



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

## PROVOZNÍ DIAGNOSTIKA FVE

OPERATING DIAGNOSTICS OF PVP

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Kryštof Prášil

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Mastný, Ph.D.

BRNO 2020

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

**Student:** Kryštof Prášil

**ID:** 203326

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2019/20

**NÁZEV TÉMATU:**

## Provozní diagnostika FVE

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Seznamte se s legislativou pro kontrolu provozních parametrů a diagnostiku FV systémů.
2. V souladu s legislativou proveďte diagnostiku FVE a navrhnete optimalizaci postupů.
3. Na základě provedených měření navrhnete optimalizaci jednotlivých částí diagnostikovaného systému.
4. Pro navržená opatření proveďte energeticko-ekonomickou analýzu.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 3.2.2020

**Termín odevzdání:** 10.6.2020

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Petr Mastný, Ph.D.

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.



Bibliografická citace práce:

PRÁŠIL, KRYŠTOF. PROVOZNÍ DIAGNOSTIKA FVE [ONLINE]. BRNO, 2020 [CIT. 2020-06-10]. DOSTUPNÉ Z: [HTTPS://WWW.VUTBR.CZ/STUDENTI/ZAV-PRACE/DETAIL/127270](https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/127270). BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ, ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY. VEDOUČÍ PRÁCE PETR MASTNÝ.

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Provozní diagnostika FVE jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne: 10. 6. 2020

.....

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce pojednává o problematice fotovoltaických elektráren a to především jejich provozní diagnostiky a způsobu provedení této diagnostiky.

V úvodu práce je vysvětlen princip funkce FV článků a je popsán postup výroby těchto článků. Dále jsou zde zmíněny způsoby výroby jednotlivých komponent pro sestavení FV panelu.

V další části jsou vyjmenovány jednotlivé komponenty FV elektrárny a popis jejich funkce v celém systému. Zároveň jsou popsány způsoby zapojení FV systému.

Ve třetí kapitole nahlédneme na možné defekty, které ovlivňují výkon FV systémů a snižují jejich ekonomickou výnosnost. Přiblížíme si defekty jak celých FV systémů tak jednotlivých panelů a komponent.

Následující kapitola je zaměřena na vysvětlení jednotlivých veličin, které souvisí s FV elektrárnami a o čem tyto veličiny vypovídají.

Pátá kapitola se věnuje obsahu normy ČSN EN 62446.

Předposlední kapitola se týká samotné diagnostiky FV systému, praktických zkoušek a zhodnocení výsledků těchto zkoušek. Dále jsou zde zmíněny možnosti optimalizace systému pro zvýšení výroby elektřiny.

V poslední kapitole je provedena energeticko-ekonomická analýza zkoumaného systému.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** FV elektrárna, FV systém, FV panel, FV článek, diagnostika FVE

## **ABSTRACT**

The bachelor thesis deals with the issue of photovoltaic power plants, especially their operational diagnostics and how to perform this diagnostics.

The introduction of the work explains the principle of function of PV cells and describes the procedure for manufacturing these cells. Furthermore, there are mentioned methods of manufacturing individual components for assembling a PV panel.

The next part lists the individual components of the PV power plant and describes their function in the entire system. At the same time, the connection methods of the PV plant are described.

In the third part, we look at possible defects that affect the performance of PV systems and reduce their economic profitability. We will explain the defects of both the entire PV power plant and the individual panels and components.

The following chapter is focused on explanation of individual variables related to PV power plants and what these variables are about.

The fifth chapter deals with the content of the standard ČSN EN 62446.

The penultimate chapter concerns the diagnostics of the PV system itself, practical tests and evaluation of the results of these tests. Furthermore, the possibilities of optimizing the system to increase electricity production are mentioned here.

In the last chapter, an energy-economic analysis of the investigated system is performed.

**KEY WORDS:** PV power plant; PV system; PV panel; PV cell; PV power plant diagnostics

## OBSAH

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>9</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>10</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>11</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>12</b>
<b>1 CHARAKTERISTIKA FOTOVOLTAICKÉHO ČLÁNKU .....</b>	<b>13</b>
<b>1.1 PRINCIP FUNKCE FV ČLÁNKU .....</b>	<b>13</b>
<b>1.2 ZÁKLADNÍ DĚLENÍ FV ČLÁNKŮ .....</b>	<b>14</b>
<b>1.3 VÝROBA KOMPONENT KŘEMÍKOVÝCH FV PANELŮ .....</b>	<b>14</b>
1.3.1 VÝROBA FV ČLÁNKŮ.....	14
1.3.2 VÝROBA FV ČLÁNKŮ.....	15
1.3.3 VÝROBA SKLA.....	16
1.3.4 VÝROBA HLINÍKU .....	16
1.3.5 VÝROBA EVA FÓLIE A LAMINÁTU .....	16
<b>1.4 VÝROBA KŘEMÍKOVÝCH FV PANELŮ .....</b>	<b>16</b>
<b>2 FV SYSTÉMY OBECNĚ .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1 KOMPONENTY FV SYSTÉMŮ .....</b>	<b>18</b>
2.1.1 FV PANELE .....	18
2.1.2 MĚNIČ/STRÍDAČ .....	18
2.1.3 AKUMULÁTORY .....	18
2.1.4 REGULÁTOR .....	18
2.1.5 NOSNÁ KONSTRUKCE.....	18
<b>2.2 DĚLENÍ FV SYSTÉMŮ PODLE NAPOJENÍ NA SÍŤ .....</b>	<b>19</b>
2.2.1 OFF-GRID FV SYSTÉMY .....	19
2.2.2 ON-GRID FV SYSTÉMY .....	19
2.2.3 HYBRIDNÍ FV SYSTÉMY.....	19
<b>3 POŠKOZENÍ FV SYSTÉMŮ.....</b>	<b>20</b>
<b>3.1 DEFEKTY FV ČLÁNKŮ .....</b>	<b>20</b>
3.1.1 MATERIÁLOVÉ DEFEKTY .....	20
3.1.2 MECHANICKÉ DEFEKTY .....	21
<b>3.2 DEFEKTY FV PANELŮ .....</b>	<b>21</b>
3.2.1 DEGRADACE DOPADAJÍCÍM ZÁŘENÍM .....	21
3.2.2 POTENCIÁLNÍ INDUKOVANÁ DEGRADACE .....	21
3.2.3 DELAMINACE FV PANELU .....	21
3.2.4 PRORAŽENÍ BY-PASS DIODY .....	22
3.2.5 ŠNEČÍ CESTIČKY (SNAIL TRAILS) .....	22
3.2.6 HOT SPOT .....	23
<b>3.3 DEFEKTY OSTATNÍCH KOMPONENT FV SYSTÉMU .....</b>	<b>23</b>
3.3.1 KABELÁŽ .....	23
3.3.2 MĚNIČE .....	23

---

3.3.3 NOSNÁ KONSTRUKCE.....	23
<b>4 PARAMETRY FV PANELŮ .....</b>	<b>25</b>
<b>4.1 VOLTAMPÉROVÁ CHARAKTERISTIKA PANELU .....</b>	<b>25</b>
4.1.1 PRACOVNÍ BOD .....	25
4.1.2 NAPĚTÍ NAPRÁZDNO $U_{oc}$ .....	25
4.1.3 PROUD NAKRÁTKO $I_{sc}$ .....	25
4.1.4 MPP – BOD MAXIMÁLNÍHO VÝKONU .....	26
<b>4.2 FILL FACTOR .....</b>	<b>26</b>
<b>4.3 ÚČINNOST FV PANELU.....</b>	<b>26</b>
<b>4.4 SÉRIOVÝ A PARALELNÍ ODPOR FV PANELU .....</b>	<b>26</b>
<b>5 PROVOZNÍ DIAGNOSTIKA FVE.....</b>	<b>27</b>
<b>5.1 DEFINICE POJMŮ .....</b>	<b>27</b>
<b>5.2 MINIMÁLNÍ POŽADAVKY NA DOKUMENTACI SYSTÉMU.....</b>	<b>27</b>
5.2.1 ZÁKLADNÍ INFORMACE O SYSTÉMU.....	27
5.2.2 SCHÉMA ZAPOJENÍ .....	27
5.2.3 INFORMACE O OBSLUZE A ÚDRŽBĚ .....	27
5.2.4 OSTATNÍ INFORMACE.....	28
<b>5.3 PROHLÍDKA FVE.....</b>	<b>28</b>
<b>5.4 ZKOUŠKA FVE .....</b>	<b>28</b>
5.4.1 MĚŘENÍ NAPRÁZDNO .....	28
5.4.2 MĚŘENÍ NAKRÁTKO .....	29
5.4.3 MĚŘENÍ IZOLAČNÍHO ODPORU .....	29
5.4.4 MĚŘENÍ VA CHARAKTERISTIKY .....	29
5.4.5 INSPEKCE INFRAČERVENOU KAMEROU.....	29
5.4.6 INTERPRETACE NAMĚŘENÉ VA CHARAKTERISTIKY .....	29
<b>6 PROVEDENÍ PROVOZNÍ DIAGNOSTIKY FVE.....</b>	<b>30</b>
<b>6.1 SEZNÁMENÍ S DIAGNOSTIKOVANÝM OBJEKTEM.....</b>	<b>30</b>
<b>6.2 VIZUÁLNÍ PROHLÍDKA .....</b>	<b>31</b>
<b>6.3 ZKOUŠKA PV POLE .....</b>	<b>31</b>
6.3.1 ZKOUŠKA PRVNÍHO STRINGU .....	31
6.3.2 ZKOUŠKA DRUHÉHO STRINGU .....	32
6.3.3 ZKOUŠKA TŘETÍHO STRINGU .....	33
<b>6.4 ZHODNOCENÍ ÚČINNOSTI SYSTÉMU .....</b>	<b>34</b>
<b>6.5 MOŽNOSTI OPTIMALIZACE SYSTÉMU .....</b>	<b>35</b>
<b>7 ENERGETICKO-EKONOMICKÁ ANALÝZA SYSTÉMU .....</b>	<b>37</b>
<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>39</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>40</b>

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

<i>Obr. 1.1-1 PN přechod fotovoltaického článku [1]</i>	13
<i>Obr. 1.1-2 Princip činnosti FV článku [2]</i>	14
<i>Obr. 1.4-1 Řez FV panelem [3]</i>	17
<i>Obr. 3.1-1 Porovnání dvou FV článků, Sample A#) FV článek bez vírového defektu, Sample B#) FV článek postižený vírovým defektem [18]</i>	20
<i>Obr. 3.2-1 Detail FV panelu poškozeného delaminací [25]</i>	22
<i>Obr. 3.2-2 Proražená by-pass dioda [24]</i>	22
<i>Obr. 3.2-3 Vzniklé šnečí cestičky na panelu [29]</i>	23
<i>Obr. 3.3-1 Necertifikovaný držák podléhající korozi [24]</i>	24
<i>Obr. 4.1-1 Voltampérová charakteristika FV panelu [20]</i>	25
<i>Obr. 6.1-1 Záběr FV pole na střeše budovy</i>	30
<i>Obr. 6.1-2 Letecký pohled na budovu [30]</i>	30
<i>Obr. 6.1-3 Schéma zapojení systému</i>	31
<i>Obr. 6.3-1 Naměřená VA charakteristika prvního stringu (vlevo) a VA charakteristika od výrobce (vpravo)</i>	32
<i>Obr. 6.3-2 Naměřená VA charakteristika druhého stringu (vlevo) a VA charakteristika od výrobce (vpravo)</i>	33
<i>Obr. 6.3-3 Naměřená VA charakteristika třetího stringu (vlevo) a VA charakteristika od výrobce (vpravo)</i>	34
<i>Obr. 6.4-1 Prostředí webu PVGIS [31]</i>	35
<i>Obr. 6.5-2 Průběhy proudu a napětí na jednotlivých měničích BlueSolar. Vlevo string 3, vpravo stringy 1 a 2</i>	35
<i>Obr. 7.1-1 Záznam o spotřebě energie získaný ze zařízení Smappee z roku 2019</i>	38

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 6.3-1 Naměřené hodnoty izolačního odporu prvního stringu</i>	31
<i>Tab. 6.3-2 Okolní podmínky při měření prvního stringu a vybrané hodnoty z VA charakteristiky</i>	32
<i>Tab. 6.3-3 Naměřené hodnoty izolačního odporu druhého stringu</i>	32
<i>Tab. 6.3-4 Okolní podmínky při měření druhého stringu a vybrané hodnoty z VA charakteristiky</i>	33
<i>Tab. 6.3-5 Naměřené hodnoty izolačního odporu třetího stringu</i>	33
<i>Tab. 6.3-6 Okolní podmínky při měření třetího stringu a vybrané hodnoty z VA charakteristiky</i>	33
<i>Tab. 7.1-1 Spotřeba elektřiny od dodavatele za jednotlivé zúčtovací období</i>	37
<i>Tab. 7.1-2 Spotřeba elektřiny v jednotlivých měsících v roce 2019</i>	38

**SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$FF$	Fill factor [-]
$U_{OC}$	Napětí naprázdno [V]
$I_{SC}$	Proud nakrátko [A]
$U_m$	Napětí při maximálním výkonu z panelu [V]
$I_m$	Proud při maximálním výkonu z panelu [A]
$\eta$	Účinnost FV panelu [-]
$P_m$	Maximální výkon z FV panelu [W]
$P_{rad}$	Výkon záření dopadajícího na FV panel [W]
$E$	Intenzita osvětlení [lx]
$A_p$	Plocha FV panelu [m <sup>2</sup> ]
$R_{OC+}$	Izolační odpor kladného pólu vůči zemi [ $\Omega$ ]
$R_{OC-}$	Izolační odpor záporného pólu vůči zemi [ $\Omega$ ]
$I_{rr}$	Intenzita záření [W/m <sup>2</sup> ]
$P_{OUT}$	Výstupní výkon z měniče [kWh]
$E_{rr}$	Energie dopadajícího záření [kWh/m <sup>2</sup> ]
$S_P$	Plocha instalovaných solárních panelů [m <sup>2</sup> ]
$T$	Doba návratnosti investice do systému [let]
$IN$	Vstupní investice do systému [Kč]
$V$	Roční výnosy z provozu systému [Kč]

## ÚVOD

V dnešní době si neumíme představit život bez elektrické energie. Používáme ji denně a skoro všude. Proto je výroba elektrické energie stále se rozvíjející obor, který se snaží najít efektivnější, čistější (ekologičtější) a ekonomičtější technologie pro výrobu elektrické energie, nebo alespoň vylepšit parametry stávajících technologií pro výrobu elektrické energie.

Většina elektrické energie vyrábí z neobnovitelných zdrojů jako jsou fosilní paliva a štěpné materiály. Neobnovitelné se nazývají proto, že jich máme omezené množství a nejsme schopni si je v dohledné době vyrobit. Nevýhoda získávání elektrické energie z těchto zdrojů je vysoké zatížení a znečištění životního prostředí, případně problémy s vzniklými odpady z výroby elektrické energie.

Jedno z řešení pro získávání čistější energie jsou obnovitelné zdroje energie. Mezi tyto zdroje patří vodní elektrárny, solární elektrárny, elektrárny spalující bioplyn nebo biomasu a fotovoltaické elektrárny. Jejich obrovskou výhodou je čistá energie (vodní a ze slunce), případně schopnost lidstva si stabilně obstarávat palivo (biomasa). Fotovoltaické elektrárny jsou v poslední době hodně probíraným tématem, kvůli jejich rozšiřování, které způsobuje jistou nestabilitu v síti (jejich výkon je závislý na intenzitě slunečního záření).

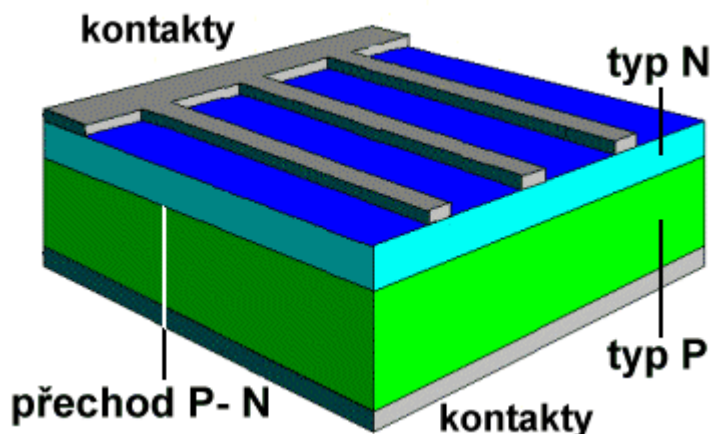
Při návrhu a realizaci fotovoltaické elektrárny je třeba vzít v úvahu několik věcí, především kolik energie jsme schopni vyrobit z daného instalovaného výkonu. Při realizaci se řeší uspořádání, sklon a zapojení fotovoltaických panelů. Během provozu elektrárny panely postupně stárnou a ztrácí svůj výkon. Může se také stát, že se projeví vady výrobní, vady vzniklé chybnou instalací, špatným návrhem nebo jsou některé prvky elektrárny poškozeny vnějšími vlivy. Všechny tyto okolnosti mají vliv na výsledný výkon elektrárny a proto se pravidelně provádí provozní diagnostika elektrárny, pro odhalení těchto defektů, které snižují možný výkon elektrárny a tím snižují ekonomickou i energetickou výnosnost celého systému.

# 1 CHARAKTERISTIKA FOTOVOLTAICKÉHO ČLÁNKU

FV článek je základní prvek FV elektráren. V této kapitole si popíšeme princip funkce a řekneme si něco k výrobě tohoto článku.

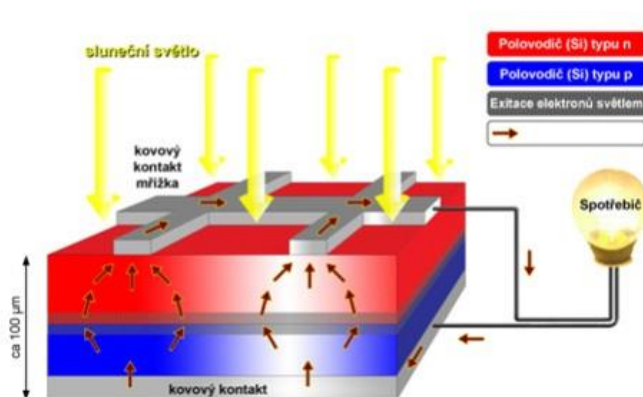
## 1.1 Princip funkce FV článku

FV článek přímo přeměňuje sluneční záření na elektřinu. Elementární část FV článku je tvořena PN přechodem o velké ploše. PN přechod se skládá ze dvou polovodičů, jeden typu P a druhý typu N. Mezi nimi je elektrická bariéra, která nepropouští elektrony směrem z N do P, ale naopak prochází po přiložení jistého napětí, které je závislé na typu přechodu. Vrstva polovodiče typu N bývá velmi tenká. Pod touto vrstvou se nachází vrstva polovodiče typu P, která je hrubší. V nejvíce rozšířených panelech se používá pro oba polovodiče křemík. Na obě vrstvy jsou přivedeny kovové kontakty pro vedení elektronů. Kontakty na vrstvě polovodiče typu N jsou konstruovány tak, aby zabíraly co nejmenší plochu a propouštěly světlo na PN přechod. Znázornění PN přechodu si můžeme všimnout na Obr. 1.1-1 [1][2].



Obr. 1.1-1 PN přechod fotovoltaického článku [1]

Pokud na přechod dopadá světlo, tak při dopadu fotonu s energií alespoň 1,12 eV na tenkou vrstvu polovodiče typu N, dochází k uvolnění elektronu. Část záření projde skrz vrstvu typu N a je zachycena na vrstvě polovodiče typu P, kde také uvolňuje elektrony a tím vytváří díry. Uvolněné elektrony následně prostupují elektrickou bariérou a jsou zachyceny ve vrstvě typu N. To má za následek hromadění elektronů ve vrstvě typu N a děr ve vrstvě typu P. Pokud uzavřeme obvod propojením kontaktů obou vrstev, například přes spotřebič, začne obvodem procházet proud (elektrony nahromaděné ve vrstvě typu N se začnou obvodem přesouvat a zaplňovat díry ve vrstvě typu P). Na Obr. 1.1-2 je znázorněn princip funkce FV článku [1][2].



Obr. 2.1-2 Princip činnosti FV článku [2]

## 1.2 Základní dělení FV článků

Většina dnes vyráběných FV článků je vyráběna z křemíku. Tyto panely se dále dělí na monokrystalické a polykrystalické. Monokrystalické panely mají jednotlivé články vyrobené z jednoho monokrystalu křemíku, který je nařezán na tenké plátky. Polykrystalické panely mají jednotlivé články vyrobené z křemíku, který se skládá z několika spojených krystalů. Monokrystalické panely mají oproti polykrystalickým vyšší účinnost z důvodu lepší vodivosti monokrystalu. Malé zastoupení mají ještě panely z amorfního křemíku, které mají nižší účinnost, ale jsou schopny zachytávat difuzní záření. Toto záření vzniká při průchodu světla skrze mraky, to znamená, že panely mají dobrý výkon i když je zataženo [2].

Dále ještě existují panely na bázi GaAs a jiné speciální panely, které se používají pro aplikace, kde je potřeba vyšší účinnosti, například panely na družicích ve vesmíru. Tyto panely ovšem nejsou hojně rozšířené, protože mají vysoké pořizovací náklady [3].

## 1.3 Výroba komponent křemíkových FV panelů

Fotovoltaický panel jako celek se skládá z několika komponent, kde každá má jiný způsob výroby. Základní stavební prvek panelu je polovodičový přechod vyráběný nejčastěji z křemíku. Tento přechod musí být izolován od okolí, aby byl chráněn vůči okolním podmínkám a zachovával si své vlastnosti co nejdéle. To je řešeno pomocí tzv. EVA fólie, ve které jsou zapouzdřeny polovodiče v panelu. Na EVA fólii ještě bývá vrstva laminátu pro dodatečnou ochranu panelu. Z horní strany jsou polovodiče kryty skleněnou tabulí. Sklo poskytuje panelu ochranu a zároveň propouští sluneční záření na polovodičový přechod. Panely je dále třeba uchytit na nosnou konstrukci na místě instalace. K tomuto účelu je panel ještě uchycen nejčastěji do hliníkového rámu, který zároveň zvyšuje pevnost celého panelu [3][8].

### 1.3.1 Výroba FV článků

Výroba FV článku spočívá v získání čistého křemíku, který je nařezán na tenké destičky. Tyto destičky následně opracováváme pro získání PN přechodu použitelného do FV panelu [3].

### 1.3.1.1 Výroba křemíku

Křemík je prvek hojně rozšířen v zemské kůře a to především ve křemene  $\text{SiO}_2$ , jehož drobné zrnka jsou známy ve formě křemičitého písku. Z této formy je potřeba získat čistý křemík polovodičové čistoty, použitelný na výrobu PN přechodu. Celá výroba se skládá z několika kroků [3].

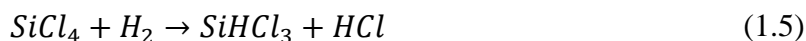
Nejprve se s křemenného písku získává surový křemík pomocí redukce uhlíkem v obloukové peci. Tento proces sestává z několika reakcí, ale v jednoduchosti se dá říct, že oxid křemičitý reaguje s uhlíkem za vzniku křemíku a oxidu uhličitého. Celý proces se dá zjednodušit na jedinou rovnici reakce a to rov. (1.1) [3].



Dalším krokem v procesu je čištění surového křemíku. Pro toto čištění se nejčastěji využívá takzvaná Siemensova metoda, která spočívá v převodu křemíku na trichlorsilan. Tento proces má 2 části, kdy v první části reaguje křemík s chlorem za vzniku sloučeniny chloru a křemíku. Tento proces je znázorněn v rov. (1.2). Následně tato sloučenina reaguje s kyselinou chlorovodíkovou za vzniku trichlorsilanu (viz rov. (1.3)) [3].



Trichlorsilan je kapalná sloučenina, kterou následně destilací koncentrujeme a vzniklý koncentrát trichlorsilanu redukuje vodíkem. Celý proces probíhá za teplot okolo  $900^\circ\text{C}$  a dá se popsat rov. (1.4), (1.5) a (1.6) [3].



Po tomto procesu máme taveninu čistého křemíku, který se dále zpracovává na monokrystalický nebo polykrystalický ingot. Polykrystalický ingot se tvoří vylitím do formy a postupným tuhnutím za řízeného chlazení, aby došlo k vytvoření co největších krystalů křemíku pro lepší vlastnosti. Monokrystalický ingot se tvoří trochu složitěji tzv. Czochralskiho metodou. Ta spočívá v ponoření monokrystalu jako zárodku do taveniny při sníženém tlaku v inertní atmosféře a následném tažení krystalu ven z taveniny. Zároveň je vznikající krystal otáčen kolem své osy [3].

Vzniklý ingot, ať monokrystalický nebo polykrystalický se následně nařezává na tenké destičky o hrubosti řádově desítek až stovek mikrometrů. Tyto destičky se dále používají pro výrobu FV článků [3].

### 1.3.2 Výroba FV článků

Z nařezaných destiček je třeba vyrobit PN přechod. Dvě destičky, jednu dopovanou třívalným (typ P) a jednu pětivalným prvkem (typ N), můžeme spojit dohromady, ale to vytvoří nedokonalý spoj, který nemá dostatečně dobré vlastnosti. Druhou možností je dopovat křemíkovou destičku z jedné strany třívalným a z druhé strany pětivalným prvkem. Dopování probíhá difuzí příměsí do destičky v difuzních pecích. Mezi třívalné prvky patří například bor, indium nebo hliník. Mezi pětivalné patří arsen či antimon [3][9].

Pro zvýšení účinnosti článku dochází k vytvoření antireflexní vrstvy na přední straně článku. To má za následek menší odrazivost a tím lepší absorpci světla. Pro vedení proudu na kontakty je na přední straně článku také kovová mřížka nebo hřebínek, aby byla pro sluneční záření odkryta co největší plocha PN přechodu. Zadní strana článku bývá pokryta kovem celá. Vyjímkou jsou oboustranné články, které jsou schopny zachytávat sluneční záření na obou stranách článku. Tyto články pak mají obě strany s antireflexní úpravou a kovovou mřížkou nebo hřebínkem. Z každého článku jsou vyvedeny kontakty pro propojení s dalšími články [3].

### 1.3.3 Výroba skla

Sklo se vyrábí také z oxidu křemičitého, ale pouze jeho tavením spolu s dalšími příměsemi v peci a následnému lití skla na roztavený cín. Tím je dosaženo rovné, homogenní skleněné tabule, která postupně putuje chladicí linkou, která bývá dlouhá více než 200 metrů. Následně je sklo nařezáno, ale nemá dostatečnou pevnost pro použití na solární panel. Zvýšení pevnosti se dosahuje procesem kdy hotová tabule skla je zahřáta na vysokou teplotu a následně prudce zchlazena. To zapříčiní smrštění svrchní vrstvy, která chladne rychleji a stlačuje vnitřek skla. Vzniklé sklo se nazývá tvrzené sklo a je asi 5x pevnější než obyčejné plavené sklo [4][5].

### 1.3.4 Výroba hliníku

Hliník je ve dnešní době vyráběn nejčastěji z bauxitu ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ). Probíhá elektrolýzou taveniny za přítomnosti kryolitu, který snižuje teplotu tání. Katoda je grafitová nádoba ve které proces probíhá a anoda je také grafit, který se během procesu spotřebovává. Hliník je přitahován ke katodě a kyslík k anodě. Tím se na dně nádoby hromadí hliník o čistotě 99,5 % a je kontinuálně odsáván. Vzniklý kyslík reaguje s grafitem na anodě za vzniku oxidu uhličitého nebo uhelnatého. Celý proces je energeticky a finančně velice náročný [6].

### 1.3.5 Výroba EVA fólie a laminátu

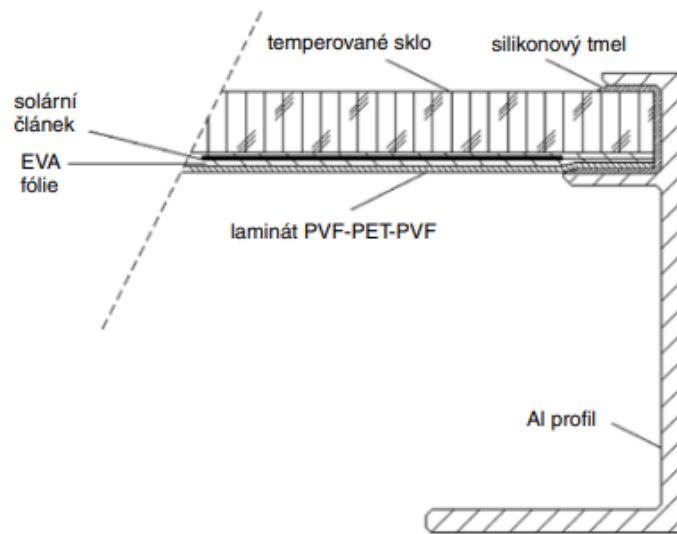
EVA fólie je z materiálu, který se nazývá ethylenvinylacetát. Jedná se o kopolymer složený z ethylenu a vinylacetátu. Vyrábí se kopolymerací těchto dvou látek. EVA fólie má dobré vlastnosti pro použití v panelech. Mezi tyto vlastnosti patří odolnost vůči UV záření, odolnost proti vlhkosti a dobrá světelná propustnost. Laminát PVF-PET-PVF je kompozit 2 materiálů a to polyvinylfluoridu a polyethylenu. [7][11].

## 1.4 Výroba křemíkových FV panelů

V předešlé části jsme si řekli něco o výrobě FV článků a jednotlivých komponent. Výroba FV panelu spočívá v poskládání těchto komponent dohromady a tím dosažení určitých vlastností panelu při určitých světelných podmínkách. Výsledné složení panelu je zobrazeno na *obr. 1.4-1* [3].

Výrobní proces panelu má několik částí. Nejprve se z článků vyvedou kontakty a jednotlivé články vyčistí pomocí ultrazvuku. Vyčištěné články se následně spojují do výsledné sérioparalelní kombinace pro zajištění požadovaného výstupního napětí a proudu. Více článků v sérii zvyšuje napětí, více článků paralelně zvyšuje maximální proud. Po propojení se proměří napětí na článcích a zkontrolují se jednotlivé spoje. Propojené články jsou položeny na tabuli tvrzeného skla a zakryty EVA fólií a PVF-PET-PVF laminátem. Takto poskládané části jsou vloženy do pece, ze které se následně vysaje vzduch a je zahřáta na teplotu tání EVA fólie. To má za následek, že články v panelu jsou zalaty a tím hermeticky izolovány od okolního prostředí [3][8].

V dalším kroku je panel umístěn do přístroje, simulujícího sluneční záření a proběhne testovací měření, které má za úkol zkontrolovat parametry panelu. Pokud panel projde kontrolou, je dále osazen krabičkou s kontakty a je tmelem upevněn do obvykle hliníkového rámu [3][8].



Obr. 1.4-1 Řez FV panelem [3]

## 2 FV SYSTÉMY OBECNĚ

FV systémem (FV elektrárnou) je myšlen soubor komponent, které jsou vzájemně propojeny a slouží pro změnu parametrů elektrické energie vyrobené FV panely na elektrickou energii s parametry, které odpovídají spotřebičům případně síti, do které je systém připojen.

### 2.1 Komponenty FV systémů

Jak již bylo řečeno, fotovoltaický systém je funkční celek, který se skládá z několika částí. Mezi tyto části patří především FV panely, měnič/střídač, akumulátory a regulátor. Důležitou součástí je i samotná nosná konstrukce pro uchycení panelů.

#### 2.1.1 FV panely

FV panely jsou základní prvek FV systému. Jejich úkolem je přeměna slunečního záření na elektrickou energii. Jejich životnost se udává okolo 30 let, záleží na výrobcí a druhu panelu. Časem panely degradují a to řádově okolo ,03 % ročně [16].

#### 2.1.2 Měnič/střídač

Měniče a střídače slouží ke změně parametrů elektrické energie z panelů na parametry, které potřebujeme v dané aplikaci. Například měniče se využívají pro změnu napětí z panelů, kdežto střídače se používají pro přeměnu stejnosměrného napětí na napětí střídavé (nejčastěji 230V 50 Hz). Podle druhu střídače může být výstupní signál obdelníkový, lichoběžníkový a u lepších měničů i sinusový. Pro některé spotřebiče dostačují obdelníkové nebo lichoběžníkové průběhy a proto se občas používají tyto měniče, z důvodu nižší pořizovací ceny. Dnešní měniče dosahují účinnosti okolo [16][17].

#### 2.1.3 Akumulátory

Akumulátory slouží k uložení energie vyrobené FV panely. Používají se u grid-off a hybridních systémů. FV panely mají během dne nerovnoměrnou výrobu. Ve dne, kdy slunce svítí vyrábí elektrickou energii, naopak v noci, kdy je také potřeba pokrýt spotřebu, nevyrábí nic. O pokrytí spotřeby v době, kdy FV panely nevyrábí elektrickou energii, se starají právě akumulátory. Ve dnešní době se nejčastěji používají akumulátory olověné (trakční) a lithiové [17].

Na akumulátory jsou kladeny požadavky a to především ohledně nízkého samovybití, vysoké účinnosti cyklu, počtu možných cyklů, bezúdržbovost a dlouhá životnost [17].

#### 2.1.4 Regulátor

Regulátory se používají v kombinaci s akumulátory, jejich hlavní úlohou je řízení nabíjení akumulátoru. Každý druh akumulátoru potřebuje jiný průběh nabíjení a proto je potřeba zvolit vhodný regulátor. Regulátor by měl mít vysokou účinnost a měl by maximálně využívat elektrickou energii dostupnou z FV panelů. Mezi další funkce regulátoru patří zamezení zpětného proudu do panelů v noci a tím zamezuje vybíjení akumulátoru. Regulátory zajišťují i ochranu proti přebití a podbití akumulátoru [17].

#### 2.1.5 Nosná konstrukce

Nosná konstrukce slouží pro uchycení FV panelů na daný objekt, nebo uchycení ke kotvení (v případě instalace například na pole). Sluneční záření potřebné pro FV panely dopadá směrem od

Slunce, proto je vhodné mít panely natočené největší plochou směrem ke Slunci. Nejvýhodnější fixní natočení panelů v našich zeměpisných podmínkách je směrem na jih nebo jihozápad pod úhlem okolo 35° [16].

Nosných konstrukcí je několik druhů a to podle způsobu uchycení, pro sedlové střechy, ploché střechy a volné prostranství. Speciální druh nosné konstrukce je konstrukce polohovatelná. Ta otáčí panely v průběhu dne směrem k dopadajícímu slunečnímu záření tak, aby bylo dosaženo zachycení co největšího množství světla. Polohovatelné uchycení má ve výsledku lepší výtěžnost asi o 30 %. Na druhou stranu má toto uchycení vyšší pořizovací i provozní náklady (vlastní spotřeba a potřeba pravidelné údržby) [16].

## 2.2 Dělení FV systémů podle napojení na síť

FV systémy se dají rozdělit na 3 druhy podle napojení na síť: off-grid, on-grid a hybridní [11][12].

### 2.2.1 Off-grid FV systémy

Jinými slovy autonomní FV systém. Tento systém už dle svého názvu (off-grid) pracuje mimo rozvodnou síť. Jedná se prakticky o malý rozvod skládající se obvykle z: FV panelů, regulátoru, měniče/střídače, akumulátorů a spotřebičů. Během dobrých podmínek slunečního záření FV panely napájí spotřebiče a přebytky energie jsou ukládány do akumulátorů. Jakmile se začne stmívat, nebo je pod mrakem, FV panely již nevyrábí dostatek elektrické energie a spotřebiče jsou napájeny energií z akumulátorů. Regulátor slouží k regulaci nabíjení a vybíjení akumulátoru, pro jejich ochranu. Měnič se používá v případě, že spotřebiče potřebují jiné parametry vstupní elektrické energie, než jsou výstupní parametry FV panelů a akumulátorů. Tento typ systému je vhodný využívat na místech, kde je příliš drahé vybudovat přípojku z rozvodné sítě [12][13].

### 2.2.2 On-Grid FV systémy

On-grid FV systém je systém přímo napojen na rozvodnou síť. Mezi součásti tohoto systému patří opět FV panely, měnič/střídač, spotřebiče a napojení na rozvodnou síť. Elektrická energie produkovaná FV panely je distribuována přímo ke spotřebičům v dané síti a přebytky energie jsou dodávány do rozvodné sítě. Jakmile dojde k nedostatečné výrobě z FV panelů pro pokrytí spotřeby spotřebičů, je tento nedostatek pokryt z rozvodné sítě. V praxi bývá elektroměr u napojení na rozvodnou síť, který měří kolik energie bylo dodáno do sítě a kolik bylo naopak ze sítě odebráno. U měniče/střídače je důležité, aby byla dodržena synchronizace se sítí [12][14].

### 2.2.3 Hybridní FV systémy

Hybridní FV systém kombinuje výhody on-grid a off-grid FV systémů. Jedná se o systém, který se obvykle skládá z FV panelů, měniče/střídače, regulátoru, akumulátorů, spotřebičů a napojení na rozvodnou síť. Jakmile svítí slunce, tak elektrická energie z FV panelů napájí spotřebiče a dobíjí akumulátory. Ve chvíli, kdy jsou akumulátory plně nabity a FV panely vyrábí více než je potřeba, dochází k dodávce přebytku energie do sítě. V případě, že je sluneční záření málo intenzivní, je nedostatek energie pokryt z akumulátorů. Pokud akumulátory nedodávají dostatečný výkon, nebo jsou vybité, dojde k odběru energie z rozvodné sítě [12][15].

## 3 POŠKOZENÍ FV SYSTÉMŮ

Během provozu FV systémů může dojít k jejich poškození. Ať už výrobní vadou, neodborným zapojením, nebo nesprávnou manipulací, tyto defekty snižují výtěžnost celého FV systému. V této kapitole se podíváme blíže na některé problémy.

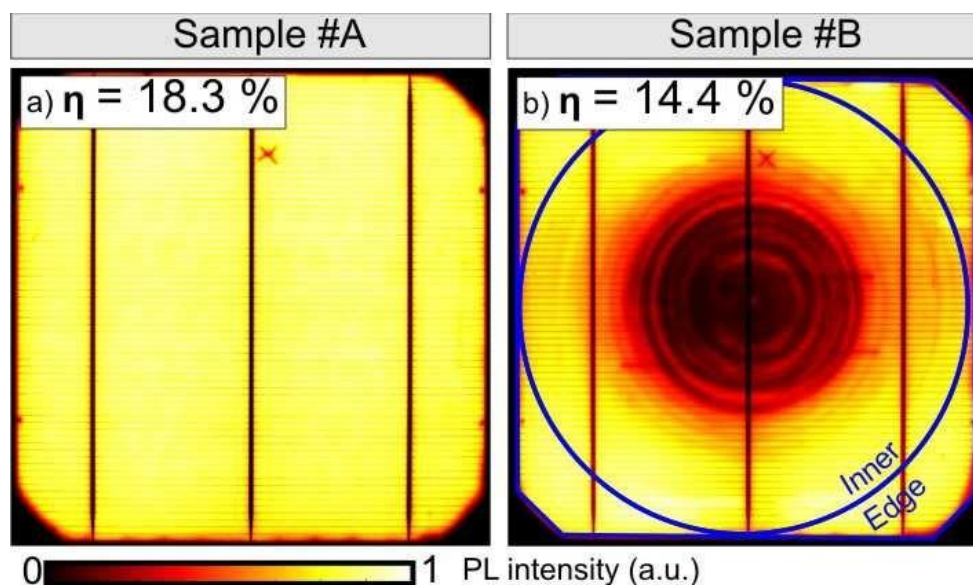
### 3.1 Defekty FV článků

Defekty na FV člancích mohou vzniknout především při výrobě. Buďto se může jednat o defekty materiálu nebo defekty mechanické.

#### 3.1.1 Materiálové defekty

Materiálové defekty jsou defekty vznikající v prvopočátcích výroby FV článků a to při získávání čistého křemíku a jeho následných úpravách. Mezi tyto defekty patří například vírový defekt. Tento defekt se projevuje vznikem soustředných kružnic rozdílné koncentrace příměsí kyslíku během procesu tažení krystalu křemíku. Kyslík se do krystalu dostává rozpouštěním křemíkových nádob, kde tažení probíhá. Vhodnou regulací rychlosti tažení krystalu jsme schopni příměsí dostat na okraj krystalu, odtud poté znečištěnou část odřízneme. Tento defekt snižuje účinnost FV článku díky snižování životnosti volného nosiče náboje [19][20].

Na *Obr. 3.1-1* můžeme vidět porovnání dvou FV článků vyšetřovaných fotoluminiscenční metodou, kde jeden (*Sample A#*) je bez vírového defektu a druhý (*Sample B#*) je postižen vírovým defektem. Zároveň si můžeme všimnout rozdílné účinnosti těchto dvou článků a to skoro o 4 %. [18].



*Obr. 3.1-1* Porovnání dvou FV článků, *Sample A#*) FV článek bez vírového defektu, *Sample B#*) FV článek postižený vírovým defektem [18]

Další materiálový defekt je vnitřní pnutí v křemíkovém krystalu. Toto pnutí vzniká špatně řízeným chlazením krystalu, které způsobuje nerovnoměrné tuhnutí taveniny. Následkem toho defektu jsou vzniklé články náchylné ke vzniku mechanického poškození a to i při běžném tepelném namáhání nebo při manipulaci během instalace panelů [19][20].

Při procesu vytváření difúzní vrstvy (tvorba PN přechodu) mohou mimo žádaných příměsí proniknout do křemíku i nečistoty, které způsobují nehomogenitu difúzní vrstvy [19][20].

### 3.1.2 Mechanické defekty

Mechanické defekty jsou defekty způsobené při opracování FV článku. Mezi tyto defekty patří poškrábání článku, chybná metalizace, mechanické nečistoty na článku a skrytý lom. Poškrábání článku může vzniknout během procesu výroby FV článku. Příčinou může být například neopatrná manipulace s články, případně poškození způsobené stroji při opracování. Poškrábáním může dojít k poškození PN přechodu a následném lavinovém průrazu [19][20].

Chybná metalizace vzniká při nanášení kontaktů na křemíkovou destičku. Může se jednat například o nedotažení sítotisku, tím vzniká oblast, ze které je hůře odváděna vzniklá elektrická energie [19][20].

Při difúzi mohou do článku proniknout prachové částice, způsobující nehomogenitu materiálu. Na povrchu FV článku také mohou utkvět různé mechanické nečistoty. Jedná se například o prachové částice vzniklé při výrobním procesu. Proti těmto nečistotám se můžeme bránit například čištěním ultrazvukem před laminováním článku [8][19][20].

Skrytý lom je prasklina ve FV článku, která není na první pohled viditelná. Během následné manipulace s článkem může dojít k prasknutí článku nebo dokonce jeho úplnému odlomení [19][20].

## 3.2 Defekty FV panelů

Stejně jako FV články, i FV panely mohou mít defekty. Defekty mohou vzniknout špatným výrobním postupem, nebo nevhodnou manipulací, ale nejčastěji vznikají během doby provozu. Mezi nejčastější defekty FV panelů se řadí degradace dopadajícím zářením, potenciální indukovaná degradace, delaminace, proražení by-pass diody, šnečí cestičky a takzvaný hot spot (horké místo).

### 3.2.1 Degradace dopadajícím zářením

Anglicky light induced degradation je druh degradace, která probíhá v polovodiči typu P, který bývá nejčastěji dopován bórem. Jak název napovídá, jedná se o degradaci způsobenou světlem. Rozlišujeme 2 druhy degradace a to disociaci párů bór-železo, která nastává pokud je materiál kontaminován železem a formování rekombinačně aktivních komplexů bór-kyslík, které nastává v křemíku, který je zbaven železa pomocí Czochralského metody. Oba druhy se projevují snížením životnosti minoritních nosičů náboje [21].

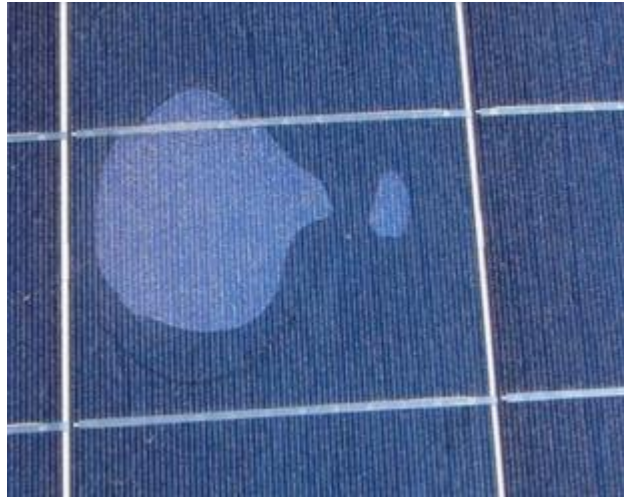
### 3.2.2 Potenciální indukovaná degradace

Potenciální indukovaná degradace, někdy také nazývaná vysokonapěťový stres, nastává u větších instalací, kde je zapojeno několik panelů ve stringu (v sérii). Obvykle nastává u panelu, který je nejbližší zápornému pólu stringu. Potenciál vůči zemi v těchto místech bývá okolo -250 až -450 V. Rám panelu a konstrukce na kterou je uchycen má potenciál vůči zemi nulový z důvodu, že musí být uzemněn. V těchto podmínkách může dojít ke svodu proudu z článků na rám panelu. To má za následek pokles výkonu na postižených panelech, přičemž postižených panelů může být ve stringu i více. Zvýšená teplota a vysoká vlhkost mohou problém ještě zhoršit [22].

### 3.2.3 Delaminace FV panelu

Jedná se o odlepení EVA fólie od FV článku. Obvykle nastává vlivem teploty a UV záření. Mezi jednotlivými vrstvami panelu tak vznikají různé bubliny a dutiny, (viz. obr. 3.2-1), které následně

může vyplnit voda s chloridy, která následně poškozuje panel korozí. Takto poškozený panel bývá neopravitelný. Delaminace se obvykle objevuje u celé vyrobené série daných panelů [19][20][23].



Obr. 3.2-1 Detail FV panelu poškozeného delaminací [25]

### 3.2.4 Proražení by-pass diody

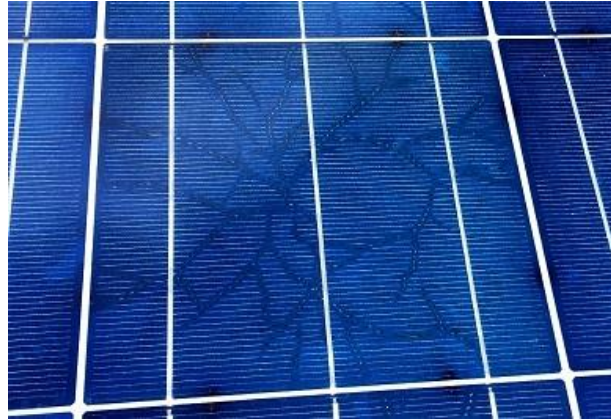
By-pass diody se využívají k omezení ztrát při částečném zastínění FV panelů ve stringu. Při zastínění části panelů zapojených v sérii, musí všemi panely procházet stejný proud. U zastíněných panelů tento proud způsobuje inverzi, což má za následek zahřívání panelu a snížení výkonu. Pro přemostění proudu přes zastíněné panely jsou do obvodu zařazeny by-pass diody. Proražení těchto diod obvykle nastává díky tepelnému přetížení, způsobeného nedostatečným dimenzováním této diody [24]. Příklad zničené by-pass diody je na obr. 3.2-2 [24].



Obr. 3.2-2 Proražená by-pass dioda [24]

### 3.2.5 Šnečí cestičky (Snail trails)

Šnečí cestičky se projevují jako tmavěji zbarvená místa o šířce 0,5 - 1 cm, které svým tvarem připomínají šnečí cestičky. Tento jev pravděpodobně vzniká difúzí komponent z EVA fólie skrz mikrotrhliny ve FV člancích, kde způsobují oxidaci kontaktů a tím dochází ke změně zbarvení. Dle tvrzení výrobců FV panelů jsou šnečí cestičky pouze estetická vada a nijak nesnižují výkon panelů [26]. Šnečí cestičky jsou zobrazeny na obr. 3.2-3 [26].



Obr. 3.2-3 Vzniklé šnečí cestičky na panelu [29]

### 3.2.6 Hot spot

Hot spot, neboli horké místo, je defekt vznikající v místech, kde došlo k defektu krystalické mřížky FV článku. Z praxe bylo vyzorováno, že pokud je horké místo teplejší než ostatní články o 50 °C a více, vzniká riziko trvalého poškození/zničení FV panelu. Tyto horké místa způsobují změnu barvy zadního laminátu a dají se odhalit pomocí termokamery [25].

## 3.3 Defekty ostatních komponent FV systému

Nejen u FV panelů mohou nastat defekty. Mezi často postižené zařízení patří například měniče nebo kabeláž. Při silných povětrnostních vlivech může dojít i k poškození samotné konstrukce držící panely.

### 3.3.1 Kabeláž

Při projektování FV elektrárny je potřeba správně navrhnout průřez použitých vodičů. Nedostatečné nadimenzování může mít za následek přebytečné ztráty ve vodiči a úbytek napětí na vodiči, které se projeví zvyšováním výstupního napětí ze střídače. V okamžiku překročení dovoleného výstupního napětí vybaví ochrana střídače, což vede ke zbytečným ekonomickým ztrátám. Další problémy vznikají při instalaci kabeláže, může dojít k použití stahovacích pásek nebo chrániček kabelů, které nejsou odolné proti UV záření. Tyto pásky nebo kabelové chráničky následně chřadnou a ztrácí své žádoucí mechanické vlastnosti. Dalším problémem mohou být málo dotažené šroubové spoje v pojistkových a jisticích skříních, případně v rozvaděcích [24].

### 3.3.2 Měniče

Porucha měniče/střídače patří mezi nejčastější poruchy, které se objevují u FV elektráren. Statisticky nastávají problémy s měniči 6krát častěji než u FV panelů. Oproti panelům je střídač komplikovanější zařízení, u kterého musí být kladen důraz na správnou instalaci a jištění. Při nedodržení zásad od výrobce se zvyšuje riziko vzniku poruchy střídače [27].

### 3.3.3 Nosná konstrukce

Při instalaci nosné konstrukce bývají často používány necertifikované držáky, nebo jsou certifikované držáky špatně použity. Necertifikované držáky mohou časem korodovat nebo se deformovat. Ukázka necertifikovaného držáku je na obr. 3.3-1. Další vyskytující se problém ještě

bývá chybné uzemnění konstrukce a ostatních částí systému. To může vést k selhání například přepětové ochrany [24].



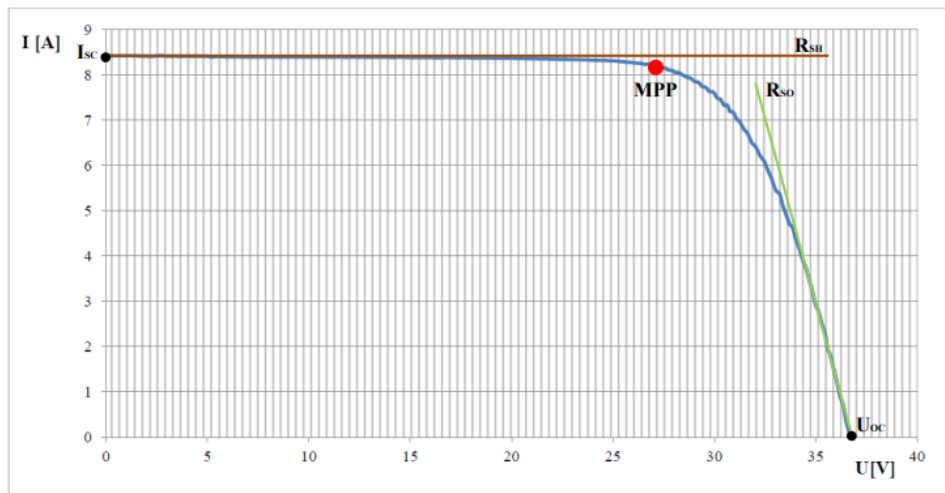
*Obr. 3.3-1 Necertifikovaný držák podléhající korozi [24]*

## 4 PARAMETRY FV PANELŮ

FV panel je elektrický generátor, který má své parametry. Tyto parametry charakterizují daný panel a jsme podle nich schopni vybrat panely pro danou aplikaci.

### 4.1 Voltampérová charakteristika panelu

Z voltampérové charakteristiky vychází základní parametry FV panelu. Jedná se o závislost proudu na napětí a získává se měřením. Měření probíhá za daných podmínek, mezi které patří intenzita osvětlení  $1000 \text{ W/m}^2$  a použité osvětlení musí mít spektrální složení stejné jako sluneční. Další podmínkou je teplota měření, která je stanovena na  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Příklad VA charakteristiky je na obr. 4.1-1 [19][28].



Obr. 4.1-1 Voltampérová charakteristika FV panelu [20]

#### 4.1.1 Pracovní bod

S voltampérovou charakteristikou úzce souvisí i pojem pracovní bod. Jedná se o bod na VA charakteristice, který značí proud odebíraný ze článku a napětí na článku v dané chvíli. Při zahřátí panelu se mění i jeho VA charakteristika, což má za následek snížení výkonu panelu. Polohu pracovního bodu můžeme měnit, například pomocí vhodného regulátoru, který simuluje proměnný odpor zátěže, abychom dosáhli maximální výtěžnosti elektrické energie z panelu [28].

#### 4.1.2 Napětí naprázdno $U_{OC}$

Napětí naprázdno je napětí, které se objeví na svorkách při nulové zátěži (svorky jsou rozpojené). Jedná se o maximální napětí, které článek může za daných podmínek dodat. Jedná se vlastně o pracovní bod při nulovém proudu [28].

#### 4.1.3 Proud nakrátko $I_{SC}$

Proud nakrátko udává maximální proud, který je FV panel schopný dodat v daných podmínkách. Měří se při zkratovaných svorkách FV panelu, to znamená maximální vodivost mezi svorkami. Dá se říct, že proud nakrátko je jeden z pracovních bodů panelu [28].

#### 4.1.4 MPP – bod maximálního výkonu

Anglicky maximum power point je bod na VA charakteristice, který značí proud  $I_m$  a napětí  $U_m$  při kterém můžeme z panelu dostat maximální výkon [28].

#### 4.2 Fill factor

Fill factor je ukazatel, který značí poměr maximálního výkonu ku násobku proudu nakrátko a napětí naprázdno. Matematicky zapsán je v rov. 4.1 [28].

$$FF = \frac{I_m \cdot U_m}{I_{SC} \cdot U_{OC}} \quad (-; A, V, A, V) \quad (4.1)$$

#### 4.3 Účinnost FV panelu

Účinnost FV panelu udává, v jaké míře je schopen přeměnit energii dopadajícího záření na energii elektrickou. Je definována jako poměr maximálního elektrického výkonu ku výkonu dopadajícího záření. Výkon dopadajícího záření je pak dán násobkem intenzity osvětlení a plochy FV panelu. Účinnost je popsána rov. 4.2 [28].

$$\eta = \frac{P_m}{P_{rad}} = \frac{I_m \cdot U_m}{E \cdot A_p} \quad (-; W, W, A, V, lx, m^2) \quad (4.2)$$

#### 4.4 Sériový a paralelní odpor FV panelu

Sériový odpor je součet odporů všech komponent FV panelu zapojených do obvodu. Patří zde například odpor polovodičů, kontaktů a vodičů v panelu. Vysoký sériový odpor má za následek úbytek napětí na svorkách. Paralelní odpor vzniká díky defektům v krystalické mřížce a svodovým proudem v okolí okrajů FV článků. Nízký paralelní odpor značí poškození panelu, panel se chová jakoby měl vnitřní zkrat [19][28].

## 5 PROVOZNÍ DIAGNOSTIKA FVE

Provozní diagnostika FVE se řídí normou ČSN EN 62446, která vychází z normy IEC 62446. Tato norma se týká FV elektráren připojených přímo do rozvodné sítě. Předmětem této normy jsou minimální požadavky na systémovou dokumentaci, která se předává zákazníkovi po instalaci. Dále jsou zde uvedeny požadavky na zkoušky při uvádění do provozu a zkoušky pro kontrolu systému po delší době od uvedení do provozu.

### 5.1 Definice pojmů

Norma ČSN EN 62446 se odkazuje na několik dalších norem, ze kterých přebírá definice některých pojmů. Mezi tyto pojmy patří [28]:

- **Prohlídka** – prohlídka elektrické instalace pro ověření správnosti provedení instalace
- **Zkoušení** – provedení zkoušek, pro ověření účinnosti elektrické instalace. Součástí zkoušení je i měření daného systému pomocí vhodných měřících přístrojů
- **Vypracování zprávy** – vypracování dokumentu, který obsahuje výsledky prohlídky a zkoušení daného systému
- **Katalogové údaje** – specifikace daného výrobku od výrobce, nebo zhotovitele

### 5.2 Minimální požadavky na dokumentaci systému

Dokumentace systému je dokumentace, kterou odevzdává výrobce/zhotovitel zákazníkovi. Dokumentace by měla být přístupná zákazníkovi a pracovníkům provádějícím inspekci nebo údržbu. Dokumentace obsahuje důležité informace o systému jako jsou základní informace o systému, projektantovi a o firmě, která instalaci provedla [28].

#### 5.2.1 Základní informace o systému

Mezi základní informace o daném systému patří jmenovitý výkon systému, počet a druh solárních panelů, typ měniče, datum instalace a uvedení do provozu, jména zákazníka a adresa objektu, kde se elektrárna nachází. Dále by měly být obsaženy informace o firmě, která provedla návrh a instalaci, a dále zodpovědné osoby [28].

#### 5.2.2 Schéma zapojení

Důležitou součástí dokumentace je i schéma zapojení systému. To obsahuje informace o solárním poli (jako například informace o jednotlivých panelech jako jsou: typy panelů, počet stringů, počet panelů ve stringu a identifikace zapojení stringů do měničů). Dále by zde měly být uvedeny informace o použitých kabelech a o způsobu jejich jištění a možnosti odpojení [28].

V dokumentaci by neměly být opomenuty informace o AC straně systému, jako jsou informace o odpojovači, nadproudové ochraně a zbytkovém proudu. V neposlední řadě by měly být zmíněny způsoby uzemnění a připojení k hromosvodu [28].

#### 5.2.3 Informace o obsluze a údržbě

Informace o obsluze a údržbě by měly obsahovat úkony pro zjištění správné funkce systému, co dělat v případě poruchy, jak systém vypnout v případě nouze, doporučení o údržbě, vhodná opatření při budoucích pracích (například práce na střeše) a veškeré záruční listy komponent a záruka na práci zhotovitele [28].

### 5.2.4 Ostatní informace

U větších systému, kde se nachází 3 a více stringů, by mělo být poskytnuto schéma s rozložením panelů, kde je vidno jak jsou panely zapojeny (to má své důvody hlavně u větších systémů, kde je špatný přístup k zadním stranám panelů). Součástí dokumentace by měly být i katalogové listy instalovaných panelů a měničů.

## 5.3 Prohlídka FVE

V rámci prohlídky FVE se kontroluje, zda byly použity vhodné komponenty pro daný účel. To znamená, že jsou instalované komponenty konstruovány, určeny a instalovány dle požadavků normy ČSN 33 2000. Dále zda jsou veškeré komponenty odolné vůči možným povětrnostním vlivům, jako je vítr, sníh, možná teplota, koroze a vlhkost. Na DC straně by měla být použita izolace druhého stupně a použité kabely by měly být navrženy a nainstalovány způsobem, který minimalizuje riziko zkratu nebo zemního spojení. Obvykle se tohoto dosahuje použitím kabelů s dvojitou izolací. Dále se kontroluje galvanické oddělení DC a AC strany [28].

Kontroluje se i správná volba nadproudové ochrany jednotlivých stringů. V rámci ochrany před bleskem se kontroluje, zda nejsou kabely příliš dlouhé (pro omezení indukovaného napětí při zásahu blesku). V rámci prohlídky se také ověřuje, zda jsou veškeré jmenovité hodnoty DC komponent vyšší než je maximální možné napětí v systému. Dále ověření, zda jsou kabely odolné vůči povětrnostním vlivům, jako je vítr, náledí a UV záření. Kontrola přítomnosti vypínače na DC straně měniče [28].

Na AC straně systému se kontroluje správnost zapojení měniče a správnost jeho nastavení dle místních podmínek. V celém systému se dále kontroluje správnost označení veškerých součástí, které mají být označeny. To zahrnuje varovné tabulky, schéma zapojení, návod k vypnutí a návod k nouzovému vypnutí systému a kontrola, zda jsou všechny značky dobře upevněny a odolné vůči prostředí [28].

## 5.4 Zkouška FVE

V rámci zkoušky FVE se provádí několik zkoušek. Mezi tyto zkoušky patří:

- Zkouška zemnění
- Zkouška polarity
- Zkouška slučovače
- Měření FV panelů naprázdno
- Měření FV panelů nakrátko
- Zkouška funkčnosti
- Měření odporu izolace
- Inspekce infračervenou kamerou

Měření nakrátko a naprázdno může být nahrazeno měřením VA charakteristiky panelů/stringů.

### 5.4.1 Měření naprázdno

Při měření naprázdno dochází ke změření napětí naprázdno ( $U_{OC}$ ). Může se měřit například každý panel zvlášť, nebo se dá měřit napětí na celém stringu. Naměřené napětí se dále porovnává s očekávanou hodnotou a tyto hodnoty by se neměly vzájemně odlišovat o více než 5% [28].

### 5.4.2 Měření nakrátko

Při měření nakrátko se měří proud panelem nebo stringem při zkratu ( $I_{SC}$ ). Opět zde dochází k porovnání s očekávanou hodnotou a tyto hodnoty by se neměly lišit o více než 5% [28].

### 5.4.3 Měření izolačního odporu

Tato zkouška je mírně komplikovanější. Dochází k měření odporu mezi kladným pólem stringu/panelu a konstrukcí panelu a následně se měří odpor mezi záporným pólem stringu/panelu a konstrukcí panelu. V případě, kdy nejsou dostupné vodivé části na panelu, se měří izolační odpor vůči uzemnění objektu. Během tohoto měření hrozí zvýšené riziko úrazu elektrickým proudem. Pro měření stringu s napětím do 120 V se využívá měřicí napětí 250 V a výsledný naměřený izolační odpor by měl být vyšší než 0,5 M $\Omega$  [28].

### 5.4.4 Měření VA charakteristiky

Při měření VA charakteristiky získáváme především napětí naprázdno ( $U_{OC}$ ) a proud nakrátko ( $I_{SC}$ ). Dále z tohoto měření můžeme získat maximum power point, výkon stringu nebo panelu, fill factor a na VA charakteristice se projevují různé defekty deformací této charakteristiky. Během měření jsou potřeba stabilní podmínky. Zejména stabilní sluneční záření o intenzitě alespoň 400 W/m<sup>2</sup> [28].

### 5.4.5 Inspekce infračervenou kamerou

Během této inspekce je zapotřebí stabilního ozáření panelů s intenzitou slunečního záření okolo 600 W/m<sup>2</sup>. Tato inspekce se provádí za provozu (to znamená, že systém normálně vyrábí energii). Je zapotřebí pomocí infračervené kamery prohlédnout veškeré panely za účelem odhalení případné závady. Při odhalení horkého místa (hot spot) je zapotřebí dále zkoumat co jej způsobuje a případně navrhnout opatření pro eliminaci tohoto jevu [28].

### 5.4.6 Interpretace naměřené VA charakteristiky

Očekávaný průběh VA charakteristiky u panelu, který je v pořádku je zobrazen na *Obr 4.1-1*. Mezi nečastější změny VA charakteristiky patří různé kroky či zářezy v charakteristice, ty mohou způsobovat zakryté panely, nečistoty na panelech případně chybné moduly panelu. Dalším problémem může být zploštělé koleno grafu, které značí možné stárnutí panelu a tím jeho snižování účinnosti [28].

## 6 PROVEDENÍ PROVOZNÍ DIAGNOSTIKY FVE

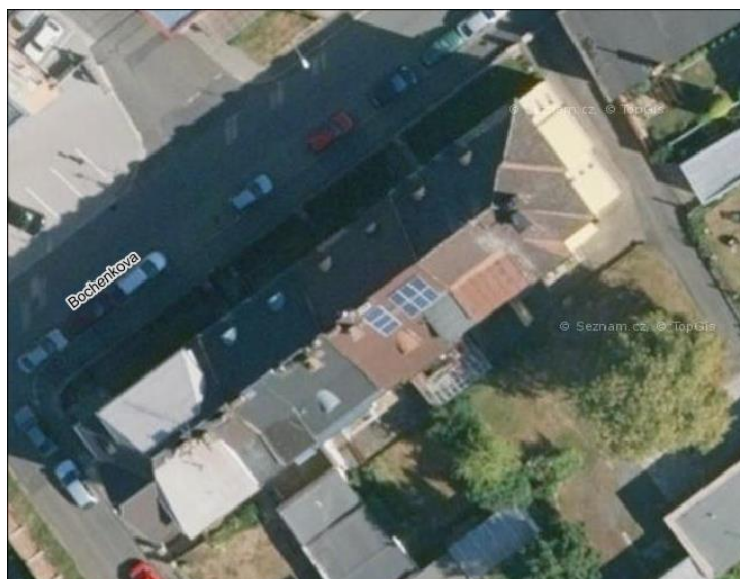
### 6.1 Seznámení s diagnostikovaným objektem

Původně mělo měření probíhat na systému na budově Technické 14 v Brně. Z důvodu nastalé situace bylo rozhodnuto o změně, kdy bude provedena diagnostika systému na budově Bochenkova 25 v Opavě. Jelikož se jedná o hybridní systém s bateriovým úložištěm, tak došlo k diagnostice pouze DC části systému, přesněji diagnostice FV panelů a měničů, jejichž výstup byl považován za stranu spotřebiče. Na *Obr. 6.1-1* je snímek FV pole.



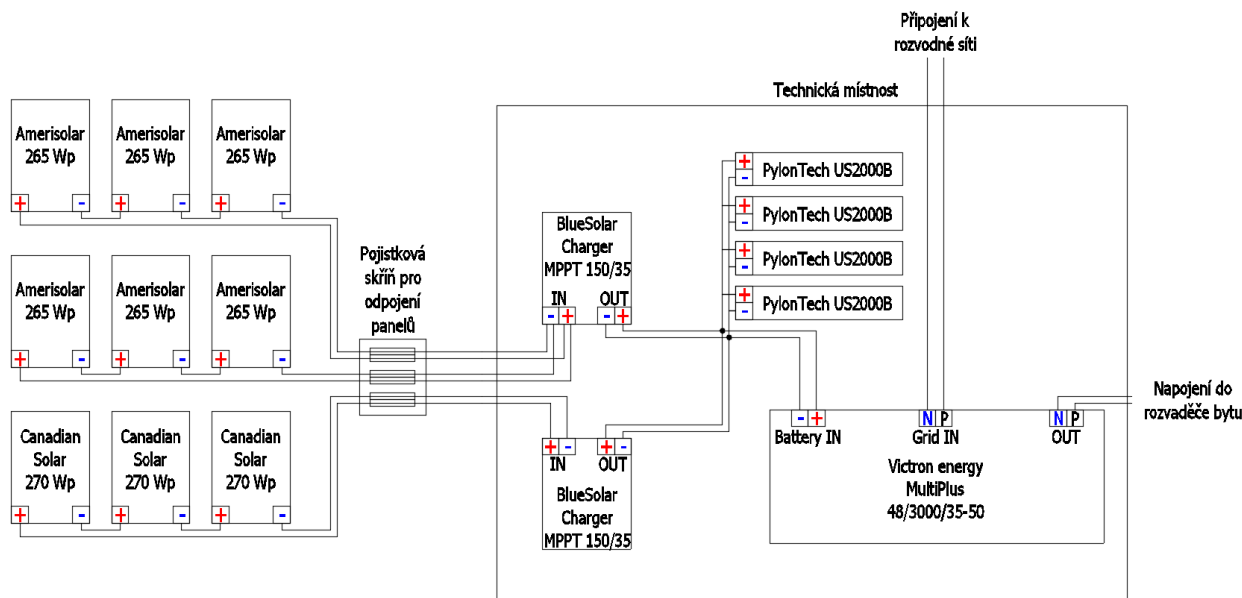
*Obr. 6.1-1 Záběr FV pole na střeše budovy*

Systém je rozdělen do 3 stringů po třech panelech, kde 2 stringy mají každý 3 panely Amerisolar 265 W (panely napravo) a jeden string má 3 panely Canadian Solar glass 270 W (panely nalevo). První 2 stringy s panely Amerisolar jsou dále zapojeny paralelně do jednoho měniče BlueSolar Charger MPPT 150/35 a poslední string s panely Canadian solar je sám zapojen do dalšího měniče BlueSolar Charger MPPT 150/35.



*Obr. 6.1-2 Letecký pohled na budovu [30]*

Měníče dále nabíjí 4 baterie PylonTech US2000B Plus 48V 50 Ah. Baterie spolu pracují v paralelním zapojení a jsou dále napojeny na měnič Victron Energy MultiPlus 48/3000/35-50, který dle potřeby pokrývá spotřebu jednoho bytu v budově buď přímo z baterií, nebo kombinovaně z baterií a sítě zároveň. Měníč nedodává energii do rozvodné sítě. Schéma zapojení je vidět na Obr. 6.1-3.



Obr. 6.1-3 Schéma zapojení systému

## 6.2 Vizuální prohlídka

Během vizuální prohlídky nebyly odhaleny žádné zjevné závady na systému. Veškeré vodiče byly nepoškozeny a uchycovací konstrukce nejeví známky koroze. Panely jsou čisté a nejeví známky popraskání nebo změny barvy. Prohlídka pomocí infrakamery nebyla provedena.

## 6.3 Zkouška PV pole

Pro zkoušku PV pole byl použit měřicí přístroj Metrel MI3108 PS Eurotest PV sériového čísla 14250870. Tento přístroj umožňuje měřit jak izolační odpory, tak i VA charakteristiky panelů, či stringů.

### 6.3.1 Zkouška prvního stringu

První string se skládá ze 3 panelů Amerisolar 265 Wp, které jsou vzájemně spojeny do série. Z důvodů špatného přístupu k jednotlivým konektorům, bylo měření uskutečněno v pojistkové skříni, kde byly panely odpojeny od měničů vysunutím pojistek.

Výsledky měření izolačních odporů kladného i záporného pólu panelu ukázaly, že izolace není nikde poškozena a tudíž panely v testu vyhověly. Hodnoty je možné vidět v Tab. 6.1-1.

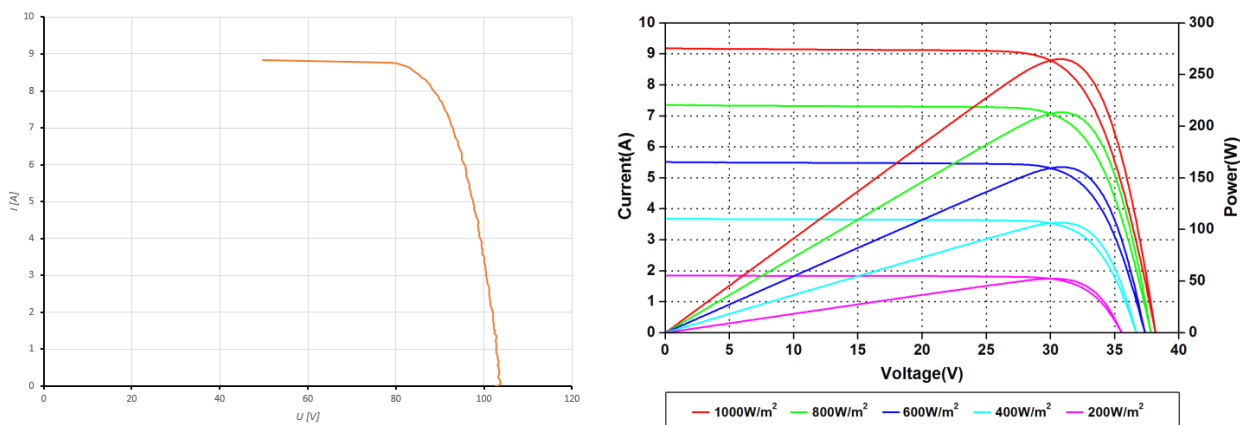
$R_{OC+} [\Omega]$	>200
$R_{OC-} [\Omega]$	>200

Tab. 6.3-1 Naměřené hodnoty izolačního odporu prvního stringu

Dále byla měřena VA charakteristika stringu. Měření probíhalo také v pojistkové skříni při odpojených panelech od měničů. Podmínky při měření jsou zaznamenány v *Tab. 6.3-2*. Jsou zde zaznamenány i hodnoty napětí naprázdno, proudu nakrátko, napětí při maximálním výkonu a proudu při maximálním výkonu. Výsledná naměřená VA charakteristika stringu je zobrazena na *Obr. 6.3-1*. Spolu s naměřenou charakteristikou je na obrázku také charakteristika od výrobce pro jeden panel při různých intenzitách slunečního záření.

$I_{rr}$ [ $W/m^2$ ]	1051
$T$ [ $^{\circ}C$ ]	30,3
$U_{oc}$ [V]	102,5
$I_{sc}$ [A]	8,95
$U_M$ [V]	86,71
$I_M$ [A]	8,31

*Tab. 6.3-2* Okolní podmínky při měření prvního stringu a vybrané hodnoty z VA charakteristiky



*Obr. 6.3-1* Naměřená VA charakteristika prvního stringu (vlevo) a VA charakteristika od výrobce (vpravo)

Při porovnání měřené VA charakteristiky a VA charakteristiky od výrobce můžeme vidět, že jsou si velmi podobné. Měřený průběh je tedy v rámci očekávání a panely nevykazují poškození.

### 6.3.2 Zkouška druhého stringu

Druhý string má stejné složení jako string první. Měření bylo prováděno stejným způsobem jako v případě prvního stringu. Výsledky měření izolačních odporů jsou zobrazeny v *Tab. 6.3-3*. I druhý string v této zkoušce obstál.

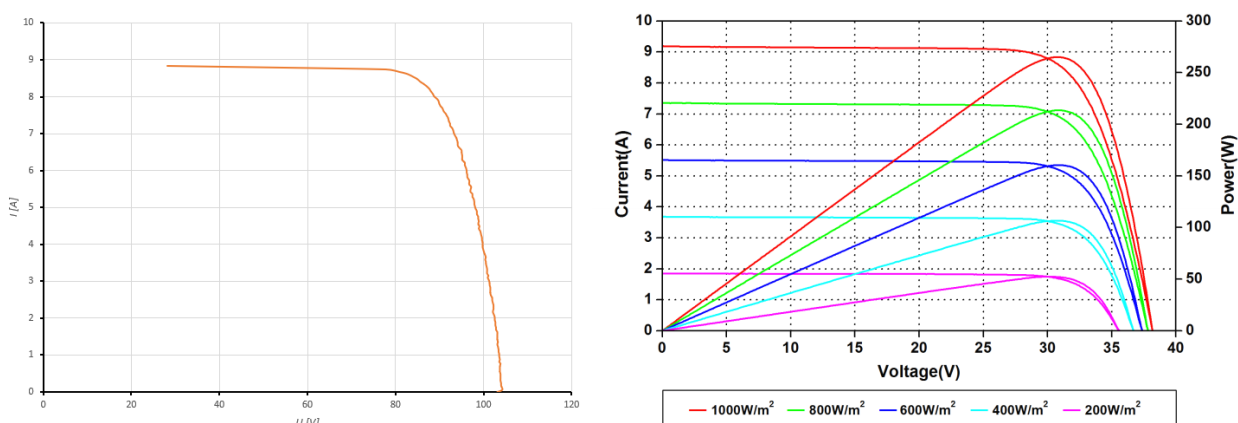
$R_{OC+}$ [ $\Omega$ ]	>200
$R_{OC-}$ [ $\Omega$ ]	>200

*Tab. 6.3-3* Naměřené hodnoty izolačního odporu druhého stringu

Podmínky měření VA charakteristiky druhého stringu a vybrané hodnoty této charakteristiky jsou zobrazeny v *Tab. 6.3-4* a porovnání VA charakteristiky s charakteristikou výrobce je vyobrazeno na *Obr. 6.3-2*. Stejně jako v prvním případě se měřená charakteristika podobá charakteristice od výrobce, to znamená, že panely jsou v pořádku.

$I_{rr}$ [ $W/m^2$ ]	1051
$T$ [ $^{\circ}C$ ]	30,3
$U_{OC}$ [V]	103,1
$I_{SC}$ [A]	8,85
$U_M$ [V]	86,42
$I_M$ [A]	8,35

Tab. 6.3-4 Okolní podmínky při měření druhého stringu a vybrané hodnoty z VA charakteristiky



Obr. 6.3-2 Naměřená VA charakteristika druhého stringu (vlevo) a VA charakteristika od výrobce (vpravo)

### 6.3.3 Zkouška třetího stringu

Třetí string se skládá ze 3 sériově zapojených panelů Canadian Solar glass 270 Wp. Měření bylo provedeno stejně jako u předešlých 2 stringů. Při měření izolačního odporu tohoto stringu panely také obstály. Detailní výsledky jsou uvedeny v Tab. 6.3-5.

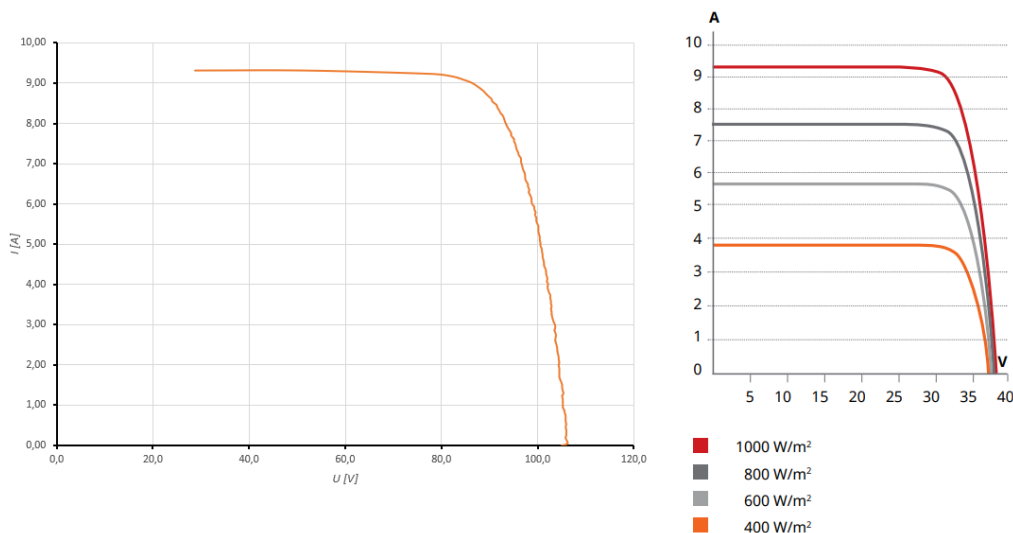
$R_{OC+}$ [ $\Omega$ ]	>200
$R_{OC-}$ [ $\Omega$ ]	>200

Tab. 6.3-5 Naměřené hodnoty izolačního odporu třetího stringu

Měření VA charakteristiky opět probíhalo obdobným způsobem. Podmínky a vybrané hodnoty z VA charakteristiky jsou uvedeny v Tab. 6.3-6. Měřená VA charakteristika a charakteristika od výrobce je uvedena na Obr. 6.3-3. Porovnáním lze vidět, že se měřený průběh podobá průběhu od výrobce. Z toho lze usoudit, že jsou panely v pořádku.

$I_{rr}$ [ $W/m^2$ ]	1067
$T$ [ $^{\circ}C$ ]	30,1
$U_{OC}$ [V]	104,8
$I_{SC}$ [A]	9,33
$U_M$ [V]	88
$I_M$ [A]	8,87

Tab. 6.3-6 Okolní podmínky při měření třetího stringu a vybrané hodnoty z VA charakteristiky



Obr. 6.3-3 Naměřená VA charakteristika třetího stringu (vlevo) a VA charakteristika od výrobce (vpravo)

## 6.4 Zhodnocení účinnosti systému

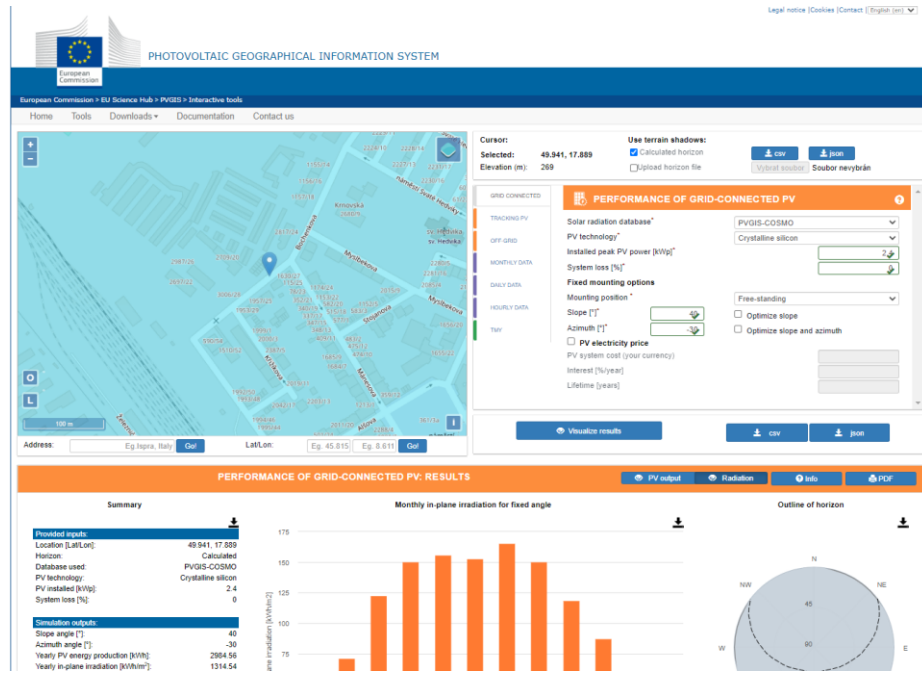
Zhodnocení účinnosti systému je myšlena účinnost, se kterou se energie dopadající na panely přemění na energii elektrickou, která opouští měniče BlueSolar Charger MPPT 150/35. Jelikož nemáme možnosti provádět dlouhodobé měření pomocí měřidel k tomu určeným, použijeme pouze data z měničů a informace z nástroje PVGIS (Photovoltaic geographical information system). Z měničů získáme informace o tom kolik energie za dané období bylo dodáno na výstupu měničů. Jelikož měniče ukládají pouze data za posledního půl roku, tak bude sledované období od 1.1.2020 do 31.5.2020. Ze databáze PVGIS následně získáme kolik energie průměrně dopadá na jeden metr čtvereční za dané období.

Nejprve je třeba určit celkovou plochu instalovaných panelů. Panely Amerisolar mají každý plochu 1,63 m<sup>2</sup>. Panely Canadian Solar mají každý plochu 1,64 m<sup>2</sup>. Celková plocha potom je 14,7 m<sup>2</sup>. Po exportu dat z měničů za dané období bylo zjištěno, že z měničů byla vydána celková energie 1167,91 kWh.

Dále si určíme z databáze PVGIS množství energie, které průměrně dopadá v lokalitě systému v daném období. Přesné data jsou dostupné pouze do roku 2016 a jelikož v té době nebyl systém v provozu, tak není možné takto výpočet provést. Proto použijeme hodnoty průměrné. PVGIS nabízí několik databází. Já jsem zvolil databázi PVGIS-COSMO, která by měl být nejpřesnější. Na Obr. 6.4-1 je možno vidět prostředí webu PVGIS. Podle údajů z této databáze dopadla na systém sluneční energie o intenzitě 547,16 kWh/m<sup>2</sup>. Nyní dosazením do rov. 6.1 jsme schopni získat účinnost přeměny dopadajícího záření na elektrickou energii vystupující z měničů BlueSolar Charger MPPT 150/35.

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{E_{rr} \cdot S_p} \cdot 100 \quad (-; \text{kWh}, \text{kWh}/\text{m}^2, \text{m}^2) \quad (6.1)$$

$$\eta = \frac{1167,91}{547,16 \cdot 14,7} \cdot 100 = 14,52 \%$$

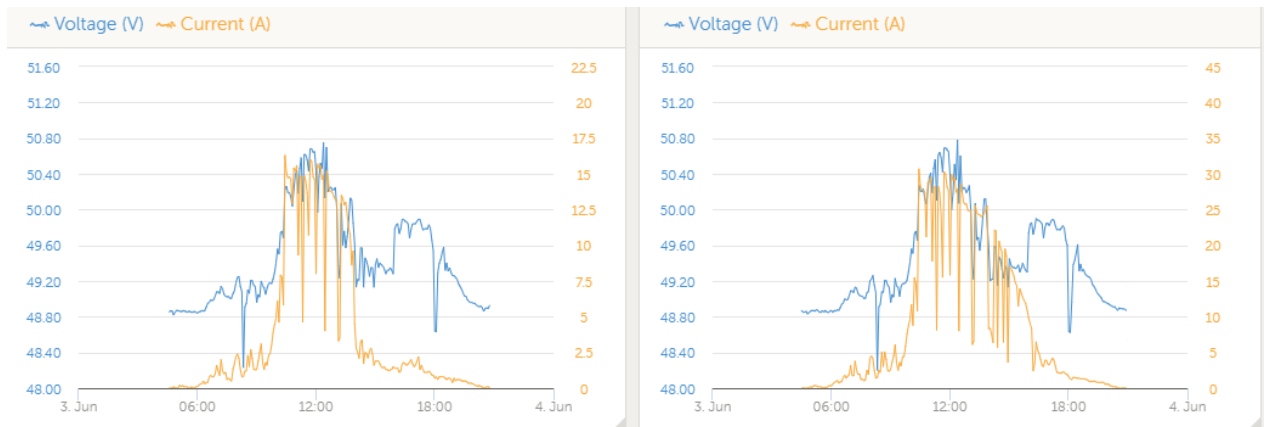


Obr. 6.4-1 Prostředí webu PVGIS [31]

Výsledná účinnost tedy vyšla 14,52 %. Při porovnání s očekávanou účinností okolo 16,07 % (kde 16,4% je účinnost panelů a 98% je účinnost měniče) vidíme, že je menší asi o 10%. To je zejména z důvodu, že tento systém při nabití baterii a nedostatečné spotřebě tlumí výrobu energie z PV pole, tak by byla účinnost ve skutečnosti trochu vyšší. Zároveň je účinnost snížena i o ztráty, které vznikají v odpoledních hodinách zastíněním jednoho stringu komínem. Více o těchto problémech v následující kapitole.

## 6.5 Možnosti optimalizace systému

Pro zvýšení výnosnosti systému je možné udělat několik změn pro optimalizaci tohoto systému. V systému totiž vznikají dva problémy, kdy dochází ke snížení výroby energie. Prvním problémem je umístění panelů třetího stringu Canadian Solar. Část těchto panelů začne být okolo 14-15 hodin zastíněna komínem a tím klesá proud, který z panelů teče. Komín je možno vidět na Obr. 6.1-1. Tento jev lze pozorovat na průbězích proudu a napětí na jednotlivých měničích na Obr. 6.5-2, kdy vidíme pokles proudu měniče třetího stringu. Záznam na obrázku je ze dne 3.6.2020.



Obr. 6.4-2 Průběhy proudu a napětí na jednotlivých měničích BlueSolar. Vlevo string 3, vpravo stringy 1 a 2

Řešení tohoto problému může být například přesunutí tohoto stringu nalevo od komína, kde by nedocházelo k zastínění.

Další ztráty při výrobě nastávají v době, kdy jsou baterie plně nabité, voda v elektrickém bojleru je plně nahřátá a aktuální spotřeba elektřiny je nižší, než je její potenciální výroba. Tato doba nastává ve dny, kdy je během dne vysoká intenzita slunečního záření bez oblačnosti nebo přes víkendy, kdy v bytě nikdo není a tudíž je minimální spotřeba elektřiny a spotřeba teplé vody. Možné řešení tohoto problému by mohlo být rozšíření stávající baterie, která to umožňuje. Vzhledem ke stávající ceně baterie (okolo 28 000 Kč) se ale tato investice nevyplatí, vzhledem k četnosti doby, kdy je baterie plně nabitá.

Další řešení tohoto problému, které bylo asi před měsícem instalováno spočívá ve využití přebytečné energie pro odvlhčení sklepa v budově, kdy je za jistých podmínek (baterie nabitá nad 90%, aktuální spotřeba je pod 500 W a příkon z FV pole je nad 1000 W) sepnuto napájení odvlhčovače a elektrického přímotopu umístěného ve sklepě.

## 7 ENERGETICKO-EKONOMICKÁ ANALÝZA SYSTÉMU

V této kapitole nahlédneme na návratnost systému a obecně na jeho náklady a roční produkci. Systém je provozován od dubna 2017, původně s použitím 6 panelů Amerisolar a sady gelových baterií 4x 12 V 80 Ah, které byly využívány pouze z dvaceti procent z důvodu prodloužení jejich životnosti (uložení okolo 750 Wh energie). Po roce provozu došlo k rozšíření o 4 nové akumulátory PylonTech a 3 panely Canadian Solar. V tomto sestavení je elektrárna v provozu dodnes.

Celkové pořizovací náklady za elektrárnu byly 222 068 Kč včetně nákladů na instalaci panelů na střeche. Nebyly využity žádné dotace. Předpokládaná životnost systému je více než 20 let kromě akumulátorů. Dle informací výrobce akumulátorů je životnost okolo 6 000 cyklů, což odpovídá asi desetiletému provozu.

V *Tab. 7.1-1* je vidět spotřeba elektřiny z rozvodné sítě za jednotlivé zúčtovací období. V našem případě je zúčtovací období jednou ročně. Můžeme si zde všimnout, že po instalaci první části systému v roce 2017 došlo ke snížení spotřeby o 540 kWh, což při ceně 5,1 Kč/kWh odpovídá úspoře 2 754 Kč. Při porovnání spotřeby před instalací a po úplné instalaci v roce 2018 vidíme snížení spotřeby o 800 kWh, což odpovídá úspoře okolo 4 080 Kč. Veškeré úspory vznikají snížením nákupu energie a pokrývání vlastní spotřeby.

Období	Spotřeba od dodavatele [kWh]
4.2016-4.2017	1318
4.2017-4.2018	778
4.2018-4.2019	518
4.2019-4.2020	476

*Tab. 7.1-1 Spotřeba elektřiny od dodavatele za jednotlivé zúčtovací období*

Během instalace fotovoltaiky došlo i k instalaci nových elektrospotřebičů v bytě. Nově se elektřina využívá mimo ohřev teplé vody také pro vaření (nová indukční varná deska nahradila starý plynový sporák) a pro novou sušičku prádla.

Detailnější údaje o spotřebě a hlavně o výrobě monitoruje zařízení Smappee energy monitor. Pomocí proudových čidel měří spotřebu na vstupu do bytového rozvaděče ze sítě a dále měří energii vyrobenou fotovoltaikou. Smappee si pamatuje historii za poslední 2 roky. Zaměříme se tedy na rok 2019, kdy byl již systém v provozu v aktuální podobě. Záznam o spotřebě energie ze sítě a z fotovoltaiky je možné vidět na *Obr. 7.1-1*. Můžeme si povšimnout především rozdílů ve výrobě v jednotlivých měsících roku, kdy nejvýnosnější je měsíc červen s výrobou 312,18 kWh, zatímco nejhůře jsou na tom měsíce listopad, prosinec a leden, kdy výroba nepřekročila ani 100 kWh. Pro lepší přehled jsou hodnoty zapsány v *Tab. 7.1-2*.

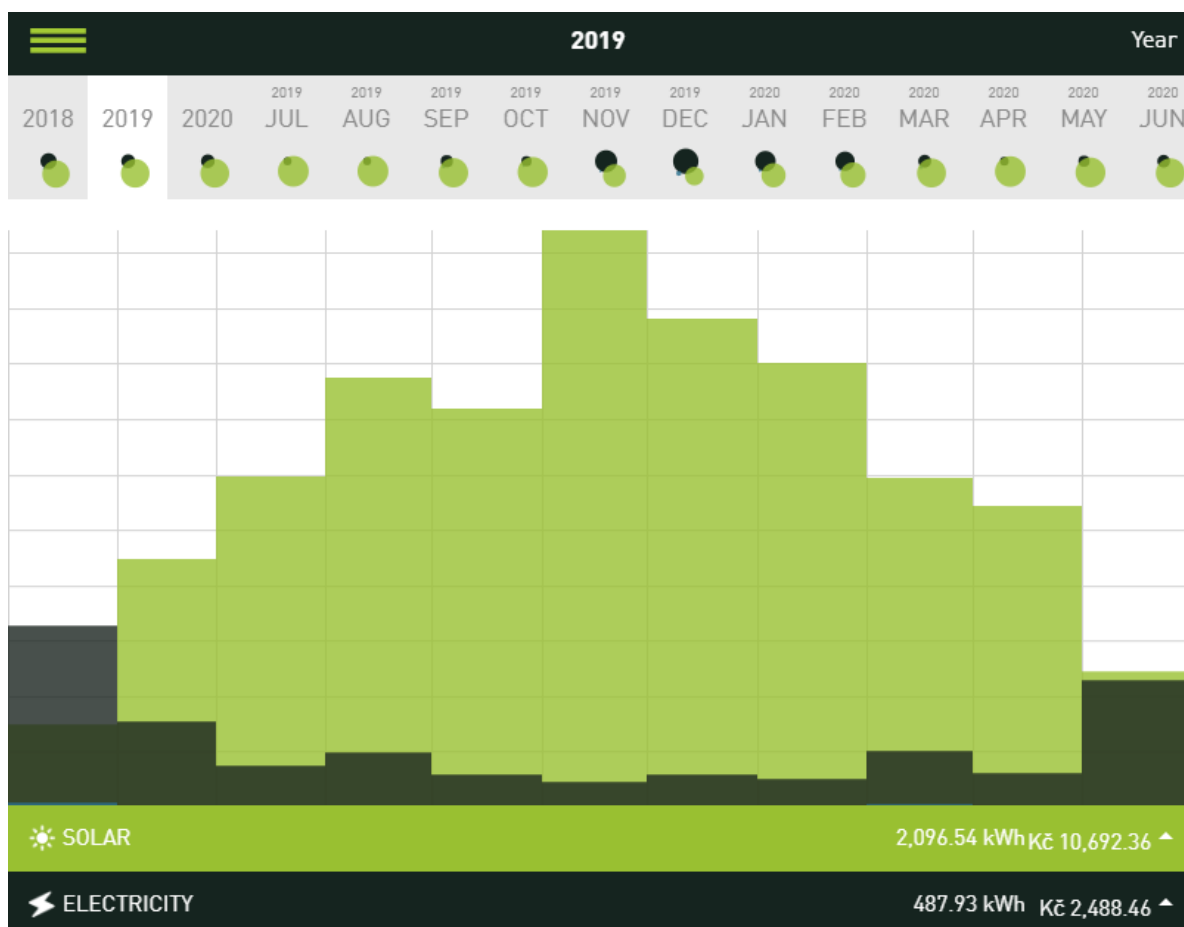
Pokud bychom počítali s nákupní cenou elektřiny 5,1 Kč/kWh, pak při vyrobených 2 096,54 kWh za rok 2019 došlo v tomto roce k úspoře 10 692 Kč. Návratnost systému tudíž vypočítáme podle vztahu (7.1). Vztah je zjednodušený, protože se neočekávají další provozní náklady během provozu. Vzhledem k tomu, že jsou dostupná data pouze za rok 2019, počítáme s výrobou (a tím i s výnosem) za tento rok. Výsledná návratnost se může zvýšit o náklady na nový akumulátor, ale zatím se neví jak dlouho budou stávající akumulátory použitelné a o jak rozsáhlou investici se bude v budoucnu jednat. Výsledná návratnost za předpokladu, že veškeré stávající komponenty budou celou dobu funkční je 20-21 let. Návratnost by bylo možné snížit například pomocí dotací, ale tím by se značně omezily možnosti pro budoucí rozšíření nebo upgrady systému.

$$T = \frac{IN}{V} \quad \left(\text{let}; \text{Kč}; \frac{\text{Kč}}{\text{rok}}\right) \quad (6.1)$$

$$T = \frac{222068}{10962} = 20 - 21 \text{ let}$$

Měsíc	Spotřeba z fotovoltaiky [kWh]	Spotřeba ze sítě [kWh]
Leden	44,87	98,00
Únor	134,42	46,43
Březen	178,98	22,24
Duben	232,31	29,33
Květen	215,47	17,68
Červen	312,18	13,23
Červenec	264,18	17,72
Srpen	240,69	15,56
Září	177,95	30,36
Říjen	163,19	18,42
Listopad	73,12	68,44
Prosinec	59,21	111,15

Tab. 7.1-2 Spotřeba elektřiny v jednotlivých měsících v roce 2019



Obr. 7.1-1 Záznam o spotřebě energie získaný ze zařízení Smappee z roku 2019

## ZÁVĚR

V práci jsme si vysvětlili jak se získávají materiály pro výrobu FV článků a panelů. Dále byly popsány výrobní postupy používané pro výrobu komponent FV panelů. Z těchto komponent se následně skládají jednotlivé FV panely, které se dále využívají ve FV elektrárnách.

Dále byly popsány další komponenty, které se využívají v kombinaci s FV panely ve FV systémech. Dělení FV systémů a vysvětlení jejich funkce podle způsobu jejich připojení na distribuční síť bylo rovněž popsáno.

V další kapitole jsou popsány jednotlivé defekty jak jednotlivých FV panelů tak i jiných komponent FV systému. Prevence těchto závad jsou důležité z několika důvodů, například zajištění vyšší spolehlivosti dodávky elektrické energie a maximalizace výnosů z provozu FV elektrárny.

Byly uvedeny parametry FV panelů, které charakterizují jednotlivé řady FV panelů a podle kterých se vybírají vhodné panely pro daný účel.

Pátá kapitola pojednává o provozní diagnostice FV elektrárny, která slouží právě k prevenci a odhalení závad FV systémů. Jsou zde zmíněny základy z normy ČSN EN 62446, která pojednává právě o této diagnostice. Jsou zde také vysvětleny jednotlivé zkoušky, které jsou normou popsáné.

V předposlední kapitole jsme se seznámili se zkoušeným systémem a došlo k samotnému praktickému testování FV systému a k následnému zhodnocení výsledků. Mezi provedené zkoušky patří vizuální prohlídka systému, která neodhalila žádné poškozené kabely, korozi konstrukce nebo poškození panelů. Dále byly měřeny izolační odpory kladných a záporných pólů jednotlivých stringů. Výsledné odpory mnohonásobně splňují podmínky normy, tudíž měření prokázalo, že panely normě vyhověly. Poslední měření bylo měření VA charakteristik jednotlivých stringů. Po porovnání VA charakteristik s charakteristikami od výrobců panelů bylo vidět, že jsou si značně podobné, tudíž panely fungují správně. Provozní diagnostika tak neprokázala žádné závady na systému a potvrdila jeho správnou funkčnost. Dále byla určena účinnost systému, která byla stanovena na 14,52%.

V poslední kapitole došlo ke zhodnocení vstupních nákladů s výnosy z výroby. Veškeré výnosy jsou v podobě úspor za neodebranou energii ze sítě. Výsledná návratnost investice byla stanovena na 20-21 let, za předpokladu, že všechny komponenty systému budou po tuto dobu v provozu. Jelikož ale akumulátory tuto dobu pravděpodobně nevydrží, bude v budoucnu potřeba je obměnit a tím se prodlouží doba návratnosti asi o 10 let (při stávající ceně akumulátorů). Systém nebyl primárně konstruován pro úspory nebo návratnost investice, ale spíše pro energetickou soběstačnost a pro získání zkušeností s fotovoltaikou.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] KUSALA, Jaroslav. Fotovoltaický jev. *Solární energie* [online]. 2006 [cit. 2019-12-11]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/f8.htm#model>
- [2] Fotovoltaika: Energie živlů. *W.E.B Větrná energie s.r.o.* [online]. [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: [http://www.vetrna-energie.cz/energie-zivlu/slunce\\_11](http://www.vetrna-energie.cz/energie-zivlu/slunce_11)
- [3] POULEK, Vladislav a Martin LIBRA. Konstrukce a výroba fotovoltaických článků a panelů. FCC PUBLIC [online]. 2010, 2010(3), 4 [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/40646.pdf>
- [4] LEVY, Debra. What Is The Float Glass Process? Glass.com: The Industry's Home Address [online]. 1.7.2016 [cit. 2019-12-14]. Dostupné z: <https://info.glass.com/what-is-the-float-glass-process/>
- [5] How Is Tempered Glass Made? Techni-Glass: TOMORROW'S INNOVATIONS TODAY [online]. [cit. 2019-12-14]. Dostupné z: <https://www.techni-glassinc.com/2019/01/how-is-tempered-glass-made/>
- [6] MORAVEC, Jan. Zpracování hliníku: Od minerálu až po kabel. OEnergetice.cz [online]. 29.9.2015 [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/zpracovani-hliniku-od-mineralu-az-po-kabel>
- [7] , The Editors of Encyclopaedia Britannica. Polyethylene: 15.11.2019. ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA [online]. [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/polyethylene#ref1049325>
- [8] Solar Panel with EVA Film Manufacturing Procedure-Silicone Sheet Ethylene Vinyl Acetate EVA. In: Youtube [online]. 14.11.2010 [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=lqHclYEEj50>
- [9] Understanding the PN Junction. CIRCUITS TODAY [online]. 21.7.2014 [cit. 2019-12-16]. Dostupné z: <http://www.circuitstoday.com/understanding-the-pn-junction>
- [10] ABUŠINOV, Alexandr. Plasty se podílejí na solárním boomu. MM spektrum: Odborně-vzdělávací a zpravodajský portál z oblasti strojírenství a navazujících oborů [online]. 3.3.2010 [cit. 2019-12-17]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/plasty-se-podileji-na-solarnim-boomu.html>
- [11] BENDA, Vítězslav, Kamil STANĚK a Petr WOLF. Fotovoltaické systémy: Učební text k semináři. Centrum pro rozvoj výzkumu pokročilých řídicích a senzorických technologií [online]. 15.4.2011 [cit. 2019-12-19]. Dostupné z: [http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura\\_04\\_1104.pdf](http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_04_1104.pdf)
- [12] KUSALA, Jaroslav. Solární (fotovoltaické) články. *Solární energie* [online]. 2006, 2006 [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k32.htm>
- [13] Autonomní systémy. Silekto energy [online]. [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://www.silekto.cz/solarni-elektrarny/reseni/autonomni-systemy>
- [14] Fotovoltaická elektrárna. Silekto energy [online]. [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://www.silekto.cz/solarni-elektrarny/reseni/solarni-elektrarny>
- [15] Hybridní fotovoltaická elektrárna. Silekto energy [online]. [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://www.silekto.cz/solarni-elektrarny/reseni/hybridni-fve>
- [16] Fotovoltaické systémy pro výrobu elektřiny. Czech Nature Energy, a. s.: Slunce vyjde i zítra... [online]. Plzeň [cit. 2019-12-26]. Dostupné z: <http://www.cne.cz/fotovoltaicke-systemy/uvod-do-fv-systemu/>

- [17] BAŘINKA, Radim. FOTOVOLTAIKA A FOTOVOLTAICKÉ SYSTÉMY V PODMÍNKÁCH ČR A JEJICH NAVRHOVÁNÍ [online]. 120 000 Praha 2, Vinohradská 8: Česká energetická agentura, s. 13-23 [cit. 2019-12-27]. Dostupné z: [https://www.mpo-efekt.cz/dokument/98\\_8050.pdf](https://www.mpo-efekt.cz/dokument/98_8050.pdf)
- [18] HAUNSCHILD, Jonas. QUALITY CONTROL OF CZOCHRALSKI GROWN SILICON WAFERS IN SOLAR CELL PRODUCTION USING PHOTOLUMINESCENCE IMAGING. In: ResearchGate: Find and share research [online]. [cit. 2019-12-28]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/PL-images-of-two-finished-solar-cells-Sample-A-resulted-in-183-efficiency-and-shows\\_fig1\\_257920025](https://www.researchgate.net/figure/PL-images-of-two-finished-solar-cells-Sample-A-resulted-in-183-efficiency-and-shows_fig1_257920025)
- [19] MAČÁT, Jakub. VLIVY OVLIVŇUJÍCÍ DEGRADACI INSTALOVANÉHO VÝKONU FOTOVOLTAICKÉ ELEKTRÁRNY. Brno, 2015. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.
- [20] KLADIVA, Roman. DLOUHODOBÉ SLEDOVÁNÍ PARAMETRŮ FOTOVOLTAICKÝCH PANELŮ. Brno, 2013. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE. Vedoucí práce Ing. Roman Gvritshvili.
- [21] INDRA, Jiří. DEGRADACE SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ SVĚTLEM. Brno, 2010. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.
- [22] LAHKÝ, Martin. Pokles výkonu fotovoltaických elektráren v důsledku vysokonapětového stresu: Další rána pro majitele solárních elektráren. Tzbinfo: Nejnavštěvovanější odborný portál pro stavebnictví a technická zařízení budov [online]. Topinfo, 2001, 26.1.2015 [cit. 2019-12-28]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/12260-pokles-vykonu-fotovoltaickych-elektren-v-dusledku-vysokonapetoveho-stresu>
- [23] BECHNÍK, Bronislav. Recyklace fotovoltaických panelů na konci životnosti. Tzbinfo: Nejnavštěvovanější odborný portál pro stavebnictví a technická zařízení budov [online]. Topinfo, 2001, 26.9.2011 [cit. 2019-12-29]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/7868-recyklace-fotovoltaickych-panelu-na-konci-zivotnosti>
- [24] TOMEŠ, Milan. Zkušenost soudního znalce z posuzování FVE v roce 2011: 1. část. ELEKTRO [online]. 2012, 4/2012, 2012(4), 62-64 [cit. 2019-12-29]. Dostupné z: <http://uniesoudnichznalcu.cz/public/media/files/e04-2012.pdf>
- [25] TOMEŠ, Milan. Zkušenost soudního znalce z posuzování FVE v roce 2011: 2. část - dokončení. ELEKTRO [online]. 2012, 5/2014, 2012(5), 62-64 [cit. 2019-12-29]. Dostupné z: <http://uniesoudnichznalcu.cz/public/media/files/e05-2012.pdf>
- [26] JAKUBES, Jaroslav. Fenomén „Snail Trails“ / „šnečí cestičky“: – je ohrožen výkon FVE? Tzbinfo [online]. Topinfo, 2001, 8.9.2012 [cit. 2019-12-29]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/9020-fenomen-snail-trails-sneci-cesticky>
- [27] Silekro s.r.o. Ztráty a rizika provozu fotovoltaické elektrárny. Nalezeno.cz: Chytrá řešení pro každého [online]. Narrative Media, 22.6.2011 [cit. 2019-12-29]. Dostupné z: <https://www.nazeleno.cz/energie/fotovoltaika/ztraty-a-rizika-provozu-fotovoltaicke-elektarny.aspx>

- 
- [28] ČSN EN 62446: Fotovoltaické systémy spojené s elektrorozvodnou sítí - Minimální požadavky na systémovou dokumentaci, zkoušky při uvádění do provozu a kontrolu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [29] EICERO s.r.o. Detekce vad u fotovoltaických panelů. Tzbinfo: Nejnavštěvovanější odborný portál pro stavebnictví a technická zařízení budov [online]. Topinfo, 2001, 10.12.2018 [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/18366-detekce-vad-u-fotovoltaickych-panelu>
- [30] SEZNAM.CZ, A.S. In: Seznam.cz [online]. Praha, 1996, 2018 [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: <https://mapy.cz/zakladni?x=17.8889479&y=49.9405812&z=20&l=0&base=ophoto>
- [31] PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM [online]. [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/tools.html#MR](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#MR)