1.0 %

Saved CO₂ Emission vs. Time



System Lifecycle Emissions Details

Item	LCE	Quantity	Subtotal
			[kgCO ₂]
Modules	1713 kgCO ₂ /kWp	21.1 kWp	36173
Supports	4.00 kgCO ₂ /kg	1920 kg	7671
Inverters	396 kgCO ₂ /	8.00	3167