

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Možnosti zvýšení výkonu a využití vyrobené energie  
z malých fotovoltaických elektráren**

**Vedoucí práce:** Ing. Stanislav Jiřinec

**Autor práce:** Bc. David Ranc

2016

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2015/2016

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

Jméno a příjmení: **Bc. David RANC**  
Osobní číslo: **E14N0070P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektroenergetika**  
Název tématu: **Možnosti zvýšení výkonu a využití vyrobené energie z malých  
fotovoltaických elektráren**  
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Zmapujte hlavní příčiny sníženého výkonu malých fotovoltaických elektráren.
2. Proveďte dlouhodobé měření vlivu hydrofobního prostředku aplikovaného na fotovoltaické panely a zhodnoťte.
3. Proveďte analýzu možností akumulace vyrobené elektrické energie pro rodinný dům.
4. Proveďte praktickou realizaci navrženého systému.
5. Zhodnoťte kritériem 3E.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:


Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Stanislav Jiřinec**  
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2015**  
Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2016**

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



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

V Plzni dne 15. října 2015

## **Abstrakt**

Předložená diplomová práce mapuje různé druhy defektů fotovoltaických článků i panelů. V práci je zhodnoceno porovnání výroby elektrické energie ze dvou různě ošetřených stringů malé fotovoltaické elektrárny. V závěrečné části práce se nachází návrh optimalizace přetoků do distribuční sítě využitím solid state relé, které je řízeno programovatelným obvodem.

## **Klíčová slova**

Fotovoltaika, solární článek, fotovoltaický panel, string, solární elektrárna, defekt, solid state relé, MODBUS.

## **Abstract**

The master thesis examines different types of defects which may occur on photovoltaic panels and cells. The comparison of generated electrical energy from two differently treated strings is evaluated in the thesis. In the final part is the design of optimization of overflows into a distribution network using solid state relay which is operated by programmable controller.

## **Key words**

Photovoltaics, solar cell, photovoltaic panel, string, solar power plant, defekt, solid state relay, MODBUS.

## 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 Hůrkách dne 16.5.2016

David Ranc

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval předně svému vedoucímu práce panu Ing. Stanislavu Jiřincovi za velmi cenné rady a odbornou pomoc při tvorbě této práce. Poděkování patří také panu Ing. Jakubovi Jiřincovi za jeho čas a rady při tvorbě praktické části. Dále bych rád poděkoval své rodině a přítelkyni za morální podporu.

## Obsah

ÚVOD.....	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	10
<b>1 VYMEZENÍ ZÁKLADNÍCH POJMŮ .....</b>	<b>11</b>
1.1 HISTORIE .....	11
1.2 FOTOELEKTRICKÝ JEV .....	12
1.3 FOTOVOLTAICKÝ ČLÁNEK .....	13
1.4 ROZDĚLENÍ SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ .....	14
1.4.1 Monokrystalické křemíkové články .....	14
1.4.2 Polykrystalické křemíkové články .....	15
1.4.3 Amorfni křemíkové články .....	15
1.5 FOTOVOLTAICKÝ PANEL.....	16
1.5.1 Zapojení solárních článků do FV panelů .....	17
1.5.2 Parametry FV panelu .....	18
<b>2 PŘÍČINY SNÍŽENÍ VÝKONU FVE.....</b>	<b>19</b>
2.1 PORUCHY SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ.....	19
2.1.1 Vírový defekt.....	20
2.1.2 Chyba při sítotisku.....	20
2.1.3 Mechanické poškození .....	21
2.1.4 Nehomogenita difúzní vrstvy.....	21
2.1.5 Materiálové pnutí .....	22
2.1.6 Skrytý lom .....	22
2.1.7 Neobroušené hrany.....	23
2.1.8 Prachové částice.....	23
2.2 PORUCHY SOLÁRNÍCH PANELŮ .....	24
2.2.1 Vysokonapěťový stres .....	24
2.2.2 Horká místa, neboli „Hot spots“ .....	25
2.2.3 Šnečí cestičky, neboli „Snail trails“ .....	26
2.2.4 Zastínění panelů .....	28
2.2.5 Delaminace.....	29
2.2.6 Kabelové rozvody.....	30
2.2.7 Jištění.....	30
<b>3 FOTOVOLTAICKÝ STŘÍDAČ .....</b>	<b>31</b>
<b>4 HYBRIDNÍ FVE .....</b>	<b>32</b>
4.1 ČÁSTI HFVE .....	33
4.2 AKUMULÁTORY .....	33
4.2.1 Výhody $LiFePO_4$ akumulátorů .....	34
4.2.2 Nevýhody $LiFePO_4$ akumulátorů .....	35
4.3 FV OHŘEV VODY .....	35
<b>5 PARAMETRY FVE V DOMAŽLICÍCH .....</b>	<b>37</b>
5.1 POROVNÁNÍ VYROBENÉ ENERGIE ZE DVOU STRINGŮ.....	39
5.2 SNÍMKOVÁNÍ FVE TERMOVIZNÍ KAMEROU .....	42
<b>6 OPTIMALIZACE PŘETOKŮ DO DISTRIBUČNÍ SÍTĚ .....</b>	<b>43</b>
6.1 SOLID STATE RELAY .....	44
6.2 APLIKACE PLC C-PRO3 NODE KILO .....	46
6.3 KOMUNIKAČNÍ PROTOKOL MODBUS .....	47
6.4 PROGRAMOVACÍ PROSTŘEDÍ UNI-PRO .....	49
6.5 PRAKTICKÁ REALIZACE REGULACE PŘEBYTKŮ Z FVE.....	51
6.6 ZHODNOCENÍ 3E.....	53
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>55</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....</b>	<b>56</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>58</b>
<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>59</b>



## Úvod

Fotovoltaika je hi-tech odvětví s progresivním růstovým potenciálem, jejíž hlavní výhodou je stálost výroby elektrické energie. Fotovoltaika zažívá momentálně světový rozmach. Země Evropské unie se snaží tuto technologii podporovat tzv. „zelenými bonusy“, aby tak zvýšily využití obnovitelných zdrojů v důsledku vzrůstající energetické závislosti mnoha zemí. Právní úprava poskytnuté finanční kompenzace (daňová úleva, dotace) vychází ze směrnice EU 77/2001 EC. Nejen země EU jako třeba Německo, ale i např. USA a Japonsko podporují různými programy užití fotovoltaiky v běžných domácnostech. V nedávné době vyšla již třetí výzva z podprogramu Nová zelená úsporám - oblast rodinné domy, ve které je možné získat podporu pro stavbu malé fotovoltaické elektrárny.

Cena energií se v blízké budoucnosti určitě nebude dramaticky snižovat. Tato skutečnost povede k tomu, že se lidé budou snažit stát energeticky nezávislími například tím, že na střechy svých rodinných domů začnou montovat fotovoltaické (solární) panely. Vyrobenou elektrickou energii mohou využít pro vlastní spotřebu, pro ohřev užitkové vody a přebytky prodávat, i přestože výkupní cena bude nízká. Výstavba fotovoltaické elektrárny by měla být co nejefektivnější, ale v současné době se solární panely potýkají s řadou problémů a defektů, které výrazně ovlivňují jejich výkon a účinnost. Moje diplomová práce se v teoretické části zabývá analýzou těchto vad a řešením jejich eliminace.

Praktická část je věnována snímkování jednotlivých FV panelů termokamerou, což má napomoci k zjištění, zdali se nenachází na panelech vady. Ve druhé části se porovnává získaná energie ze dvou různých stringů, přičemž jeden je pouze umyt a druhý ošetřen hydrofobním nátěrem. Třetí část spočívá v naprogramování PLC na řízení Solid State Relay, které při dostatečném výkonu panelů posílá část vyrobené energie do odporového ohřívače v nádrži na užitkovou vodu.

## Seznam symbolů a zkratek

Zkratka	Popis	Jednotky
E	Energie fotonu	eV - elektronvolt
$P_{MPP}$	Jmenovitý výkon panelu	Wp – Wattpeak
$U_{MPP}$	Napětí při jmenovitém výkonu	V – Volt
$I_{MPP}$	Proud při jmenovitém výkonu	A – Ampér
$U_{OC}$	Napětí naprázdno	V – Volt
$I_{SC}$	Proud nakrátko	A - Ampér
$I_{MOD REVERSE}$	Maximální dovolený závěrný proud panelu	A - Ampér

Zkratka	Popis
FV	Fotovoltaika
FVE	Fotovoltaická elektrárna
FVS	Fotovoltaický systém
Wp	Wattpeak
STC	Standard Test Condition
MPP	Maximum Power Point
MPPT	Maximum Power Point Tracker
IME	Instrumenti Misure Elettriche
SSR	Solid State Relay
MODBUS	Komunikační protokol
RS-485	Standard sériové komunikace
PLC	Programmable logic controller

**STC** – (Standard Test Condition) standardní testovací podmínky, za nichž jsou měřeny charakteristiky fotovoltaických panelů a článků, tj. intenzita záření  $1000 \text{ W/m}^2$  a teplota panelu  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**MPP** – (Maximum Power Point) bod maximálního výkonu je pracovní bod, ve kterém dodává fotovoltaický panel maximální výkon. MPP se mění v závislosti na intenzitě dopadajícího slunečního záření a na teplotě panelu.

**MPPT** – (Maximum Power Point Tracker) sledovač bodu maximálního výkonu je zařízení, které zvyšuje výnos energie tím, že zajišťuje, aby fotovoltaický panel pracoval stále v blízkosti bodu maximálního výkonu. MPPT je obvykle součástí střídače nebo regulátoru nabíjení, může však být i samostatně.

# 1 Vymezení základních pojmů

Slovo fotovoltaika se skládá ze dvou částí, první je řeckého původu φώς [phos] – světlo, druhé pochází ze jména italského fyzika Alessandra Volty. Fotovoltaika pracuje na základě přeměny slunečního záření na elektrickou energii. Fyzikálním principem celého procesu je fotoelektrický jev, případně fotovoltaický jev. [1]

## 1.1 Historie

Objev fotoelektrického jevu je nejčastěji připisován francouzskému fyzikovi Alexandru Edmondu Becquerelovi a jeho otci Antoine César Becquerelovi, kteří dokázali popsat vnější fotoelektrický jev, u něhož napětí nevzniká v důsledku působení světla, nýbrž se pouze mění proud, který se generuje působením vnějšího napětí mezi dvěma elektrodami ponořenými do elektrolytu. Důkladnější popis předložil německý fyzik Heinrich Hertz, když na svém aparátu pro generování a detekci elektromagnetických vln upozoroval nevysvětlitelné chování elektromagnetického vlnění při dopadu na povrch kovu za různého osvětlení. V roce 1905 byl vnější fotoelektrický jev (fotoemise) popsán Albertem Einsteinem, který za svoji práci obdržel v roce 1921 Nobelovu cenu. Při fotovoltaickém jevu se elektron neuvolní z látky, ale stává se z něho volný elektron v látce (vnitřní fotoelektrický jev).

První funkční fotovoltaický článek byl vyroben v roce 1883 americkým vědcem Charlesem Frittssem, který potáhl polovodivý selen velmi tenkou vrstvou zlata. Tento článek dosahoval účinnosti pouze 1%. K opravdovému rozvoji fotovoltaiky došlo až po druhé světové válce, kdy byl patentován první křemíkový fotovoltaický článek (v roce 1946). Účinnost těchto článků se pohybovala okolo 6%, jejich výroba byla příliš nákladná. Fotovoltaické články zaznamenaly velký úspěch hlavně v oblasti nově vyvíjených kosmických programů v 60. letech 20. století. Nově vytvořené solární panely sloužily jako nenahraditelný zdroj energie pro kosmické družice. Dalším historickým milníkem pro solární elektrárny byla ropná krize v 70. letech 20. století, kdy se pomalu začínalo spekulovat o nahrazení fosilních paliv obnovitelnými zdroji. [1] [3]

## 1.2 Fotoelektrický jev

Nejdůležitějšími faktory při přeměně energie slunečního záření na energii elektrickou jsou volné elektrony a elektrický potenciál, jenž uvede volné elektrony do pohybu. Při vnitřním fotoelektrickém jevu, kdy elektromagnetické záření dopadá na křemíkový polovodič s P-N přechodem, dochází k pohlcování fotonových částic a uvolňování elektronů z krystalové mřížky polovodičů. Tento jev se také nazývá *fotovoltaický*. Vnější fotoelektrický jev probíhá pouze na povrchu látky a vlivem elektromagnetického záření jsou elektrony uvolňovány do okolí látky. V polovodiči pak vznikají volné elektrické náboje (elektrony), které v elektrickém obvodu tvoří stejnosměrný elektrický proud. Uvolněné elektrony jsou nazývány *fotoelektrony* a proces uvolňování *fotoelektrická emise*. Na P-N přechodu se tak vytváří elektrické napětí. [2]

Podle Einsteinovy a Planckovy teorie se všechna elektromagnetická záření šíří od zdroje jako tok částic, které se nazývají fotony. Tato záření jsou generována i pohlcována nespojitě, v určitých kvantech energie. Při dopadu monofrekvenční vlny mají všechny emitované elektrony stejnou energii. Při zvyšování intenzity dopadajícího vlnění se nemění energie emitovaných elektronů, ale zvyšuje se jejich počet. Z následujícího vztahu je patrné, že energie fotonu je nepřímo úměrná vlnové délce záření. [2]

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \text{ [eV]} \quad [1.1]$$

kde

$h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  J.s ... Planckova konstanta

$c = 300\,000$  km/s ... rychlost světla

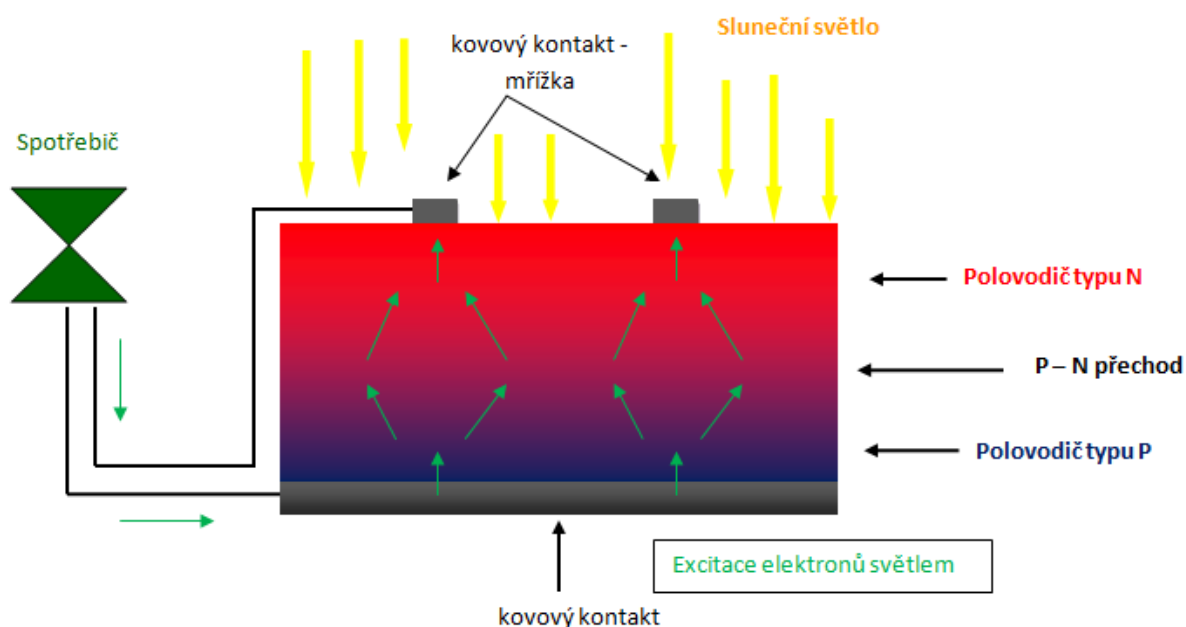
$\lambda$  [nm]... vlnová délka záření

Aby došlo k uvolnění elektronu z krystalové mřížky, musí mít fotony energii alespoň 1,12 eV, čemuž odpovídá tzv. *mezní vlnová délka* 1105 nm, která se řadí do infračerveného záření. Záření o kratší vlnové délce má tedy větší energii a je schopné vyvolat fotovoltaický jev. Naproti tomu záření s větší vlnovou délkou, do kterého se řadí např. mikrovlny, nemají dostatečnou energii pro uvolnění elektronu z mřížky. [3]

### 1.3 Fotovoltaický článek

Fotovoltaický článek je polovodičová součástka, která přeměňuje dopadající záření na elektrickou energii. Principem připomíná polovodičovou diodu, protože základem moderních článků je tenká křemíková destička. Ta je tvořena polovodičem typu P a N, které se od sebe liší různým dotováním jiného prvku (vrstva P je kladně dotovaná bórem, galiem nebo indiem, vrstva N je záporně dotovaná fosforem nebo arsenem). Obě vrstvy jsou odděleny tzv. P-N přechodem, který vede elektrický proud pouze jedním směrem. [4]

Osvětlením článku vznikne v polovodiči vnitřní fotoelektrický jev a vlivem dopadajícího záření jsou uvolňovány elektrony a po připojení spotřebiče se začnou záporné a kladné náboje vyrovnávat, čímž vznikne v obvodu elektrický proud.



Obr. 1 - Princip činnosti fotovoltaického článku

Napětí jednoho článku vyrobeného z krystalického křemíku se pohybuje okolo 0,5 V a u vícevrstvých článků až po jednotky voltů. Rozměry jednoho článku jsou obvykle 10x10 cm. Velikost procházejícího proudu je přímo úměrná ploše fotovoltaického článku a intenzitě dopadajícího elektromagnetického záření. Ve většině případů je nutné vytvořit daleko větší napětí nebo proud pro napájení větších spotřebičů. To lze zajistit sérioparalelním sestavením jednotlivých článků, a tak skládáním vzniká fotovoltaický panel. [4]

## 1.4 Rozdělení solárních článků

V dnešní době jsou nejvíce rozšířeny fotovoltaické články na bázi křemíku, neboť právě křemík je velmi výhodným materiálem pro jejich stavbu. Křemík, jako druhý nejrozšířenější prvek v zemské kůře, je relativně levný a lehce dostupný. Navíc jeho použití v oboru solární energetiky je nejpraktičtější. Křemík dokáže totiž nejlépe absorbovat elektromagnetické záření ve viditelném spektru. V přírodě se většinou vyskytuje ve formě křemene (oxidu křemičitého –  $\text{SiO}_2$ ). Surový křemík se vyrábí z křemenného písku redukcí uhlíkem v obloukové peci. Při výrobě monokrystalického článku je písek nejprve zbaven nečistot a poté přepracován na monokrystal křemíku Czochralského metodou. U polykrystalických článků se horký křemík odlévá do forem a pomalu se chladí. V průběhu tuhnutí dochází k vytvoření rozdílně orientovaných a různě velkých krystalů, což dodává polykrystalickým článkům charakteristickou strukturu. [1]

Dnes se využívají tzv. drátové řezačky, které umožňují nařezat destičky o tloušťce 100  $\mu\text{m}$ . Polotovary z jiných materiálů, než je křemík, se vyrábějí obdobným způsobem. Podle technologie výroby se články dělí na monokrystalické, polykrystalické a amorfni. Existují i různé speciální druhy modulů, ale ve své práci se zabývám jen nejvíce využívanými.

Difúze příměsí pro vytvoření PN přechodu probíhá v difúzních pecích. Na přední stranu se dává antireflexní úprava, která minimalizuje odraz světla a využije se tak maximum dopadajícího záření. Přední kontakt bývá ve tvaru mřížky nebo hřebínku, aby zakrytá plocha článku byla co nejmenší, zadní kontakt je zpravidla celoplošný. Kontakty se nejčastěji nanášejí sítotiskem, případně vakuovými technologiemi. [1]

### 1.4.1 Monokrystalické křemíkové články

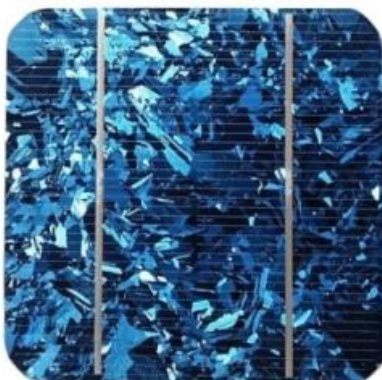
Patří mezi nejstarší typ vyráběných článků. Jejich výroba probíhá výše uvedenou Czochralského metodou. Do taveniny o teplotě  $1415^\circ\text{C}$  se vnoří malý monokrystal. Z taveniny se posléze pomalu vytahuje a nechává se přitom otáčet kolem podélné osy. Tažením vznikne monokrystalický ingot s průměrem až 400 mm a délkou okolo 2 m. Ingot je přitom tvořen pouze z jediného krystalu křemíku. Výhody monokrystalického křemíku jsou největší účinnost ze stejné plochy při dostatečném osvětlení (14 – 17 %), pomalejší stárnutí křemíku a struktura je homogenní – panely nemají na první pohled „fleký“. [1]



Obr. 2 – Monokrystalický článok

### 1.4.2 Polykrystalické křemíkové články

Výroba polykrystalických ingotů je jednodušší. Roztavený materiál se nalije do formy a nechá se volně vykrytalizovat, ochladit a následně slisovat v jeden celek. Je důležité, aby chladnutí nebylo příliš rychlé, neboť by mohlo dojít k poruchám ve struktuře či dislokacím. Na samotném článku jsou patrné jednotlivé přechody mezi krystaly, které mohou při nedokonalé výrobě vytvořit pro elektrony potenciálové bariéry. Oproti monokrystalickým článkům mají menší účinnost (13 – 16 %), ale dokážou lépe zpracovávat rozptýlené záření (nepříznivé světelné podmínky). [1]



Obr. 3 – Polykrystalický článok

### 1.4.3 Amorfni křemíkové články

Tyto články se liší od předchozích již v samotné výrobě. Namísto tažení ingotů a tavení se amorfni články vyrábějí ve vakuové komoře za teploty cca 200°C napařováním amorfniho křemíku na plastovou, kovovou či skleněnou desku. Bývají označeny jako

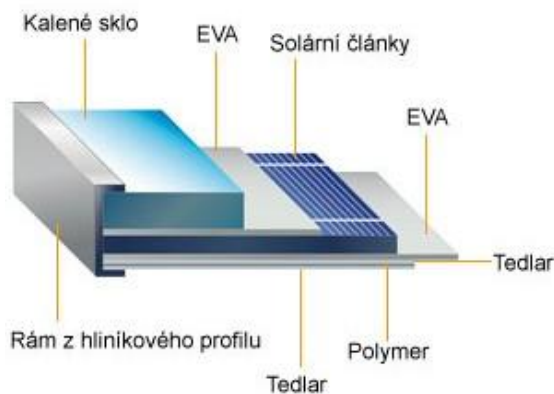
tenkovrstvá technologie, protože oproti monokrystalickým či polykrystalickým (0,3 mm) článkům se jejich tloušťka pohybuje okolo jednotek mikrometrů. Díky této tloušťce lze články používat v místech, kde je zapotřebí flexibilita a ohebnost. Přední výhodou amorfního křemíku oproti krystalickému je, že netrpí tolik na letní přehřívání. Jeho účinnost je ze všech tří technologií nejnižší (přibližně poloviční), ovšem klesá daleko pomaleji s rostoucí teplotou. Proto je z amorfních panelů v letních měsících lepší výtěžnost výkonu. Mají sice nejmenší účinnost (5 – 7%). Ale lepší citlivost na rozptýlené záření než polykrystalický článek. [5]



Obr. 4 – Amorfni článek

## 1.5 Fotovoltaický panel

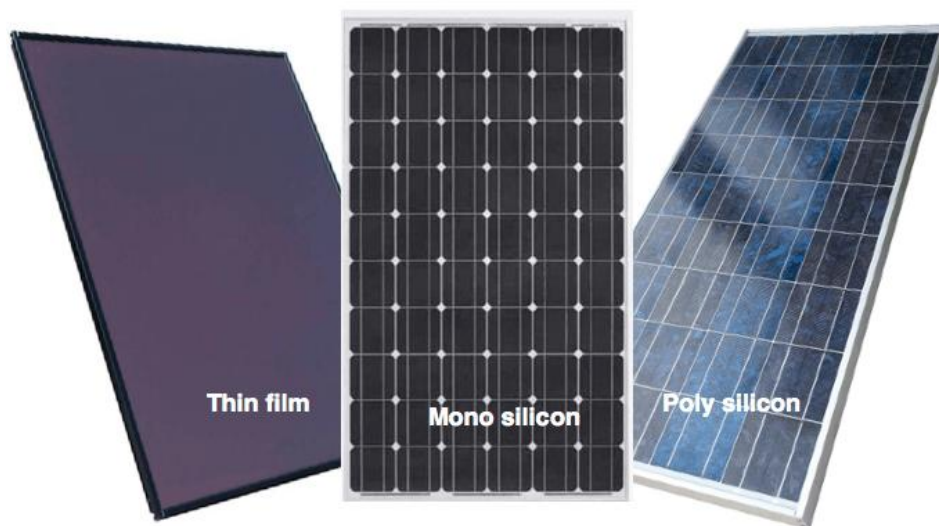
Základní samostatná výrobní jednotka složená obvykle z 60 nebo 72 článků. Solární články, které jsou popsány v předcházejících kapitolách, poskytují napětí přibližně 0,5 – 0,7 V, což je pro běžné použití nízká hodnota. Díky tomu se jednotlivé články spojují do fotovoltaických panelů. Na následujícím obrázku je možné vidět řez FV panelem. [6]



Obr. 5 – Řez FV panelem



Je nutné články hermeticky zapouzdřit do panelu, aby byly chráněny proti okolním mechanickým vlivům, klimatickým podmínkám, ale také kvůli lepší manipulaci a zapojení do fotovoltaického systému. [6]



Obr. 6 – Různé druhy panelů (zleva – amorfní, monokrystalický a polykrystalický)

### 1.5.1 Zapojení solárních článků do FV panelů

Fotovoltaické články lze zapojit sériově, paralelně či sério-paralelně. Pokud se články řadí do série, je nutné, aby měly shodné parametry. Sériové zapojení zvyšuje výstupní napětí a zachovává výstupní proud, který je roven proudu jednoho článku. Sériové zapojení se převážně využívá u systému, který dodává energii do rozvodné sítě. Paralelní zapojení zvyšuje maximální odebíraný proud při stejném výstupním napětí jednotlivého článku. Pokud požadujeme přesný výkon, lze zapojení článků kombinovat a nastavit tak přesnou hodnotu napětí a proudu. Paralelní zapojení se využívá pouze v místech, kde je nutné zachovat stálé napětí (např. u akumulátorů). Větší FV elektrárny se zapojují sério-paralelně, například na polích. [6]

Je také nutné, aby se při výstavbě solárního systému vzájemně spojovaly pouze panely od jednoho výrobce, který často definuje, jaký maximální počet lze propojit pro zachování jejich definovaných vlastností. Zapojení fotovoltaických panelů se provádí tak, aby výstupní parametry panelů nepřesáhly vstupní parametry střídače. Větší FV elektrárny se staví na maximální napětí 1000 V na jednom stringu. [6]

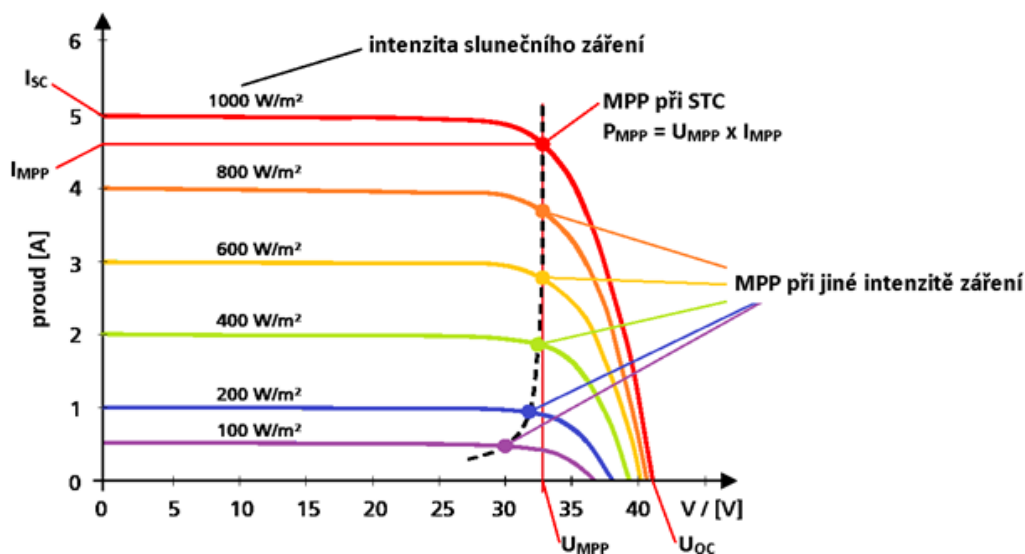
### 1.5.2 Parametry FV panelu

Výkon FV panelu se uvádí ve wattech špičkového výkonu ( $W_p$  – Watt peak) za standardních testovacích podmínek (STC). Skutečný výkon, který panel dokáže generovat, závisí hlavně na intenzitě dopadajícího slunečního záření a na úhlu dopadu paprsků. Intenzita dopadajícího slunečního záření se udává ve wattech na metr čtvereční ( $W/m^2$ ). Voltampérová charakteristika FV panelu je na obrázku (Obr. 7). [7]

Štítkové hodnoty panelu jsou jmenovité hodnoty, které byly změřeny za standardních testovacích podmínek (STC). Mezi tyto hodnoty patří:

- $P_{MPP}$  – jmenovitý výkon panelu [Wp]
- $U_{MPP}$  – napětí při jmenovitém výkonu [V]
- $I_{MPP}$  – proud při jmenovitém výkonu [A]
- $U_{OC}$  – napětí naprázdno [V]
- $I_{SC}$  – proud nakrátko (největší proud, který je panel schopný dodat) [A]
- $I_{MOD\ REVERSE}$  – maximální dovolený závěrný proud panelu [A]
- **Max. System Voltage** – nejvyšší systémové napětí udávající počet panelů, které mohou být zapojeny do jednoho stringu

Zkratový proud  $I_{SC}$  bývá jen o 10 – 20 % vyšší než provozní proud  $I_{MPP}$ . Pro FV panel nepředstavuje zkratový proud velkou hrozbu. Stejnoseměrné kabely, které propojují panely se vstupem střídače a střídavé rozvody propojující střídač se sítí se navrhují tak, aby průřez vyhovoval zkratovým poměrům. [7]



Obr. 7 – Voltampérová charakteristika solárního panelu

## 2 Příčiny snížení výkonu FVE

Snahou každého konstruktéra je maximální výkon a efektivita konstruovaného zařízení. Máme-li možnost volit orientaci panelů a jejich sklon, volíme tak, aby přední strana směřovala k jihu a sklon podle zeměpisné šířky byl takový, aby v poledne dopadaly sluneční paprsky kolmo k přední ploše panelů. Toto základní pravidlo lze doplnit mnoha dalšími konstrukčními úpravami:

- Použití oboustranných panelů, kde je využíváno i záření odražené od terénu.
- Změny nastavení panelů pro zimní a letní provoz.
- Využití pohyblivých stojanů (tracker), které obsahují zařízení schopné sledovat pohyb Slunce na obloze a natáčet kolektor po celý den kolmo ke směru slunečního záření.
- Koncentrace záření pomocí rovinných či parabolických zrcadel.

Takto lze nejčastěji zvýšit efektivitu výroby solárních panelů, ale i přes všechna možná opatření se můžeme v praxi setkat s defekty, které výrazně ovlivňují výkon solárních systémů. Nejčastější defekty fotovoltaických panelů či článků vznikají již v počátečním zpracování křemíku či posléze v technologickém procesu při výrobě. Neznamena to však, že by panel byl při nějaké poruše nefunkční, jsou pouze negativně ovlivněny jeho vlastnosti.

### 2.1 Poruchy solárních článků

Poruchy solárních článků se dělí do dvou částí – *procesní* a *materiálové* defekty. Mezi procesní defekty se například řadí mechanická poškození, která vznikají při technologickém zpracování křemíku. Především se jedná o poškrábaný povrch, okrajová štípnutí nebo neobroušené hrany solárního článku.

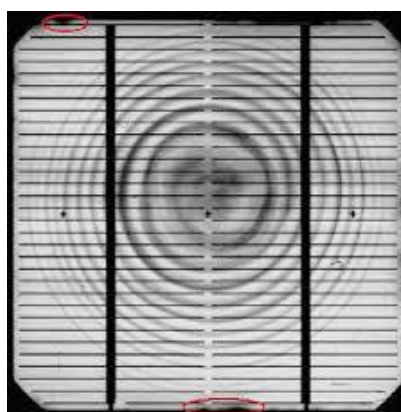
Materiálové defekty vznikají již při výrobě křemíku. Nejčastější defekt se nazývá vírový, který se může objevit po injekci příměsi do křemíku.

Vady, které zhoršují účinnost či vlastnosti křemíkových fotovoltaických článků, mají charakter poruchy krystalické mřížky a lze je určit pomocí měřících metod LBIV, LBIC, elektroluminiscence, termokamerou, vizuálně, atd. Metody LBI (Light Beam Induced) jsou v překladu metody lokálního ozařování, kdy paprsek skenuje povrch solárního článku a za pomoci měřícího zesilovače signálu je odražený paprsek snímán, čímž se vytvoří mapa

odezvy měřeného článku na daný paprsek. Rozdělení na LBIV a LBIC (případně LBIP) se váže k poslednímu písmenu zkratky, které udává hlavní měřící veličinu – Voltage, Current, Power. [8]

### 2.1.1 Vírový defekt

Jedná se o poruchu, která má podobu soustředěných kružnic vznikajících během výroby křemíkových ingotů. Kružnice se tvoří vlivem injekce příměsí do křemíku při Czochralskiho metodě. Ve fázi, kdy se tažením vyjímá monokrystalický ingot z nádoby, může proniknout do křemíku cizorodá příměs (např. kyslík). Defekt je možné odstranit zónovým přetavením. [10]



Obr. 8 – Ukázka vírového defektu na článku

### 2.1.2 Chyba při sítotisku

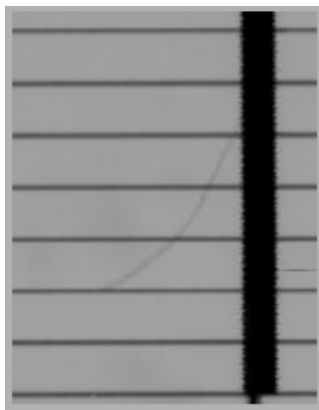
Tato vada je zřejmá již na první pohled. Vzniká za předpokladu, že se vrchní metalizace nedokonale nanese na článek nedotaženým sítotiskem, přičemž dochází ke špatnému odvodu vygenerovaného proudu ze solárního článku. Tuto chybu je možné detekovat téměř pomocí všech diagnostických metod. [10]



Obr. 9 – Ukázka chyby sítotisku na článku

### 2.1.3 Mechanické poškození

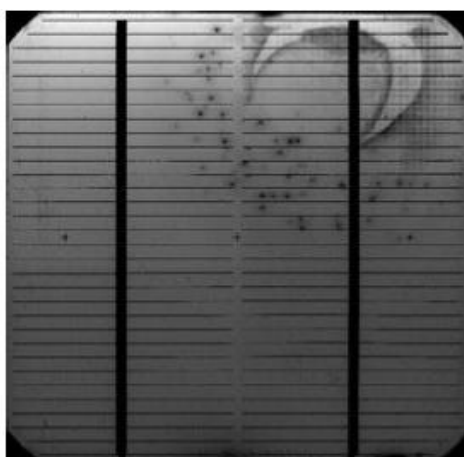
Převážně je způsobeno nešetrným či neopatrným zacházením s fotovoltaickým článkem při výrobním procesu. Nejčastěji k němu dochází při stavbě solárního panelu nebo při ořezu jednotlivých článků. Mechanické poškození je způsobeno usazenými pevnými nečistotami, které při manipulaci mohou článek poškrábat a porušit tak PN přechod. [10]



Obr. 10 – Ukázka mechanického poškození na článku

### 2.1.4 Nehomogenita difúzní vrstvy

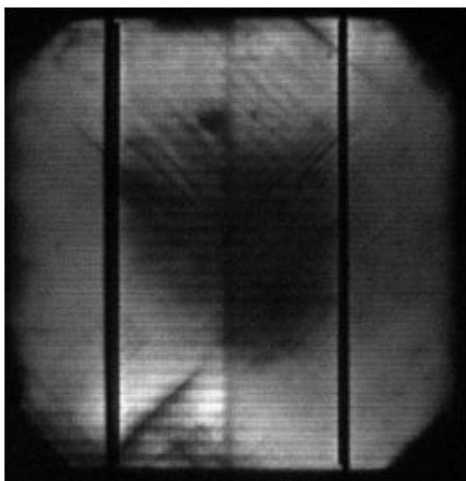
Tato vada vzniká během difúzního procesu, při kterém se přidávají příměsy do látky, aby se vytvořily polovodiče typu P, nebo N. Tímto procesem se do látky mohou dostat nečistoty z dotovaných látek. Projevuje se ve formě černých bodů na fotovoltaickém panelu. [10]



Obr. 11 – Ukázka nehomogenity difúzní vrstvy na článku

### 2.1.5 Materiálové pnutí

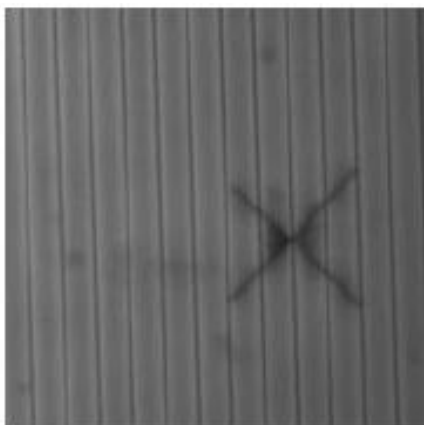
K pnutí uvnitř materiálu dochází při nedodržení doporučené doby, po kterou by se měl křemík vyrábět, a celkový proces je urychlen. Je důležité, aby při výrobě byl křemík dokonale chlazený a celý proces výroby (nejčastěji Czochralského metodou) byl správně řízen. Vada může totiž ovlivnit i ostatní články a způsobit větší škody. [10]



Obr. 12 – Ukázka materiálového pnutí na článku

### 2.1.6 Skrytý lom

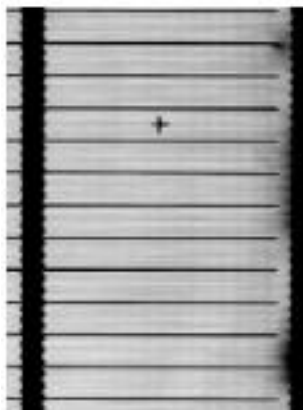
Tato vada nemusí být na první pohled zcela zřejmá, ale může velmi negativně ovlivnit celý solární článek. Jedná se o prasklinu, která byla vytvořena nadměrnou silou, jež působila na článek. V horším případě může dojít k totálnímu odlomení části fotovoltaického článku. [10]



Obr. 13 – Ukázka skrytého lomu na článku

### 2.1.7 Neobroušené hrany

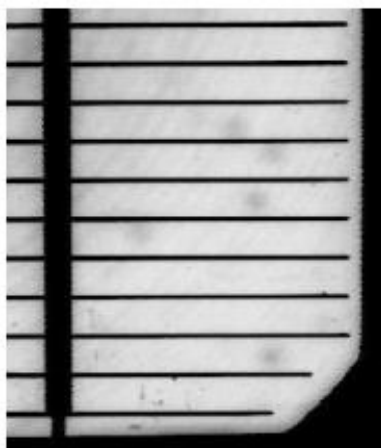
Následující obrázek znázorňuje vadu, která byla způsobena nedokonalým obroušením hran fotovoltaického článku. Při tomto defektu dochází k vyzkratování horní a spodní části článku a v takovém případě je nutná oprava. Stejný defekt způsobí i odštípnutá nebo ulomená část hrany. [10]



Obr. 14 – Ukázka neobroušených hran na článku

### 2.1.8 Prachové částice

Podobně jako u nehomogenity difúzní vrstvy je tento defekt způsoben při výrobě článku, kdy je prach během difúze zataven do základního materiálu. Na obrázku jsou prachové částice zobrazeny jako temné skvrny. [10]



Obr. 15 – Ukázka prachových částic na článku

## 2.2 Poruchy solárních panelů

Defekty fotovoltaických panelů vznikají nejčastěji během provozu a významně ovlivňují jejich parametry a účinnost. Nejedná se však pouze o vady způsobené klimatickými změnami, živými organismy nebo lidským působením. V následujících několika odstavcích je rozebráno, co všechno může způsobit pokles nebo změnu parametrů panelu, jeho degradace či úplné zničení.

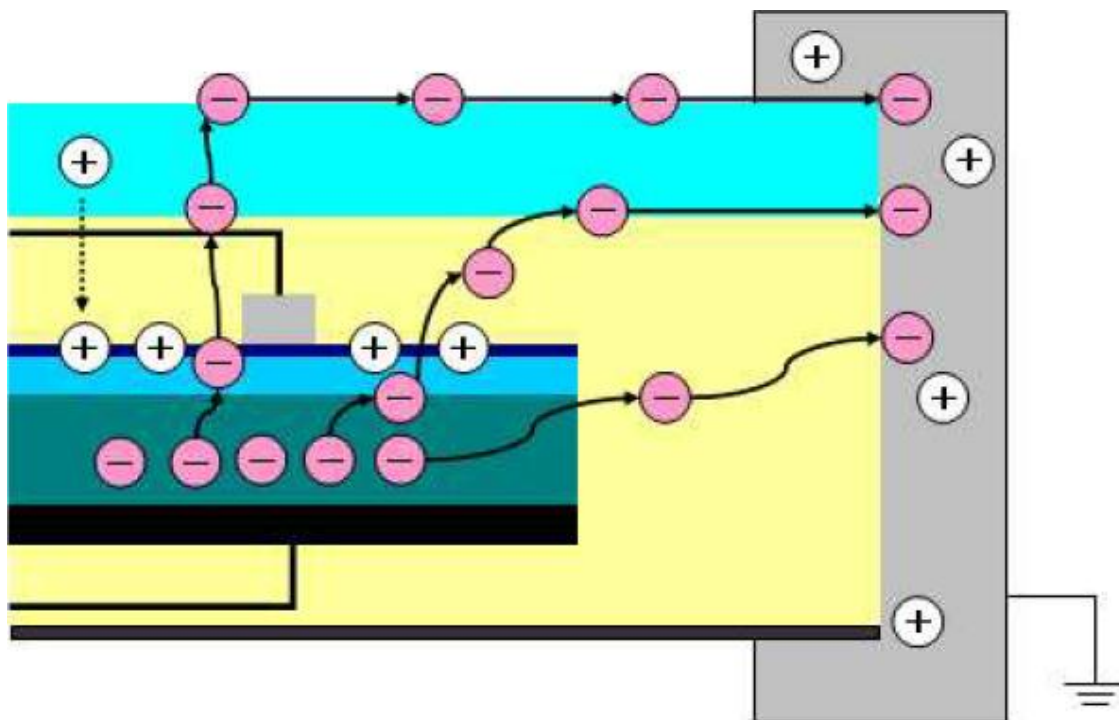
### 2.2.1 Vysokonapěťový stres

Tento fyzikální jev, který obecně nese zkratku PID (Potential Induced Degradation), způsobuje snížení výkonu u fotovoltaických panelů. Jedná se o mezivrstvou polarizaci, která souvisí s rozdílem potenciálu panelů proti zemi. V důsledku většího rozdílu může dojít k uvolnění elektronů z materiálu na panelech, které putují do elektrického pole, načež dochází k jejich vybití do země přes rám (Obr. 16). V krajních případech může vést až k nevratné degradaci křemíku v panelech.

*„PID způsobuje nevhodnou polarizaci nábojů fotovoltaického článku a kvůli tomu není článek schopen dodávat elektrický proud. K tomuto jevu dochází zejména na FV panelech, které jsou nejbližší u záporného pólu. Zde se totiž potenciál (napětí vůči zemi) FV článků podle délky daného stringu (zapojení modulů v řadě) a typu používaného střídače obvykle pohybuje mezi  $-250\text{ V}$  až  $-400\text{ V}$ . Rám FV panelů má ale naproti tomu potenciál  $0\text{ V}$ , protože z bezpečnostních důvodů musí být uzemněný. Kvůli tomuto elektrickému napětí mezi FV články a rámem může dojít ke vzniku svodových proudů. To za sebou zanechá náboj (polarizaci), který může nevýhodným způsobem pozměnit charakteristickou křivku FV článků,“* [11] citován Doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D. z článku Fotovoltaické elektrárny ve stresu.

Pokud roste rozdíl potenciálu, roste s ním i riziko vzniku poruchy a snížení výkonu panelu. Riziko a výsledný pokles výkonu je navíc o to větší, čím více panelů je zapojeno do jednoho stringu. Čím déle totiž PID působí, tím více panelů je negativně ovlivňováno a poškození postupuje směrem ke kladnému konci stringu. Záleží ovšem na typu použitých panelů, jejich zapojení a parametrech. Během konkrétních měření v terénu se podařilo lokalizovat poškození do 8. panelu směrem od záporného stringu, přičemž výkon posledních panelů klesl na 70 % původního výkonu. [12]





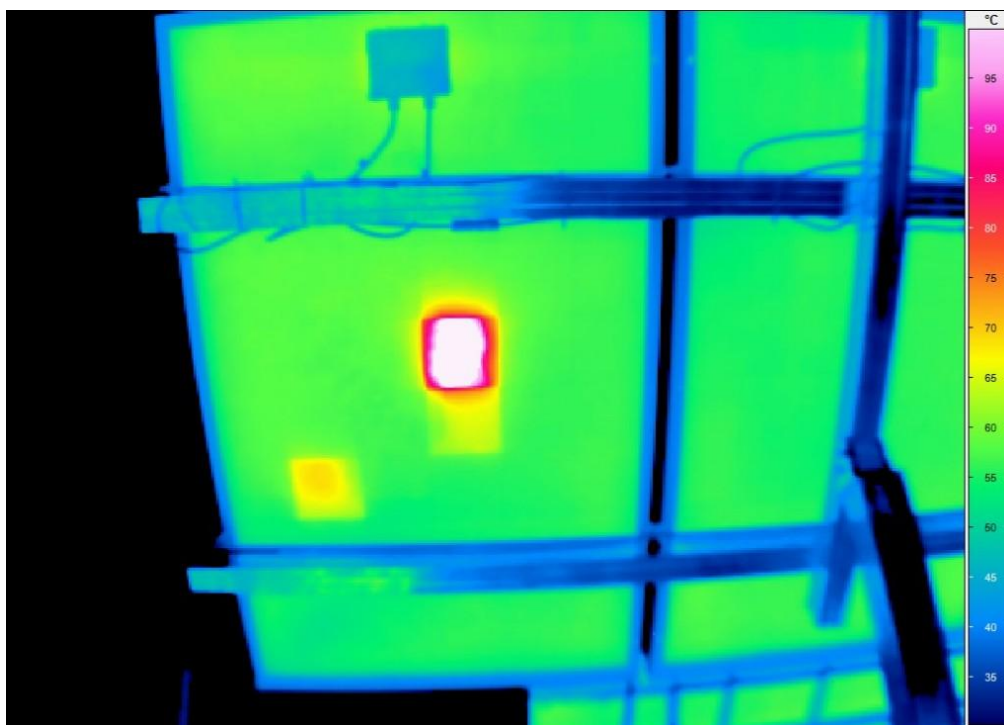
Obr. 16 – Princip vysokonapětového stresu

Vznik PID závisí na několika faktorech. Předně okolní prostředí. Vysoká teplota a vlhkost způsobují, že se degradační efekt, způsobený vysokonapětovým stresem, urychluje. Naproti tomu nízká vlhkost a teplota naopak napomáhají solárním panelům při regeneraci po působení stresu. Se změnou počasí se ovšem nedá počítat, takže je nutné regeneraci řešit jiným způsobem. Za vznik PID nesou vinu také difúzní bariéra, volba skla či zapouzdření. Existuje již několik studií, které dokázaly, že sodík obsažený ve skle napomáhá při reakci s vlhkostí ke korozi elektricky vodivé vrstvy na vnitřní straně krycího skla. Vodivá deska je poté neopravitelná a způsobuje značný pokles výkonu. [13]

### 2.2.2 Horká místa, neboli „Hot spots“

Horká místa vznikají dvěma způsoby. Částečné zastínění článku je jev, při kterém se zastíněný článek přestává chovat jako zdroj elektrické energie. Zastíněný článek naopak energii, kterou vyrobí okolní články, začne spotřebovávat, čímž se přehřívá. Nebo vzniká v místě, kde došlo k defektu krystalické mřížky fotovoltaického článku. V takových místech se objevují tzv. *mikro-minicracs*, které jsou spojené s nadměrnou generací tepla. Ze zkušenosti lze říct, že pokud se teplota poškozeného článku zvedne o 50°C oproti teplotě okolních článků, může dojít ke zničení článku, dokonce i celého panelu. [14]

Horká místa lze určit i pouhým okem či dotykem. Na zadní straně panelu dochází vlivem vysokých teplot k zhnědnutí materiálu. Nabízí se i sofistikovanější a přesnější metoda – pomocí termovizní kamery nebo pomocí elektroluminiscenční metody ELCD, která se dá provádět pouze v laboratoři. Metoda spočívá v napájení panelu ve tmě pomocným zdrojem v propustném směru do 50 % výkonu. V místech, kde se nachází porucha, se objevuje luminiscenční jev, který je detekován speciální infračervenou kamerou. Oproti tomu měření termokamerou lze provádět přímo v terénu za chodu elektrárny. [14]



Obr. 17 – Horká místa na panelu

### 2.2.3 Šnečí cestičky, neboli „Snail trails“

Mezi další vady solárních panelů se řadí vada metalizace, která se triviálně nazývá *šnečí cestičky*, *hlemýždí stopy* nebo *pavoučci*. Tyto poruchy se začaly objevovat během roku 2011 na některých instalovaných FV elektrárnách v České republice a na Slovensku po několika měsíčním provozu. Jedná se o jev, kdy se na povrchu solárních článků, pod krycím sklem a laminační vrstvou objevily změny zbarvení připomínající větvení nebo „cestičky“ (Obrázek 18). Šířka těchto stop se pohybuje v rozmezí 0,5 – 1 cm. K jevu dochází jak u poly tak i u monokrystalických článků. Postiženo bývá obvykle více míst na panelu, ale samotný defekt je vždy ohraničen jednotlivými články.

U některých světových výrobců se tento defekt vůbec neobjevuje, proto lze vydedukovat, že jev souvisí s použitou výrobní technologií samotného článku nebo komponent panelu. Výklad a pochopení tohoto fenoménu mezi odbornou veřejností nejsou prozatím jednoznačné. Nejpokročilejší ve výzkumu tohoto jevu jsou pravděpodobně vědci z Fraunhofer Center for Silicon Photovoltaics (CSP), a i přesto tento jev zatím zůstává technologickým mystériem, jehož příčina a mechanismus vzniku nejsou zatím příliš jasné. S největší pravděpodobností dochází k této vadě kombinací několika různých faktorů: [15]

- Pronikáním vlhkosti do struktury FV panelu
- Mikrotrhliny ve struktuře FV článků
- Fyzikální a chemické reakce, které probíhají uvnitř FV panelu při dlouhodobém vystavení osvětlení a vysokým teplotám
- Použitá EVA (etylvinylacetát) = fólie sloužící jako podkladová spodní vrstva článků



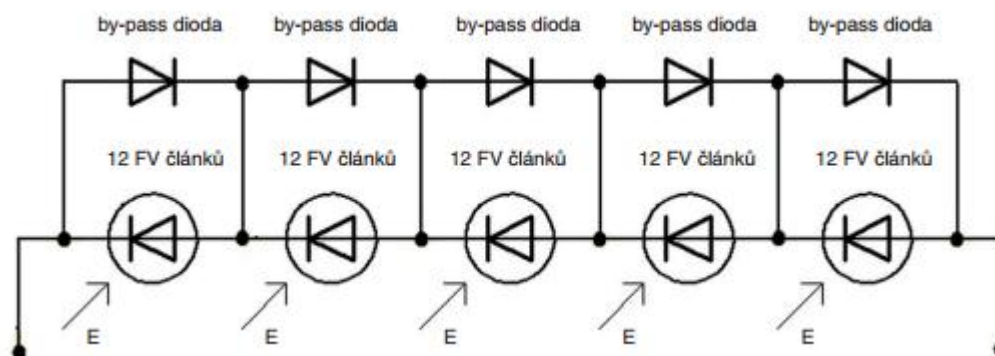
*Obr. 18 – Ukázka šnečích cestiček na panelu*

## 2.2.4 Zastínění panelů

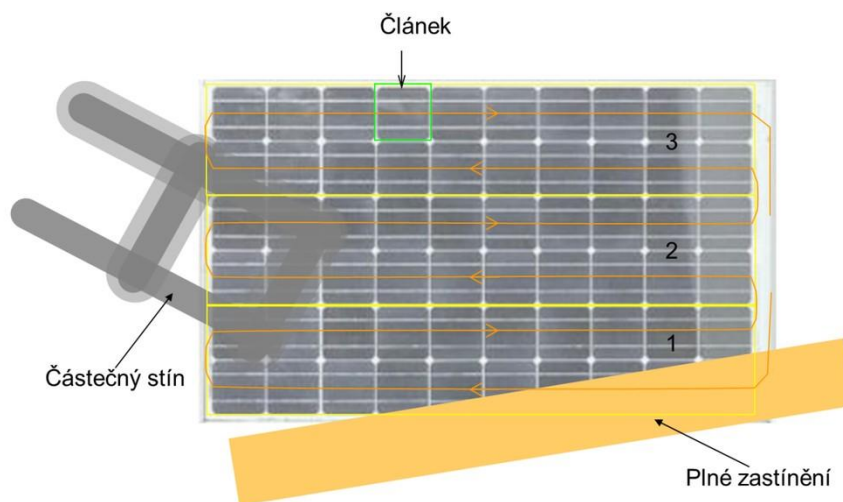
Nejvýznamnější vliv na výkon generovaný fotovoltaickou elektrárnou má bezesporu intenzita slunečního záření. Solární elektrárny či pouhé stringy jsou tvořeny velkou řadou sério-paralelně zapojených panelů. Hodnota aktivní plochy celé elektrárny je proto poměrně vysoká. V těchto případech může docházet k nerovnoměrnému dopadu slunečního záření na jednotlivé panely. Jedna část může být osvětlena více a druhá zase méně, přičemž se situace během dne může změnit v pravý opak. V běžných podmínkách není jednoduché nastolit ideální rovnovážný stav pro všechny panely. Pouhou změnou oblačnosti, znečištěním panelů nebo zastíněním od cizího předmětu dochází k výrazným nerovnoměrnostem.

Jak již bylo řečeno v kapitole o horkých místech, pokud se stane, že je nějaký článek zastíněn více než ostatní články, stává se spotřebičem namísto generátoru elektrické energie a dochází k jeho zahřívání. Vysvětlení tohoto jevu spočívá v základní znalosti teorie elektrických obvodů. Články v panelu jsou zapojeny do série, tudíž každým článkem musí protékat stejný proud. Články, které nejsou zastíněny, vnucují zastíněným proud větší velikosti, čímž se tyto články dostávají do inverze a snižují výkon FV panelu. Velikost ztrátového tepelného výkonu je závislá na intenzitě zastínění. Pokud dojde k malému zastínění několika článků, je to pro panel daleko příznivější, než když dojde k intenzivnímu zastínění jednoho článku.

Pro omezení vlivu zastínění na funkci panelu se využívá zařazení tzv. by-pass diod (Obrázek 19), které umožní průchod elektrického proudu většího, než je zkratový proud zastíněných článků. Poruchy těchto diod se objevují zřídka. Většinou jsou způsobeny nedokonalým dimenzováním, což vede k nadměrnému oteplení a k jejímu průrazu. [16]



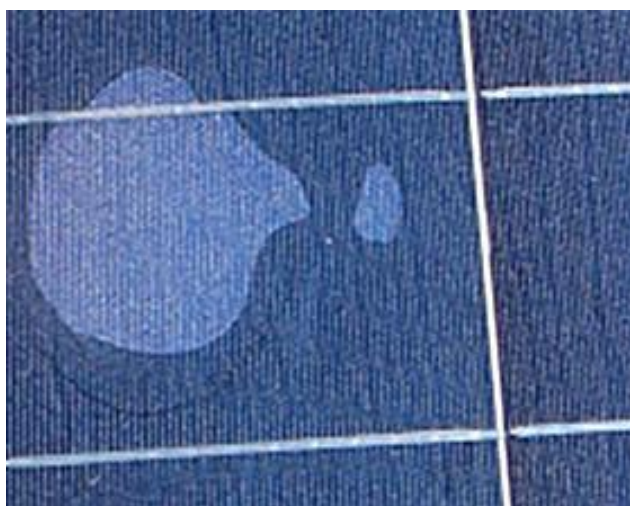
Obr. 19 – Zapojení by-pass diod



Obr. 20 – Ukázka zastínění panelu

### 2.2.5 Delaminace

Delaminace doslova znamená oddělení jednotlivých částí panelu od sebe. Nejčastěji se od sebe separují EVA fólie a tvrzené sklo. Tímto jevem vzniká v místě oddělení dutina (Obrázek 21) mezi vrstvami panelu. Jedná se o velmi problematickou poruchu, jejímž důsledkem je porušení funkce FV panelu vlivem korozivních účinků vody s chloridy, které časem vyplní vzniklou dutinu. [17]



Obr. 21 – Ukázka delaminace panelu



### 2.2.6 Kabelové rozvody

Při výstavbě fotovoltaické elektrárny je nutné správně dimenzovat průřez stejnosměrných kabelů vzhledem k jejich délce. Velká pozornost by měla být věnována také správné montáži a uchycení kabelů, aby z panelů nevisely a nemohlo dojít k jejich rozpojení, ne-li odtržení cizím přičiněním.

Dimenzování průřezu je nezbytné i u střídavých rozvodů od střídače směrem k transformační stanici, pokud je výkon elektrárny vyveden do sítě. Výpočty pro použití správného průřezu kabelu vzhledem k délce se však spíše provádí v místech, kde se transformační stanice nachází několik stovek metrů od střídače. Nedokonale dimenzované vedení může způsobit velké úbytky napětí, čímž se zvyšuje výstupní napětí střídače. Problém nastane, když se překročí povolený rozsah výstupního napětí střídače, což zachytí jeho instalované ochrany a střídač je odpojen od sítě. [6]

### 2.2.7 Jištění

K poškození FV panelů může dojít vlivem atmosférického či spínacího přepětí. Dalším zdrojem poruch u fotovoltaických elektráren je zkrat v části obvodu, což může způsobit proudové přetížení částí celého systému. Takový typ poruchy může poškodit připojené části v FVE v systému či způsobit požár. Potřeba jištění FV elektráren stejnosměrnými jističi či pojistkami závisí na počtu paralelně zapojených stringů na vstup střídače. V praxi se často využívají FVE s napětím okolo 1000 V stejnosměrných. V ideálním případě je tedy i proud stejnosměrný a je daleko obtížnější takový proud vypínat. Střídavý proud se oproti stejnosměrnému vypíná snadněji díky tomu, že dvakrát za periodu „projde nulou“.

Přerušení stejnosměrného obvodu FVE lze realizovat pomocí několika různých zařízení: přepínači, odpínači nebo pojistkovými odpojovači. Jištění panelů se provádí pojistkami nebo jističi. Odpínač musí být schopen vypínat jak malé, tak i velké proudy při vyšším napětí a uhasit vzniklý elektrický oblouk, který výrazně snižuje životnost spínacích kontaktů. [18]

### 3 Fotovoltaický střídač

Aby bylo možné vyrobenou energii z fotovoltaického systému dále zpracovávat, je třeba přeměnit stejnosměrný proud na střídavý a upravit napětí tak, aby odpovídalo rozvodné síti. K tomu se používají střídače někdy nazývané i měniče nebo inventory. Ty mohou mít i celou řadu doplňkových funkcí jako je například monitorování sítě a jejich provozních údajů. Mimo základní funkci (přeměna DC na AC) se střídač také stará o to, aby solární panely pracovaly v optimálním bodě jejich voltampérové charakteristiky a mohly tak dodávat maximální výkon při různých intenzitách osvětlení. To zajišťuje regulátor maximálního výkonu zabudovaný ve střídači, který přizpůsobuje napětí solárního generátoru. Střídač také obsahuje přepětovou ochranu, ochranu proti přepólování a přetížení. Chybným výběrem typu potřebného střídače, či jeho nedostatečnou kvalitou, se může celý solární systém potýkat s obtížemi.

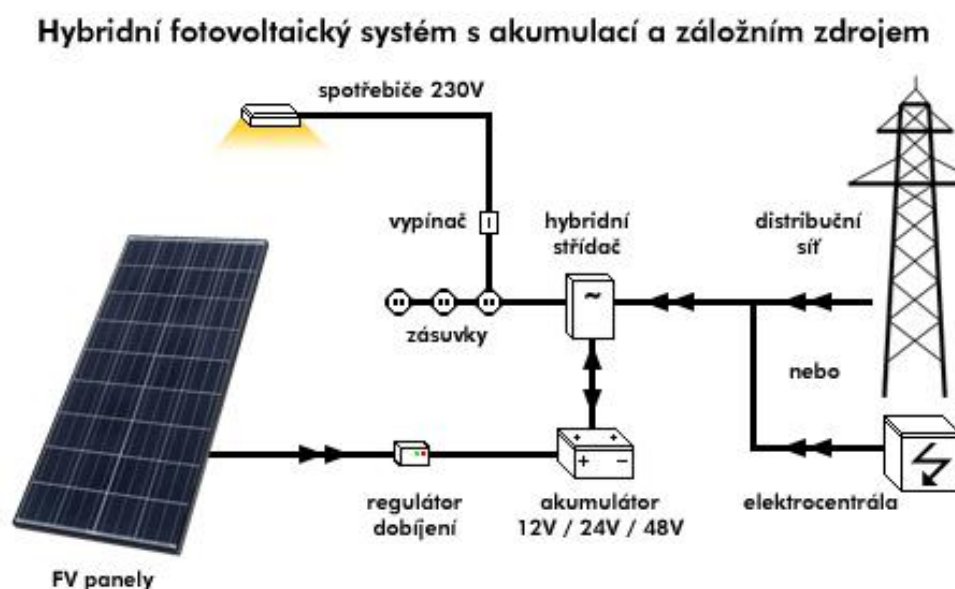
Na našem trhu jsou k dostání desítky těchto zařízení. Hlavními parametry pro instalaci a spokojenost zákazníka jsou:

- Účinnost střídače – především tzv. evropská (euroúčinnost), která je měřena při měnících se klimatických podmínkách.
- Rozsah MPP (maximum power point) – udává rozsah napětí, ve kterém je schopen střídač pracovat.
- Účinnost přizpůsobení MPP – jedná se o parametr, který vystihuje, jak rychle dokáže střídač zareagovat na měnící se klimatické podmínky.
- Sběr a analýza dat – doplnění střídače o sběr a analýzu dat pro bezchybný provoz systému (stahování dat na počítač, přes bluetooth, sms zprávy o poruše systému apod.).
- Chlazení a řízení teploty střídače.

Primárně se střídače dělí na řízené sítí a na samostatně řízené. Sítí řízené střídače si samy odvozují ze síťového napětí zapínací a vypínací impulzy. Impulzy jsou vedeny na výkonové spínače, které spínají proud na frekvenci 50 Hz. Spínáním vznikne obdélníkový průběh se stejným fázovým posunem, jaký má i napětí sítě, aby nedocházelo k rušení. Modifikovaný obdélníkový signál je neškodný téměř pro všechny domácí spotřebiče, ale najdou se i takové, které jsou velice citlivé – např. obrazovky či úsporné žárovky. [19]

## 4 Hybridní FVE

Fotovoltaické systémy se dělí podle připojení do sítě na **On-grid**, **Off-grid** a **Hybridní**. On-grid mohou pracovat v režimu „zelených bonusů“ nebo přímého výkupu energie. Off-grid systémy (často nazývány ostrovní) pracují čistě bez připojení do distribuční sítě. Uplatnění nacházejí převážně v objektech, kde připojení do sítě je znemožněno terénními podmínkami. Nejčastěji se jedná o horské chaty, mobilní domy a budovy na samotách. Hybridní fotovoltaické elektrárny (HFVE) kombinují vlastnosti klasického on-grid systému s ostrovním režimem. Hybridní systém pracuje s naakumulovanou energií, dokud jí je dostatek. Jakmile energie dojde, celý objekt může být napájen z distribuční sítě. Systém neumožňuje tok přebytků do sítě, ale opětovně nabíjí akumulátory, ze kterých se energie čerpá. [20]



Obrázek 22 – Schéma zapojení HFVE

Tím, že HFVE nedodávají přebytkovou elektřinu do sítě, je zřejmé, že tento typ elektrárny nevydělává majiteli žádné peníze a vyrobená energie se musí spotřebovat přímo na místě. I když to tak nevypadá, je to velká výhoda, poněvadž odpadají různé problémy se schválením od ERÚ. Pro instalaci HFVE tedy stačí pouze povolení stavebního úřadu, které se podle odborníků uděluje bez problémů. Některé zdroje uvádějí, že distributoři energie vyžadují, aby majitel HFVE nahlásil její instalaci. [20]



HFVE se obecně lépe vyplatí tam, kde je větší spotřeba elektrické energie. Celkové spotřebě napomůže v současné době velice výhodný fotovoltaický ohřev vody. Tento systém může napomoci spotřebovávat vyrobenou energii, pokud je jí nadbytek (převážně tedy přes den v létě). Celkově se tímto systémem vylepšuje využití vyrobené elektřiny. Fotovoltaický ohřev vody není nijak zvlášť nákladný a nabízí lepší účinnost hlavně v mrazivém, ale slunečném počasí. Je nutné však počítat s minimálně 15 m<sup>2</sup> plochy fotovoltaických panelů a instalaci kvalitního a dobře dimenzovaného zásobníku na teplou vodu. Pro lepší představu - 100 l vody lze z 10 °C na 50 °C v zásobníku ohřát pomocí 2 kW zhruba za 2,5 hodiny. [20,21]

## 4.1 Části HFVE

Hybridní fotovoltaická elektrárna obsahuje fotovoltaické panely, akumulátory a příslušnou regulační a nabíjecí elektroniku. Součástí hybridního fotovoltaického systému je i hybridní měnič napětí (střídač), který umožňuje dodávat elektřinu i z distribuční sítě. Jedná se o klíčový prvek domácí HFVE, který mimo jiné zabezpečuje její požadované galvanické oddělení (pomocí transformátoru) od distribuční sítě a řídí všechny toky energie v domě.

Hybridní měnič dokáže pracovat zároveň jak v on-grid, tak i v off-grid režimu. Je tedy oproti ostrovnímu měniči, který pouze přepíná mezi akumulátory a sítí, schopen plynule a současně v reálném čase regulovat množství energie odebírané ze sítě nebo z akumulátorů, což je vlastně jeho nejpodstatnější a nejvíce využívaná funkce. Hybridní měniče jsou budoucností a základním stavebním prvkem při budování fotovoltaických instalací určených pro vlastní spotřebu, záložních systémech a řízení spotřeby v chytrých sítích. [20]

## 4.2 Akumulátory

Nedílnou součástí HFVE jsou mimo fotovoltaických panelů akumulátory. Hybridní systém lze teoreticky provozovat i bez použití akumulátorů, ale pro plynulou funkci celého systému je vždy lepší provozovat HFVE s připojenými akumulátory. V praxi spíše nacházejí uplatnění olověné akumulátory, a to především díky své pořizovací ceně a dlouhodobě ověřené technologii výroby. Začínají se však uplatňovat i systémy s použitím LiFePO<sub>4</sub> baterií, které sice nabízí zákazníkům vyšší počet nabíjecích cyklů (což souvisí i s jejich delší životností), ale na oplátku jsou daleko dražší než olověné. [19,20]

LiFePO<sub>4</sub> baterie se řadí mezi lithium-iontové akumulátory, které ke své funkci používají vysoké chemické reaktivity lithia. Výrobní technologie LiFePO<sub>4</sub> akumulátorů byla vyvinuta na univerzitě v Texasu v 90. letech 20. století. V současné době se tyto baterie stále více instalují nejen v ostrovních fotovoltaických elektrárnách, ale také například v elektromobilech. Lithiové akumulátory navíc dokážou spolupracovat s tou samou technologií, s jakou dnes pracují olověné akumulátory. Není tedy za potřebí složitých rekonstrukcí či instalací nových zařízení. Existují názory, že by v nadcházejících několika letech mohlo větší rozšíření LiFePO<sub>4</sub> akumulátorů způsobit obrovský krok kupředu pro domácí off-grid fotovoltaické systémy a zcela změnit způsob spotřeby elektrické energie v domácnostech.[21]



Obr. 23 – LiFePO<sub>4</sub> akumulátor

#### 4.2.1 Výhody LiFePO<sub>4</sub> akumulátorů

Obrovskou výhodou těchto akumulátorů je především jejich životnost, která se pohybuje mezi 4000 – 8000 nabíjecími cykly. Průměrně se tedy odhaduje (při standardním běžném používání v domácnosti s klasickými spotřebiči), že akumulátory dokážou vydržet i 20 let. Jedná se však o maximální možnou životnost v případě, že by se baterie nevybíjela pod 50% své kapacity a v případě, že by nabíjecí elektronika fungovala po celou dobu životnosti akumulátoru bezchybně. Životnost baterie se odvíjí od hloubky vybíjení, což znamená, jak moc nabitý akumulátor se běžnou spotřebou vybíjí. [20,21]

Další výhodou oproti olověným akumulátorům je proces stárnutí. Zatímco kapacita olověné baterie po překročení určitého počtu nabíjecích cyklů se rapidně snižuje, u lithiových akumulátorů lze hovořit o téměř lineárním procesu stárnutí. Některé zdroje uvádí, že i po konci předepsané životnosti lze akumulátory ještě nějakou dobu provozovat, pokud to jejich celkový stav dovoluje. [21]

#### 4.2.2 Nevýhody $\text{LiFePO}_4$ akumulátorů

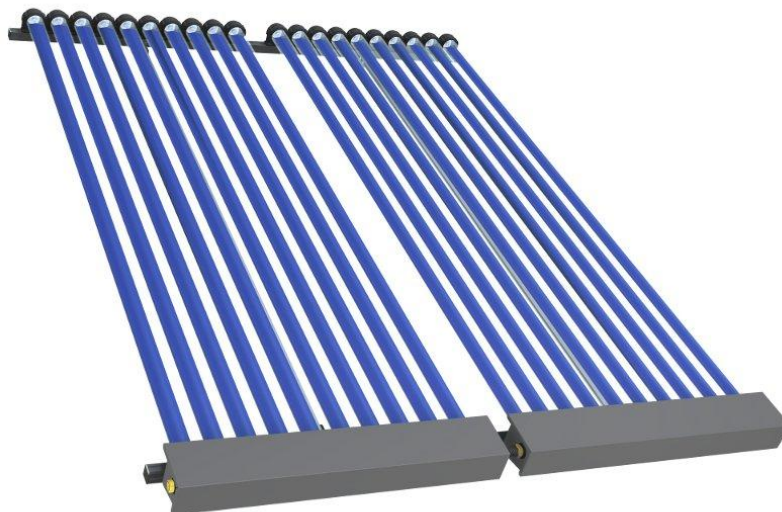
Lithiové akumulátory sice na první pohled působí, že oplývají pouze samými klady, tak proč se už všude nepoužívají? Předně, jak již bylo napsáno výše, se jedná o jejich pořizovací cenu, která je i navzdory jejich dlouhé životnosti poměrně vysoká. Druhým problémem těchto baterií je také zatím dosud nevyřešená ekologická likvidace. Je nutné ale mít stále na paměti, že  $\text{LiFePO}_4$  technologie se teprve rozvíjí a časem určitě bude vyřešen i problém s jejich recyklací.

Likvidace baterií však není problém současný, neboť od doby prvních komerčních instalací ještě neuběhlo 20 let. Větší komplikaci způsobuje tzv. **balancování**, což se dá popsat jako stejnoměrné nabíjení všech článků baterie. Lithiové články jsou na přebíjení velmi citlivé, proto každá baterie obsahuje moduly, které hlídají stejnoměrné nabíjení všech článků. Balancování lze rozdělit na **pasivní** a **aktivní**. Při pasivním balancování se elektronicky hlídá napětí článku, a pokud by mělo dojít k jeho přebití, nabíjecí proud se pošle do soustavy odporů. Tento postup je samozřejmě zbytečně ztrátový. Oproti tomu při aktivním balancování se porovnává napětí jednotlivých článků v akumulátoru a energie se přelévá od více nabitých do méně nabitých. [21]

### 4.3 FV ohřev vody

Využití sluneční energie pro ohřev vody není žádná nová idea. V Evropě se technologie ohřevu vody začala rozvíjet již v 70. letech minulého století, v době ropné krize. Dnes se můžeme na trhu setkat s velkou řadou kolektorů pro ohřev vody – ploché, trubkové, pro domácnost, pro ohřev bazény, atd. Je opravdu z čeho vybírat. Ovšem pokud bychom vzali v potaz klesající cenu FV panelů, tak se v dnešní době již klasické solární

systemy pro ohřev vody moc nevyplátí. Vodu může levněji ohřívat elektřina vyrobená ve fotovoltaické elektrárně, a pokud by nebylo třeba ohřevu, elektrárna může pokrývat vlastní spotřebu domu, nabíjet akumulátory či prodávat přebytky do sítě. [22]



Obrázek 24 – Solární kolektory

Ceny elektřiny poklesly natolik, že vyrobená energie z fotovoltaické elektrárny je levnější, než teplo získané ze solárního systému. Samozřejmě to neplatí za každé situace, ale pokud bychom hovořili o běžném rodinném domě, pak toto srovnání platí zcela určitě. Jakmile se elektřina používá rovnou k ohřevu vody, odpadá instalace drahého střídače. Největší výhodou je pak to, že tento systém lze provozovat bez licence pro podnikání v energetice, která přináší jen starosti a povinnosti, avšak nulový užitek. [22]

Fotovoltaické panely skýtají kromě menší ceny i mnoho dalších plusů. Celková instalace a montáž je jednodušší, místo potrubí, kterým protéká nemrznoucí médium, čerpadla postačí několik kabelů a běžná elektrická přípojka. Fotovoltaiku lze vestavět i do fasády, do prosklení, lze ji umístit v libovolné vzdálenosti od bojleru, protože ztráty v kabelech jsou o několik řádů menší než ztráty v potrubí. Odpadá nákup a instalace oběhového čerpadla a náklady na jeho provozování či případný servis. Dále odpadá starost o výměnu nemrznoucí kapaliny, pokud by bylo nutné kolektory opravit či vyměnit.

Fotovoltaická elektrárna pracuje i za nízkých venkovních teplot, ba dokonce, i když je voda v zásobníku již ohřátá. V době, kdy už se voda v zásobníku více ohřát nedá, kolektory již nepracují. Pokud nastane stav, kdy stoupne teplota vody v zásobníku příliš vysoko, celá fotovoltaika lze jednoduše vypnout. [22]

## 5 Parametry FVE v Domažlicích

Fotovoltaická elektrárna, na které je prováděna praktická část diplomové práce, se nachází na střeše komerční budovy v Rohově ulici 98 v Domažlicích. Malá fotovoltaická elektrárna má výkon 9,2 kWp a pracuje v režimu přebytků do distribuční soustavy. Fotovoltaická elektrárna se skládá ze 40 polykrystalických modulů od společnosti ET Solar (panel ET Solar 230Wp). Panely obsahují 60 článků zapojených v sérii. Technické parametry FV panelu jsou uvedeny v tabulce č. 1. Jako nosná konstrukce je použita trojúhelníková konstrukce se sklonem cca 29°. Invertor Power One Aurora 10.0 a pojistkový odpojovač OEZ jsou umístěny na střeše objektu (na komínu). Rozvaděč FVE je instalován v technické místnosti. Technické parametry střídače se nacházejí v tabulce č. 2.



Obr. 25 – Malá FVE v Domažlicích 9,2 kWp

Elektrárna je rozdělena na dva stringy po 20 panelech. Každý string je napojen na vlastní multimetr NEMO D4-DC ve skříni Noark pro pojistkový odpojovač OEZ s těmito dalšími komponenty: jistič střídače Noark 3P/16A, stykač LOVATO, jistič kontaktů Noark 1P/6A, svodič přepětí AC Moeller.

Parametry	Hodnoty
$P_{STC}$	230 W
$P_{STC}$ na jednotku plochy	141,4 W/m <sup>2</sup>
Maximální účinnost	14,14 %
Počet článků	60
$I_{MPP}$	7,82 A
$U_{MPP}$	29,4 V
$I_{SC}$	8,3 A
$U_{OC}$	36,5 V
Jištění	15 A
Maximální napětí systému	1000 V

Tabulka č. 1 – Parametry ET Solar 230 Wp

Vstupní parametry	
$P_n$ DC	10,3 kW
$P_{max}$ DC	11,4 kW
Max. $U_{vst}$	900 V
Počet nezávislých MPPT kanálů	2
Max. $P_{vst}$ pro jeden MPPT	6,5 kW
Počet DC vstupů	4/6
Výstupní parametry	
$P_n$ (do 50 °C) AC	10 kW
$P_{max}$ AC	11 kW
Připojení na síť AC	3 fáze
$U_n$ AC	3x400 V
Max. rozsah napětí	311 – 456 V
$f_n$	50 Hz
$\eta_n$	97,7 %

Tabulka č. 2 – Parametry Power Aurora One 10.0

## 5.1 Porovnání vyrobené energie ze dvou stringů

Na začátku září 2015 byl v rámci praktické části této práce využit testovací hydrofobní přípravek založený na nanotechnologii, kterým byl ošetřen jeden string elektrárny. Nános bylo nutné provést na čisté a odmaštěné panely. Druhý string byl pouze umyt saponáty a opláchnut vodou. Aby bylo možné porovnat vyrobenou energii z obou stringů, musel se také nechat odstranit stožár na střeše budovy, který by stínil panelům z jednoho stringu a zkresloval tak měřené výsledky. Přípravek bylo zapotřebí nanášet ve dvou vrstvách a za příznivého počasí. Hydrofobní nátěr by měl teoreticky zlepšovat účinnost panelu tím, že zamezuje vytvoření skvrn po zaschlé vodě či nečistotách. Nános by měl vydržet na panelech podle výrobce po celý rok.

V invertoru jsou oba stringy zapojeny na stejnosměrné straně ke dvěma multimetrům Nemo D4-DC od společnosti IME, které ukládají okamžité hodnoty výkonu, proudu a napětí stringů na server, kde slouží výhradně k přehledu o množství vyrobené energie za určité období. K ukládání dat je používán osobní počítač Lenovo IdeaCentre Q190 s kapacitou pevného disku 500 GB. Multimetry se nacházejí v rozvaděči na střeše budovy, která dále obsahuje kromě měřících přístrojů i jističe, dva pojistkové odpojovače a děliče napětí pro zvýšení napěťového rozsahu multimetrů.



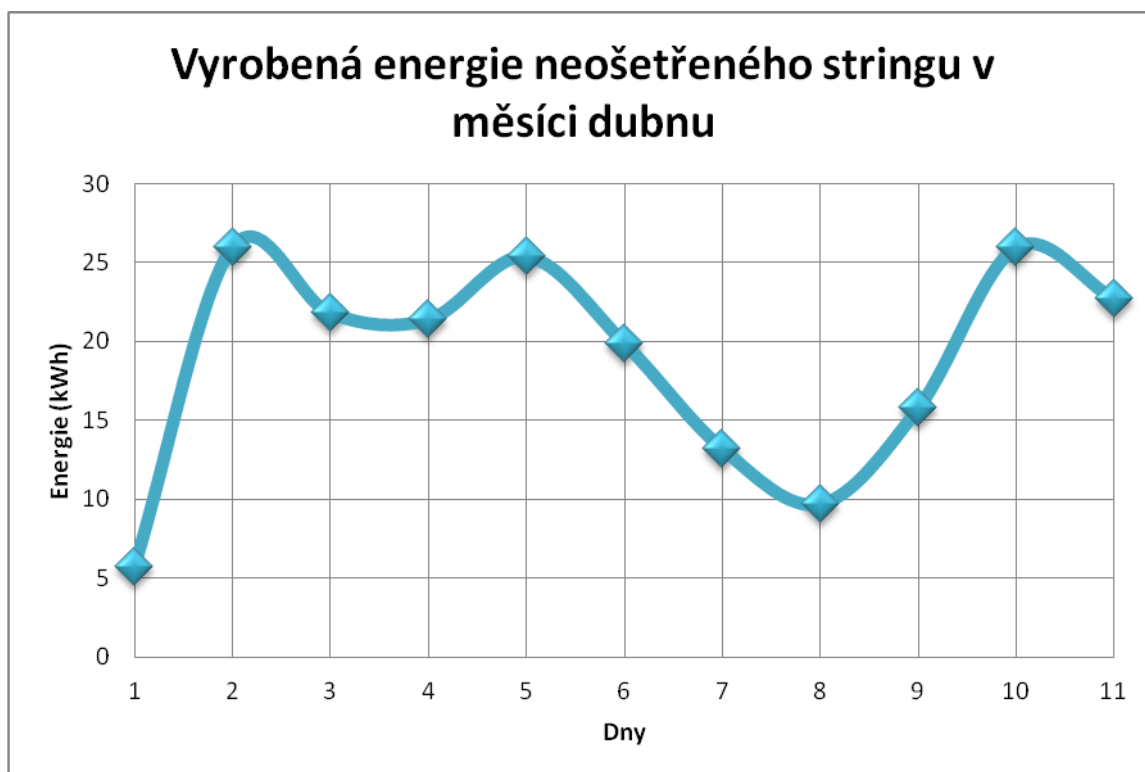
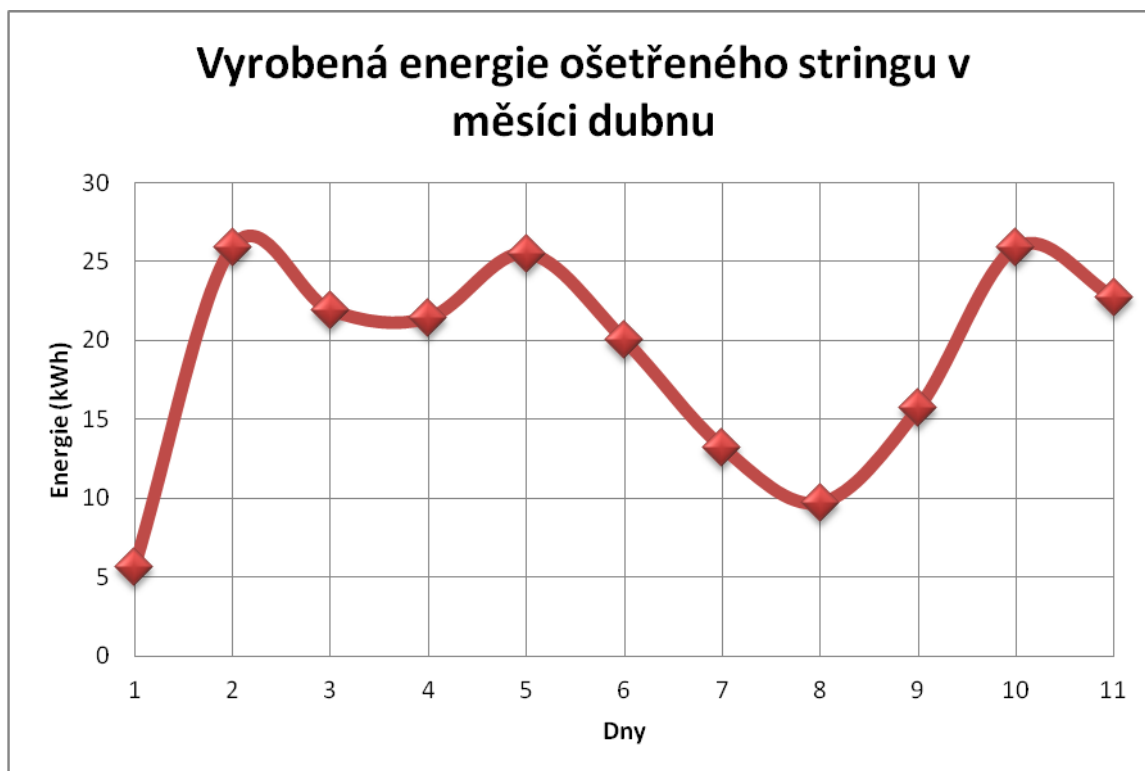
Obr. 26 – Multimetr Nemo D4-DC

Data z multimetrů jsou ukládána každou minutu. Pro svoji práci jsem zvolil porovnání měření v měsíci dubnu (sedm měsíců po aplikaci hydrofobního nátěru). V tabulce č. 3 je možné vidět množství vyrobené energie za jedenáct dní. Z tabulky vyplývá, že množství vyrobené energie z ošetřeného a neošetřeného stringu se příliš neliší. Rozdíly se pohybují v rozmezí jedné desetiny kilowatthodiny. Navíc z naměřených hodnot je patrné, že neošetřené panely vyrobily více energie než ošetřené. Vzhledem k množství vynaložené práce při ošetření jednoho stringu panelů se hydrofobní přípravek jeví jako naprosto zbytečný. Výrobce dokonce uvádí, že testovací přípravek by měl vydržet po celý rok. Porovnání vyrobené energie za jedenáct dní lze vidět na grafech na následující stránce.

	<b>Ošetřený</b>	<b>Neošetřený</b>
Den	Energie (kWh)	Energie (kWh)
1	5,6	5,7
2	25,9	26
3	21,9	21,8
4	21,4	21,4
5	25,5	25,4
6	20	19,9
7	13,2	13,2
8	9,7	9,7
9	15,7	15,8
10	25,9	26
11	22,7	22,7
<b>Suma</b>	<b>207,5</b>	<b>207,6</b>

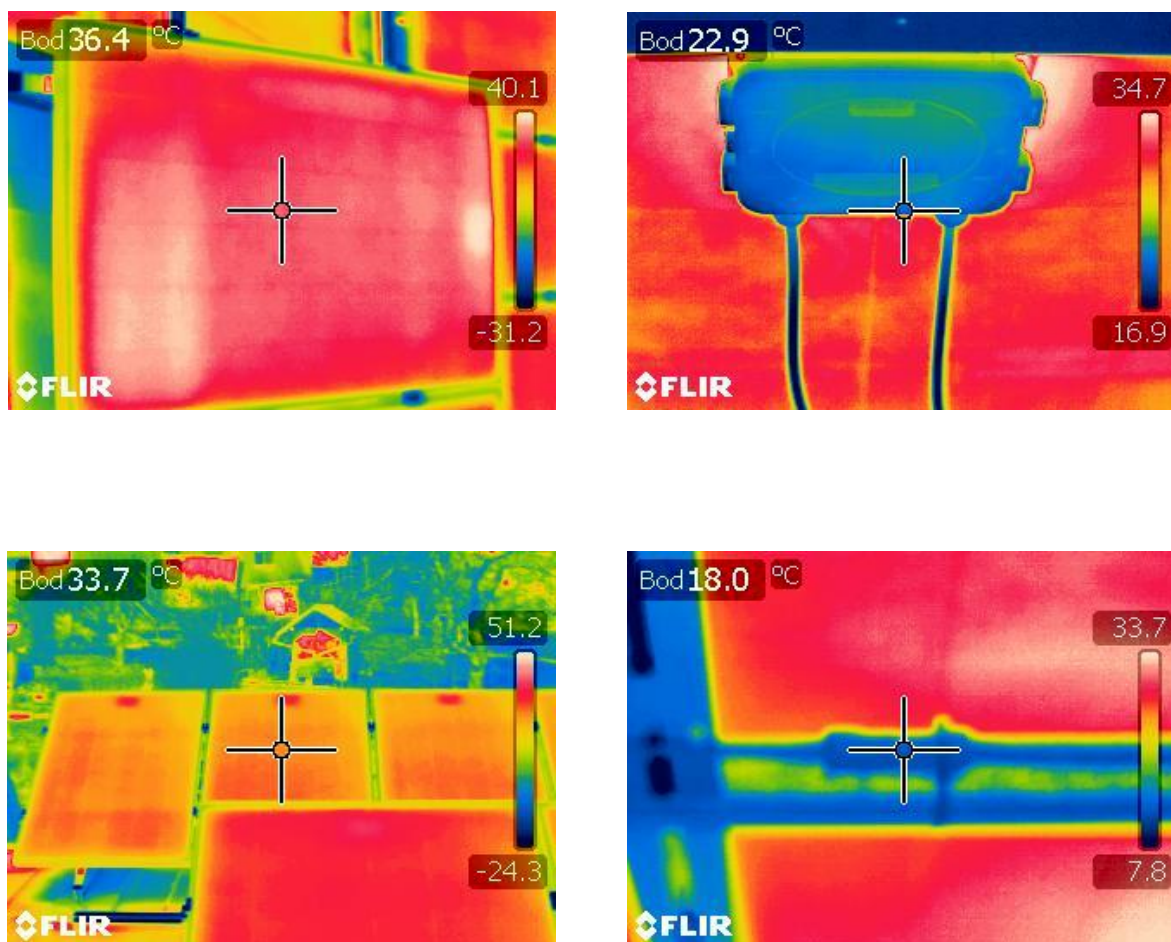
*Tabulka č. 3 – Porovnání vyrobené energie ze dvou stringů během 11 dní v měsíci dubnu*





## 5.2 Snímkování FVE termovizní kamerou

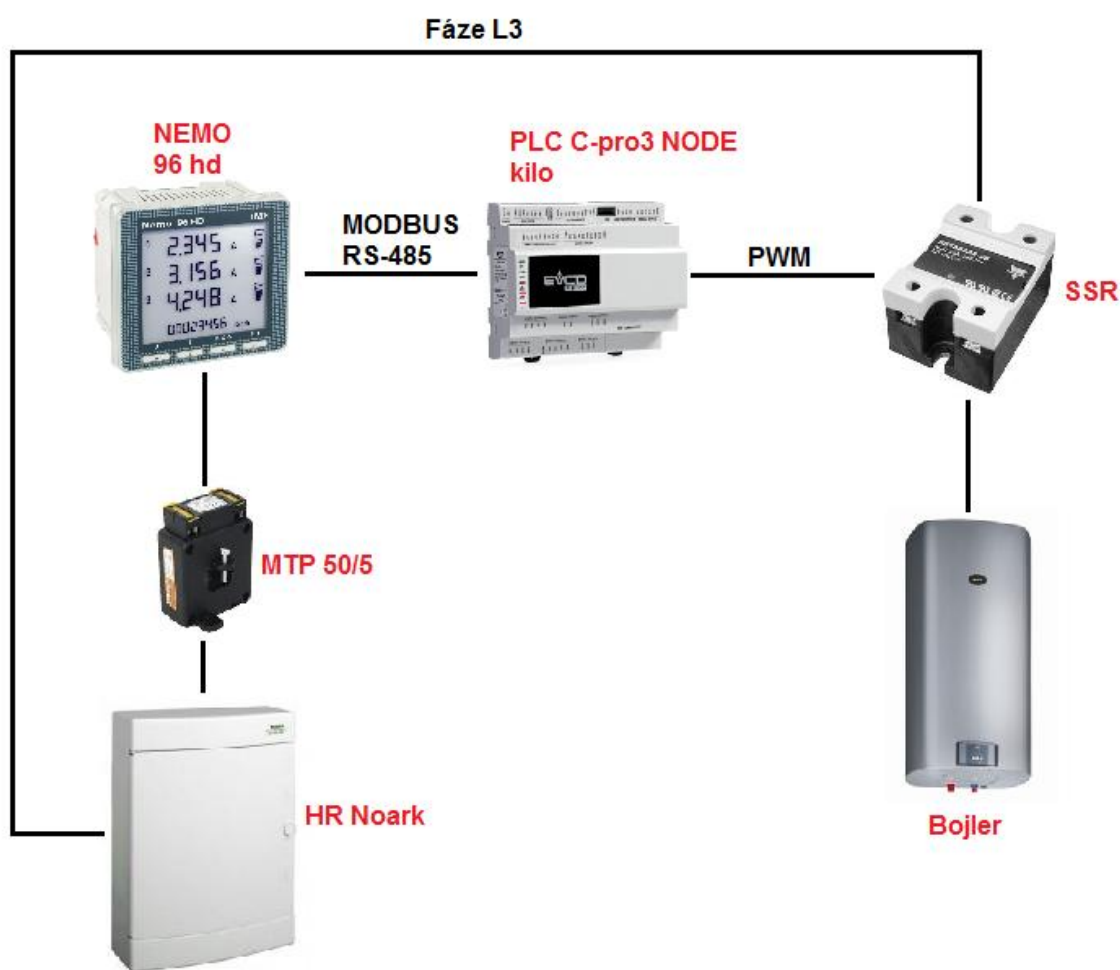
Druhá fáze praktické části spočívala v kontrole FV panelů na střeše budovy v Domažlicích. Ke snímkování byla použita termovizní kamera FLIR T335 s citlivostí 0,05 °C. Termokamerou byly prověřeny jak panely, tak i kabelové spoje a krabička s vývody na zadní straně panelu, nedochází-li k přehřívání vlivem přechodových odporů či vadných součástek. Snímkování probíhalo za slunného počasí v měsíci dubnu. Na snímcích z termokamery během měření nebyly zachyceny žádné vady na panelech, na kabelových rozvodech a ani na krabici, ze které jsou vyvedeny vodiče s konektory a uvnitř umístěny Schottkiho diody. Na následujících obrázcích jsou zobrazeny příklady snímkování panelů a kabeláže na střeše objektu v Domažlicích.



Obr. 27-30 – Snímky z termovizní kamery

## 6 Optimalizace přetoků do distribuční sítě

Hlavním úkolem diplomové práce bylo optimalizovat přetoky do distribuční sítě. Výkupní cena elektřiny je v dnešní době mizivá. Pořízení FV panelů v minulosti mělo svůj smysl, ale jak naložit s přebytky vyrobené energie dnes? Jednou z možností je využití energie pro ohřev vody v akumulární nádrži, čímž se zabývám v následujících kapitolách. Pro realizaci bylo využito Solid State Relay (dále jen SSR), čtyřkvadrantový multimetr NEMO 96hd, kontrolér C-pro3 NODE kilo a vlastní program vytvořený v softwaru UNI-PRO. Schéma navrhovaného systému je možné vidět na obrázku 31.



Obr. 31 – Schéma zapojení regulačního systému

Praktická část spočívala ve vytvoření systému, který by optimalizoval přetoky do distribuční sítě a část vyrobené energie z malé fotovoltaické elektrárny v závislosti na dodávaném výkonu posílal do akumulární nádrže na užitkovou vodu.

Na stejném principu funguje např. zařízení Wattrouter nebo GreenBono, což jsou programovatelné regulátory pro optimalizaci vlastní spotřeby v objektech s instalovanou fotovoltaickou elektrárnou. V mnoha případech jsou tato zařízení postačující, ale pouze pro jednodušší aplikace. Nevýhodou těchto komerčně dostupných systémů je, že disponují omezeným počtem vstupů a výstupů, neměří přesně jalovou složku výkonu a nelze u nich vytvářet vlastní logiku, která by byla zapotřebí pro složitější aplikace.

Jako náhrada spínacího zařízení, které je řízeno pomocí PWM, může sloužit Solid State Relay. Stručný popis této elektronické součástky se nachází v následující kapitole.

## 6.1 Solid State Relay

Solid State Relay je polovodičové spínací zařízení, které spíná nebo rozepíná připojenou zátěž, když je na jeho vstupní svorky přivedeno řídicí napětí. SSR je v dnešní době hojně využívané v mnoha aplikacích – například v automatických pračkách, programovatelných automatech, klimatizacích, laserových tiskárnách, ovládacích motorů, atd. Jejich vývoj spočíval především v částečném nahrazení klasických elektromechanických relé, protože moderní technologie se vytváří stále více kompaktní a ne všude se hodí instalovat klasické relé nebo v místech, kde se počítá s dlouhou životností zařízení. [23]

SSR má oproti klasickému elektromagnetickému relé galvanicky oddělený vstup a výstup. Oddělení vstupní a výstupní části je realizováno několika způsoby:

- **Elektromagneticky** – oddělovací transformátorem. Nevýhodou tohoto řešení je zpětný přenos signálu, který při poruchových stavech může přenést nežádoucí signál do řídicí části obvodu. Nevyužívá se příliš často.
- **Kapacitně** – podobné elektromagnetickému oddělení a také se méně používá (kvůli stejnému problému s přenosem poruchových signálů).
- **Opticky** – pomocí optronu (vazba optického zdroje a optického detektoru). Jedná se o nejpoužívanější typ SSR. Hlavní výhodou je jednosměrný přenos signálu (opačně se projevují jen parazitní kapacity).

V našem případě je využito Solid State Relay, ve kterém je přenos signálu ze vstupu na výstup realizován optickou vazbou. Řízení spínacího prvku probíhá v oblasti blízké průchodu signálu nulou. Tímto způsobem řízení lze minimalizovat vysokofrekvenční rušení. SSR je vypnuto při průchodu výstupního signálu nulou po přerušení vstupního signálu. Vazba v SSR je realizována pomocí LED diody a optického přijímače. Signál je v přijímači opět konvertován na elektrický a porovnán s výstupním signálem celého obvodu kvůli detekci průchodu napětí nulou. Na výstupu je SSR navíc obohaceno o RC filtr k potlačení napěťových špiček.

Výhod SSR oproti klasickým elektromechanickým je celá řada. Jelikož nemají v sobě zabudovanou žádnou mechanickou část, nedochází u nich k mechanickým opotřebením, s čímž souvisí i daleko delší životnost. Navíc bez mechanických kontaktů nedochází k vytváření jiskření či elektrických oblouků. Disponují velkou spínací rychlostí a odolností vůči nárazům či vibracím. [23]

Mezi nevýhody SSR se řadí především vytváření tepla, které se zvyšuje se zatěžovacím proudem. Vstupní a výstupní obvody jsou velice citlivé na velikost přivedeného napětí či proudu, což znamená, že se SSR může po překročení povolených hodnot poškodit, i když je nevhodnému napětí či proudu vystaveno jen krátkou dobu. Další nevýhodou je fakt, že relé není nikdy ideálně vypnuto kvůli svodovým proudům.



Obr. 32 – SSR Carlo Gavazzi

## 6.2 Aplikace PLC C-pro3 NODE kilo

V práci jsem se zabýval možnostmi umístění řídicího systému v jiné budově, než se nachází rozvaděč s hlavním měřením. Pro toto konkrétní zapojení je výhodnější využít průmyslové PLC, které lze libovolně naprogramovat podle potřeby uživatele a disponuje velkým počtem vstupních a výstupních kontaktů. Vytvářený systém je řízen pomocí PLC C-pro3 NODE kilo.

Hlavní výhodou typu C-pro3 NODE kilo je, že obsahuje celou řadu vstupních i výstupních kontaktů na velmi malém prostoru, čímž minimalizuje prostorové nároky na instalaci v rozvaděči. Lze je pořídit s integrovaným uživatelským rozhraním, které obsahuje grafický LCD displej a šest kláves, nebo bez displeje se vzdáleným přístupem. Kontrolér je napájen 24 V (AC/DC). Disponuje také integrovaným webovým serverem, který umožňuje přímé připojení ke kontroléru a vytvoření vlastního uživatelského prostředí, které může sloužit k zobrazování zvolených měřených veličin. Pro přístup k webovému serveru z venkovní sítě je nutné použít statickou veřejnou IP adresu. Rozmanitost dostupných komunikačních portů (RS-485, CAN, USB a Ethernet) a podporovaných komunikačních protokolů zlepšuje začlenění kontroléru do mnohých systémů. K naprogramování kontroléru se používá programovací prostředí UNI-PRO, které dokáže automaticky vygenerovat přednastavené webové stránky.

Pro praktickou realizaci byla zvolena kombinace PLC C-pro3 NODE kilo, Solid State Relay s optickou vazbou a multimetru NEMO 96hd. Předně bylo nutné experimentálně ověřit, jak takováto zařízení fungují. Inspirací pro praktické ověření bylo zapojení komerčně dostupného regulačního systému v bytovém domě v Plzni s fotovoltaickou elektrárnou na střeše. V první řadě bylo nutné zjistit, jakým způsobem řídit Solid State Relay. Ukázka naměřeného průběhu na výstupu řízeného SSR se nachází v příloze.



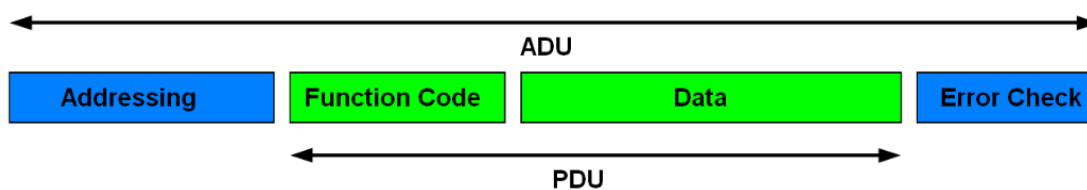
Obr. 33 – Kontrolér C-pro3 NODE kilo

### 6.3 Komunikační protokol MODBUS

K realizaci komunikace mezi PLC C-pro3 NODE kilo a čtyřkvadrantovým altimetrem NEMO 96hd bylo nutné porozumět fungování komunikačního protokolu MODBUS.

Modbus se nazývá komunikační protokol, který umožňuje přenos dat mezi klientem a serverem (Master a Slave) a zařízeními na různých typech sběrnic a sítí. V dnešní době se využívají celé řady komunikačních médií, mezi které patří např. sériové linky typu RS-232, RS-422 a RS-485, nebo síť Ethernet, který používá protokol TCP/IP. Komunikace probíhá tak, že na sběrnici je jedno zařízení označené jako „master“ (pokud využívá Modbus protokol TCP, může jich být více), které posílá ostatním zařízením „slave“ požadavky či dotazy. Zařízení slave odpovídají na dotazy, které jsou adresovány přímo jim. Na pozici master jsou obvykle řídicí prvky (například PLC nebo PC) a v roli zařízení slave jsou řízené nebo měřicí prvky (měřicí přístroje, čidla, jiná PLC). Požadovaný dotaz je specifikován pomocí kódu funkce, jež je součástí požadavku. [24]

Modbus na úrovni protokolu (PDU – Protocol Data Unit) definuje strukturu zprávy zcela nezávisle na typu komunikační vrstvy. Použití protokolu závisí na typu sítě, ve které se funkce pohybuje. Pro rozlišení se PDU rozšíří o přidanou adresu a kontrolní součet, čímž vytvoří celek nazývaný se ADU – Application Data Unit, neboli zprávu na aplikační úrovni. [24]

**General MODBUS Frame**

*Obr. 34 – Základní tvar MODBUS zprávy*

Podle kódu funkce (na Obr. 34 – Function Code) se slave rozhoduje, jaký druh operace se má provést. Rozsah kódů je 1 – 255, avšak kódy 128 - 255 jsou rezervovány pro oznámení chybového hlášení. Datová část zprávy, kterou posílá klient, uskutečňuje danou operaci, která je blíže určena kódem funkce. Obsah datové části může být například adresa a počet vstupů nebo číslo registru, které má server přečíst nebo zapsat, ale může obsahovat i jiné informace. Ne ke všem funkcím je zapotřebí datové části.

Jestliže nedojde při provádění žádané operace k chybě, server posílá zpět zprávu, jejíž kód funkce obsahuje kód požadované operace k rozpoznání úspěšného provedení. V datové části předá server požadované informace, které klient žádal.

Pokud ovšem při výkonu operace k chybě dojde, tak je do kódu funkce začleněn kód požadované funkce s nastaveným nejvyšším bitem, který indikuje selhání. Datová část obsahuje kód chyby, který upřesňuje důvod selhání. [24]

V objektu v Domažlicích je implementovaný multimetr NEMO 96hd, který umožňuje měření ve čtyřech kvadrantech – činnou a jalovou složku výkonu dodávanou i odebíranou. Z multimetru NEMO, který disponuje komunikačním rozhraním Modbus RS-485, se načítají data na vstupu do objektu a vyhodnocuje se směr toku výkonu. Multimetr je propojen pomocí kabelu JYSTY 2x2x0,75 s PLC C-pro3 NODE kilo, které je umístěno v rozvaděči v technické místnosti. PLC pracuje v režimu master a vyčítá hodnoty výkonu z multimetru. Hodnoty jsou posílány multimetrem v datovém typu LONG, ale aby mohly být přeneseny po sběrnici Modbus RS-485, jsou rozděleny na 2 datové typy WORD. Ve vytvořeném programu bylo nutné tyto dva datové typy WORD znovu sloučit do typu LONG a přiřadit k němu příslušné znaménko, které udává směr toku výkonu.



## 6.4 Programovací prostředí UNI-PRO

Ke správné funkci systému bylo nutné porozumět programovacímu prostředí UNI-PRO. V práci jsou použity nově vytvořené funkce a zároveň již existující, které s nově vytvořenými spolupracují.

UNI-PRO je název programovací prostředí pro programovatelné kontroléry typu C-pro 3. V tomto prostředí je možné vytvářet a přizpůsobovat složité projekty pro potřeby klienta. Uživatelské prostředí je velice příjemné a umožňuje využívat velkou řadu integrovaných knihoven. Tyto knihovny se dělí do tří základních sekcí – Application, Standard a System.

V sekci *Application* se nacházejí moduly, které lze využít především v oblasti vytápění, chlazení či ventilace. Sekce *Standard* disponuje základními funkcemi, mezi které patří například logické členy, konvertory, čítače a jiné. V sekci *System* může uživatel nalézt nastavení komunikace s jinými zařízeními, které komunikují skrz sběrnici CAN, Modbus nebo Ethernet TCP/IP.

Software disponuje také velmi podrobnou a uživateli velmi využívanou nápovědu v anglickém jazyce. Nápověda obsahuje charakteristiku jednotlivých funkčních bloků, základní příkazy užívané v programovacím jazyce C a popis hardwarového zařízení.

V softwaru UNI-PRO je možné vytvářet programy pouze pro výrobky od firmy EVCO. Na začátku programování si uživatel zvolí, pro jaký typ kontroléru a uživatelské rozhraní je projekt vytvářen. Po zadání kontroléru se v programu objeví jeho přesný počet vstupů a výstupů, se kterými může uživatel libovolně pracovat. Pokud nastala fáze, kdy by uživatel byl nucen změnit typ kontroléru s jiným počtem vstupů či výstupů, lze tak učinit v nastavení, ale všechny nové vstupy a výstupy je nutné opět přiřadit k jednotlivým blokům a zařízením.

Vytváření programu je rozděleno na dvě části. Nejprve se vytvoří vlastní algoritmus pomocí funkčních bloků. Přidají se potřebné vstupy, výstupy, proměnné, atd. Pro lepší přehlednost je možné v programu vytvořit složky a podsložky. To je výhodné zejména u větších projektů. Při vytváření vlastních algoritmů je vhodné využít program pro jeho kontrolu (AlgoSim). Tento program zkontroluje syntaxi a upozorní na případné chyby. Dále je možné provést kontrolu funkčnosti zadáním vstupů. Pokud uživatel takto neučiní, chybová hlášení se objeví až při kompilaci programu.

Nevýhodou softwaru UNI-PRO je funkce *debugger*. Tato operace funguje pouze tehdy, je-li vytvořený program stažený do kontroléru. Pokud uživatel nevlastní kontrolér, není možné program jakkoli odladit.

V moderních verzích UNI-PRO lze navíc generovat automaticky vlastní webový server. Vybrané objekty se zobrazí v přednastavené tabulce. Pro lepší přehlednost lze vytvářet přímo v softwaru jednotlivé záložky, které obsahují různé tabulky s předdefinovaným obsahem. Vygenerované soubory pro webový server jsou zpočátku uloženy na pevném disku počítače, kde si uživatel může libovolně naformátovat jeho vzhled. Nakonec se soubory stáhnou pomocí programu UNI-PRO do kontroléru. [25]

## 6.5 Praktická realizace regulace přebytků z FVE

Pro správné fungování systému bylo nutné ověřit, jestli při požadovaném otevření SSR bude zadaná procentuální hodnota výkonu z FVE odpovídat skutečné hodnotě výkonu akumulární nádrže. Pro ověření jsem vytvořil jednoduchý program v softwaru UNI-PRO (schéma programu lze nalézt v příloze), kterým se nastavovala frekvence cyklu pulzní šířkové modulace (frekvence byla zjištěna experimentálním měřením na již existujícím systému v bytovém domě v Plzni). Měření probíhalo na jednofázovém elektroměru Conto d2 od společnosti IME, který měří jak spotřebovanou energii, tak i napětí, proud a výkon, a odporové zátěži o příkonu 1,345 kW (ukázka regulované průběhu se nachází v příloze). V následující tabulce č. 4 jsou některé vybrané hodnoty z měření. V tabulce se nachází hodnoty teoretického výkonu, který odpovídá násobkům deseti procentuálních hodnot příkonu odporového vaříče. Z elektroměru byly odečítány vždy dvě hodnoty, protože výkon lehce kolísá. Zaznamenávaly se vždy nejnižší a nejvyšší hodnoty výkonu. Hodnoty se v závěru od sebe odečetly a výsledný rozdíl kolísání výkonů se nachází ve čtvrtém sloupci.


Výkon teoretický (kW)	Výkon měřený 1 (kW)	Výkon měřený 2 (kW)	Rozdíl měřených výkonů (W)
0,134500269	0,096	0,173	77
0,269000538	0,257	0,282	25
0,403500807	0,388	0,444	56
0,538001076	0,526	0,548	22
0,672501345	0,624	0,71	86
0,807001614	0,796	0,826	30
0,941501883	0,945	0,972	27
1,076002152	1,039	1,071	32
1,210502421	1,154	1,255	101
1,34500269	1,316	1,321	5

Tabulka č. 4 – Srovnání teoretického a měřeného výkonu dodávaného do odporového vaříče

Podle výsledků měření se doporučuji nastavit offset SSR na hodnotu 100 W, kterou ale uživatel může kdykoli změnit. Hodnota by měla korespondovat s největším kolísáním měřených výkonů, které má hodnotu 101 W (uvedeno v Tabulce č. 4). Pokud výkon FV elektrárny nepřesáhne 100 W a objekt žádný výkon neodebírá, neposílá se do akumulární nádrže žádný výkon.

Regulační systém je navržen tak, aby analyzátor NEMO 96hd měřil přebytky výkonu a jejich hodnoty posílal po sběrnici RS-485 do PLC. V kontroléru dojde k vyhodnocení, jestli objekt odebírá energii nebo ji posílá do distribuční sítě. Na akumulární nádrži je teplotní čidlo PT 1000, které zjišťuje aktuální teplotu vody v nádrži. Pokud je teplota vody v nádrži menší než požadovaná a FV elektrárna nevyrábí, SSR se otevře na 100 % a voda se začne ohřívat energií dodávanou z distribuční soustavy. Pokud FV elektrárna vyrábí a teplota v nádrži je menší než maximální (bezpečnostní hodnota), výkon SSR je řízen podle velikosti přebytků a voda se postupně přitápí až do maximální hodnoty.

Na obrázku 34 se nachází vygenerované webové rozhraní. Je zde možné vidět aktuální spotřebu na jednotlivých fázích. Záporná hodnota spotřeby značí, že FV elektrárna vyrábí a její výkon není spotřebováván objektem. V takovém případě dochází k přetokům do distribuční soustavy. Teplotní čidlo zobrazuje aktuální teplotu bojleru – aktuálně 45 °C. Požadovaná teplota bojleru značí přednastavenou minimální hodnotu teploty v daném časovém úseku (denní nebo noční). V uvedené časy dojde každý den ke změně z nočního na denní režim. Maximální teplota v nádrži je nastavena na 60 °C (jedná se o bezpečnostní hodnotu, při které dojde k odepnutí topné spirály v případě selhání termostatu). Všechny výše uvedené hodnoty lze libovolně upravovat a nastavovat podle potřeb uživatele.



EVCO  
Every Control Group

Unlock param

SSR				
NAME	VALUE	MIN	MAX	DEF. VALUE
Spotřeba L1 [W]	-2540.00	-2147483648	2147483647	-254000
Spotřeba L2 [W]	-2320.00	-2147483648	2147483647	-232000
Spotřeba L3 [W]	-65.00	-2147483648	2147483647	-6500
Aktuální teplota boiler [°C]	45.0	-32768	32767	450
Požadovaná teplota boileru [°C]	30.0	-32768	32767	0
Instalovaný výkon patrony [W]	2200.00	-2147483648	2147483647	220000
Offset patrony [W]	50.00	-2147483648	2147483647	5000
Zacatek denní teploty [°C]	06:00:00	0	86399	21600
Teplota boileru den [°C]	35.0	-32768	32767	350
Konec denní teploty [°C]	17:00:00	0	86399	61200
Teplota boileru noc [°C]	30.0	-32768	32767	300
Max. teplota boileru [°C]	60.0	-32768	32767	600
Energie L1 za den [kWh]	0.00	-2147483648	2147483647	0
Energie L1 za mesic [kWh]	0.00	-2147483648	2147483647	0
Energie L1 od začátku [kWh]	0.00	-2147483648	2147483647	0

Online

Obr. 34 – Ukázka webového rozhraní

## 6.6 Zhodnocení 3E

Zkratkou 3E jsou označována pravidla, které hodnotí účelnost (Efficiency), hospodárnost (Economy) a efektivnost (Effectivity) vytvářeného projektu.

Ceník navrhovaného systému se nachází v tabulce č. 5:

Instalační materiál	Množství	Cena v Kč (bez DPH)
Kabel JYSTY 2x2x0,75	50 m	380
Multimetr IME NEMO 96hd	1 ks	4495
PLC EVCO C-pro3 NODE kilo	1 ks	9400
Měřicí transformátor proudu 50/5	3 ks	633
Napájecí zdroj 24 VDC Cabur	1 ks	1200
SSR Carlo Gavazzi	1 ks	790
Celková práce (zapojení + programování)	36 hod	3600
<b>Celkem</b>		<b>20498</b>

Tabulka č. 5 – Cenový návrh systému

Účelnost systému lze považovat za adekvátní. Navrhovaný systém dokáže dokonale nahradit zavedené komerčně dostupné regulační prvky. Dokonce má oproti stávajícím systémům řadu výhod. Pro příklad lze uvést možnost instalace řídicího PLC v libovolném rozvaděči mimo rozvaděč s měřicími přístroji. Dále je tu také možnost zapojit více systémů (budov) do jednoho PLC, které dokáže řídit všechny najednou. Nelze opomenout také možnost uživatele jakkoli podle potřeby měnit naprogramovaný systém či požadované regulační parametry.

Efektivitu a ekonomii lze spojit do jednoho bodu. Vzhledem k současným výkupním cenám energií je jen otázkou času, kdy se tyto nebo podobné systémy budou instalovat běžně. Většina majitelů malých fotovoltaických elektráren tápe, jak lépe zúročit vyrobenou energii, než jí posílat do distribuční sítě. Je možné využít hybridní systém pro akumulaci přebytečné energie v bateriích, ale pořizovací cena těchto systémů je zatím příliš vysoká.

Zatím nejvýhodnější je využití akumulace energie do vody, čímž může majitel FVE ušetřit za vytápění, plynový ohřev, a to dokonce i v době, kdy je pod mrakem. Systém se může použít i k řízení výkonu kompresoru tepelného čerpadla, které disponuje analogovými vstupy. Tato čerpadla nejsou zatím na trhu hojně k dostání, ale možnost jejich řízení využitím PLC by byl velký krok kupředu v oblasti vytápění. To samé platí i pro klimatizace s analogovými vstupy, jejichž řízení by bylo obdobné jako u tepelných čerpadel.

Bližší informace o úspoře energie a finančních prostředků jsou uvedeny v tabulce č. 6. Výpočty byly provedeny na základě kalorimetrické rovnice a z naměřených přetoků do distribuční soustavy z předchozích let. Stávající systém je navržen pro jedno SSR s možností rozšíření prakticky na libovolný počet. V případě využití většího počtu výstupů by cena vzrostla minimálně a úspory by se výrazně zvýšily.

Množství ohřívání vody/den (l)	80
Počáteční teplota vody (°C)	15
Koncová teplota vody (°C)	60
Množství ušetřené energie (kWh)	4,18
Cena za kWh (Kč)	2,30
Odhad ušetřené energie za 210 dní (kWh)	877,8
Úspora na ohřev za 210 dní (Kč)	2018,94

*Tabulka č. 6 – Zhodnocení úspory energie a financí*

## Závěr

V diplomové práci jsem popsal jednotlivé vady fotovoltaických článků a panelů, které se mohou vyskytnout při nedokonalé výrobě, nesprávné manipulaci a degradaci vlivem působení nepříznivého prostředí. Jako nejčastější defekt, který se na panelech vyskytuje, se jeví částečné zastínění panelu, které může nenávratně narušit funkci jednotlivých článků, pokud by k zastínění docházelo pravidelně. Ze zastíněných článků se stávají spotřebiče a snižují výkon celého panelu. Navíc dochází k jejich zahřívání, čímž může docházet k jejich degradaci. Je proto nutné zvolit anebo přizpůsobit okolní prostředí panelů tak, aby nic nemohlo stínit v žádném ročním období.

Další fáze diplomové práce spočívala v experimentálním ověření testovacího hydrofobního přípravku vyrobeného pomocí nanotechnologie. Porovnáním vyrobené energie ze dvou stringů malé FVE jsem došel k závěru, že hydrofobní nános nemá žádný vliv na výkon stringu. K nátěru došlo v září a v dubnu byly hodnoty denní vyrobené energie z obou stringů srovnatelné. Tento typ ošetření proto nedoporučuji používat. Panely stačí jen dvakrát do roka umýt vodou a odmastit.

V práci jsem také prakticky realizoval vlastní systém řízení přebytků. Inspiraci jsem našel v již fungujících komerčních zařízeních, které však slouží jen k jednomu účelu, nelze je implementovat k ovládnání více objektů a nelze je nijak přeprogramovat pro náročnější potřeby uživatele. Mnou navržený systém se hodí pro regulaci přebytků ve více objektech, neboť je řízen kontrolérem s větším počtem vstupů a výstupů, než je tomu u běžně dostupných zařízení. PLC lze také naprogramovat v softwaru UNI-PRO podle přání uživatele a vygenerovat webové prostředí, kterým lze lehce zjišťovat či měnit parametry celého systému. Dle mého názoru je navrhovaný systém uživatelsky příjemný a lze ho instalovat do již fungujících FVE.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] – LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. *Fotovoltaika: teorie i praxe využití solární energie*. 2., dopl. vyd. Praha: Ilsa, 2010. ISBN 978-80-904311-5-7.
- [2] – Fyzikální principy záření. *ČEZ* [online]. Praha, 2011 [cit. 2016-04-07]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k11.htm>
- [3] – KRACÍK, Jiří, Jindřich LEGO a Věra ŠANDEROVÁ. *Fyzika*. sv. 2. Praha: ČVUT, 1979. [cit. 2016-04-07].
- [4] – Solární (fotovoltaické) články. *ČEZ* [online]. Praha, 2011 [cit. 2016-04-07]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k32.htm>
- [5] – Tenkovrstvé panely. *E-SHOP TERMS* [online]. České Budějovice, 2013 [cit. 2016-04-07]. Dostupné z: <http://eshop.terms.eu/cz/e-shop/c68831/tenkovrstve-panely.html>
- [6] – VOJÁČEK, Antonín. Začínáme s fotovoltaickými panely. *Elektroinstalatér* [online]. Praha, 2009 [cit. 2016-04-07]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/6068-zaciname-s-fotovoltaickymi-panely>
- [7] – KOSTKA, Tomáš. *Fotovoltaické systémy - úvod do problematiky* [online]. 2015, [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: [http://www.outech-havirov.cz/skola/files/knihovna\\_eltech/ee/fvs\\_uvod.pdf](http://www.outech-havirov.cz/skola/files/knihovna_eltech/ee/fvs_uvod.pdf)
- [8] – VANĚK, Jiří. *Diagnostické metody fotovoltaických článků* [online]. Brno, 2010 [cit. 2016-04-11]. Dostupné z: <http://www.asb-portal.cz/tzb/fotovoltaika/diagnosticke-metody-fotovoltaickych-clanku>
- [9] – INDRA, Jiří. *Degradace solárních článků světlem* [online]. Brno, 2010. 73s [cit. 2016-04-12]. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Jiří Vaněk.
- [10] – JANDOVÁ, Kristýna. *Diagnostické metody plošného rozložení defektů solárních článků*. Brno, 2008. 92 s. [cit. 2016-04-12]. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Jiří Vaněk.
- [11] – ŘIHÁČEK, Aleš. *Fotovoltaické elektrárny ve stresu* [online]. 2011 [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <http://www.eicero.cz>
- [12] – LAHKÝ, Martin. *Pokles výkonu fotovoltaických elektráren v důsledku vysokonapětového stresu* [online]. 2015 [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/12260-pokles-vykonu-fotovoltaickych-elektren-v-dusledku-vysokonapetoveho-stresu>
- [13] – P. Hacke, et al, System Voltage Potential-Induced Degradation Mechanisms in PV Modules and Methods for Test, NREL, 37TH IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC 37), Seattle, Washington, 19–24 June 2011 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/12260-pokles-vykonu-fotovoltaickych-elektren-v-dusledku-vysokonapetoveho-stresu>



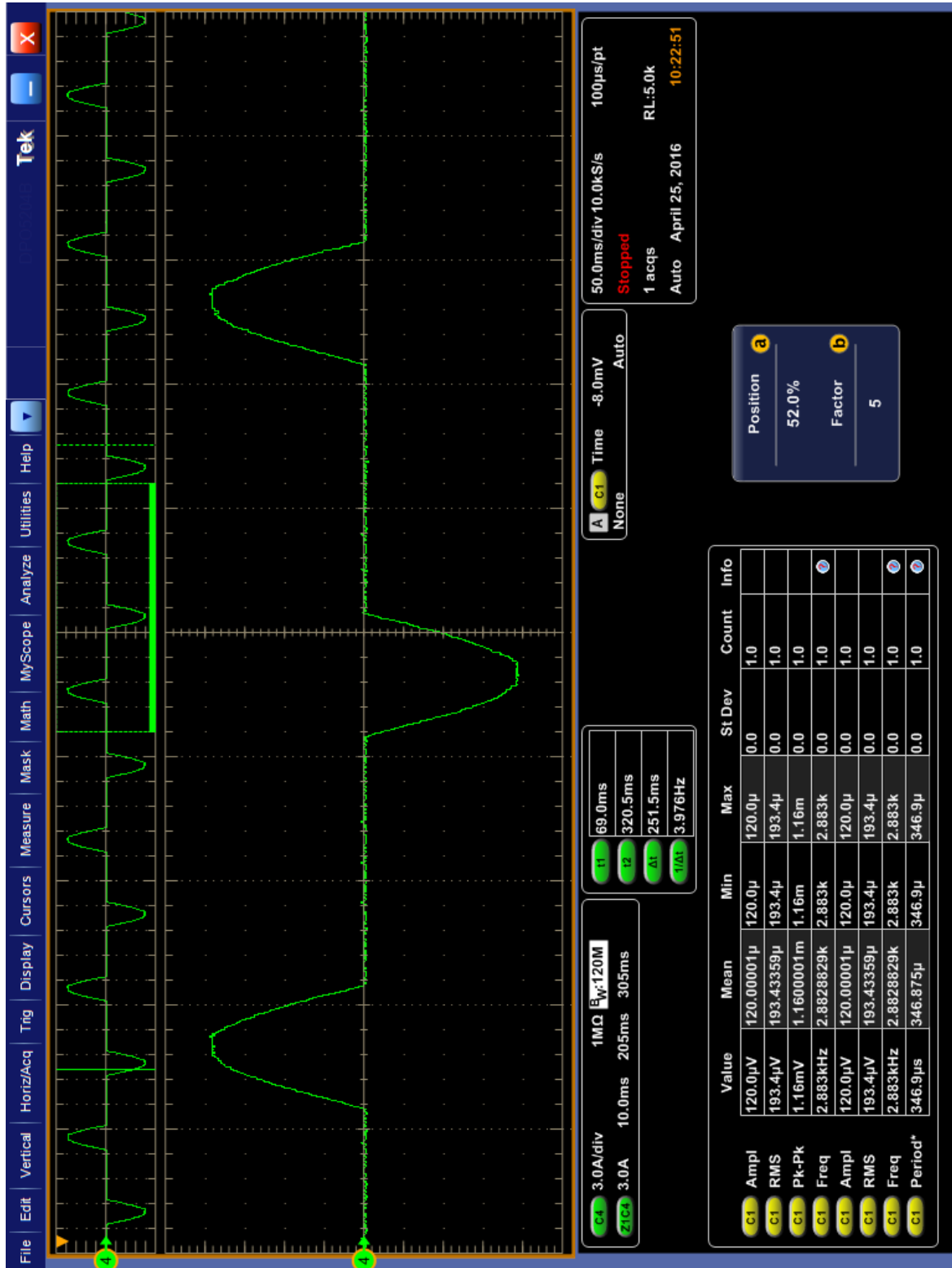
- [14] – TOMEŠ, Milan. Zkušenost soudního znalce z posuzování FVE v roce 2011 (2. část - dokončení). ELEKTRO [online]. 2012 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/flipviewer/Elektro/2012/05/Elektro\\_05\\_2012\\_output/web/Elektro\\_05\\_2012\\_opf\\_files/WebSearch/page0064.html](http://www.odbornecasopisy.cz/flipviewer/Elektro/2012/05/Elektro_05_2012_output/web/Elektro_05_2012_opf_files/WebSearch/page0064.html)
- [15] – JAKUBES, Jaroslav. Fenomén „Snail Trails“. *TZB-info* [online]. 2012 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/9020-fenomen-snail-trails-sneci-cesticky>
- [16] – TOMEŠ, Milan. Zkušenost soudního znalce z posuzování FVE v roce 2011 (1. část). ELEKTRO [online]. 2012 [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: <http://uniesoudnichznalcu.cz/public/media/files/e04-2012.pdf>
- [17] – TOMEŠ, Milan. *Zkušenost soudního znalce z posuzování FVE v roce 2011*. Ostrava, 2012. [cit. 2016-04-20] Unie soudních znalců.
- [18] – KOCANDA, Tomáš. Odpínání a jištění DC rozvodů fotovoltaických elektráren. TechPark vydavatel'stvo [online]. Praha [cit. 2016-04-21]. Dostupné z: <http://www.solartechnika.sk/solartechnika-22010/odpinani-a-jisteni-dc-rozvodu-fotovoltaickych-elektren.html>
- [19] – KLIMEK, Petr. I elektronika solárních elektráren se vyvíjí. Přichází nové možnosti sledování výkonu. *Nazeleno.cz* [online]. 2013 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.nazeleno.cz/i-elektronika-solarnich-elektren-se-vyviji-prichazeji-nove-moznosti-sledovani-vykonu.aspx>
- [20] – DOLEŽEL, Michal. Fotovoltaická elektrárna pro vlastní spotřebu? Jde to překvapivě snadno. *Nazeleno.cz* [online]. 2013 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: [www.nazeleno.cz/energie/solarni-energie/fotovoltaicka-elektarna-pro-vlastni-potrebu-jde-to-prekvapive-snadno.aspx](http://www.nazeleno.cz/energie/solarni-energie/fotovoltaicka-elektarna-pro-vlastni-potrebu-jde-to-prekvapive-snadno.aspx)
- [21] – DOLEŽEL, Michal. Lithium-železo-fosfátové akumulátory – budoucnost domácí výroby a spotřeby elektriny. *Nazeleno.cz* [online]. 2014 [cit. 2016-04-27]. Dostupné z: <http://www.nazeleno.cz/lithium-zelezo-fosfatove-akumulatory-budoucnost-domaci-vyroby-a-spotreby-elekriny.aspx>
- [22] – SRDEČNÝ, Karel. Solární ohřev vody z pohledu ceny – vyplatí se spíš fotovoltika. *Nazeleno.cz* [online]. 2013 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://www.nazeleno.cz/solarni-ohrev-vody-z-pohledu-ceny-vyplati-se-spis-fotovoltaika.aspx>
- [23] – SSR: nejdůležitější parametry i stinné stránky. *www.hw.cz* [online]. [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/vykonove-obvody/ssr-nejdulezitejsi-parametry-i-stinne-stranky.html>
- [24] – RONEŠOVÁ, Andrea. *Přehled protokolu MODBUS* [online]. 2005, 20 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~ronesova/bastl/files/modbus.pdf>
- [25] – JIŘINEC, Jakub. *Optimalizace otopných soustav*. Plzeň, 2015. Diplomová. FEL ZČU, Plzeň.

## Seznam obrázků

- Obr. 2** – [http://www.stresniinstalace.cz/uploads/RTEmagicC\\_image1003\\_01.jpg](http://www.stresniinstalace.cz/uploads/RTEmagicC_image1003_01.jpg)  
**Obr. 3** – [http://www.stresniinstalace.cz/uploads/RTEmagicC\\_image1004.jpg](http://www.stresniinstalace.cz/uploads/RTEmagicC_image1004.jpg)  
**Obr. 4** – <http://www.drevoastavby.cz/images/>  
**Obr. 5** – [http://www.outech-havirov.cz/skola/files/knihovna\\_eltech/ee/fvs\\_uvod.pdf](http://www.outech-havirov.cz/skola/files/knihovna_eltech/ee/fvs_uvod.pdf)  
**Obr. 6** – <http://static1.squarespace.com>  
**Obr. 7** – [http://www.outech-havirov.cz/skola/files/knihovna\\_eltech/ee/fvs\\_uvod.pdf](http://www.outech-havirov.cz/skola/files/knihovna_eltech/ee/fvs_uvod.pdf)  
**Obr. 8** – <http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/978-80-214-3824-8.pdf>  
**Obr. 9** – <http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/978-80-214-3824-8.pdf>  
**Obr. 10** – <http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/978-80-214-3824-8.pdf>  
**Obr. 11** – <http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/978-80-214-3824-8.pdf>  
**Obr. 12** – <http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/978-80-214-3824-8.pdf>  
**Obr. 13** – <http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/978-80-214-3824-8.pdf>  
**Obr. 14** – <http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/978-80-214-3824-8.pdf>  
**Obr. 15** – <http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/978-80-214-3824-8.pdf>  
**Obr. 16** – <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika>  
**Obr. 17** – <http://www.vaseenergie.cz>  
**Obr. 18** – <http://www.vaseenergie.cz>  
**Obr. 19** – <http://uniesoudnichznalcu.cz/public/media/files/e04-2012.pdf>  
**Obr. 20** – <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika>  
**Obr. 21** – <http://www.sunfin.cz>  
**Obr. 22** – [http://www.solarencvi.cz/UserFiles/images/img\\_fv\\_hybrid.jpg](http://www.solarencvi.cz/UserFiles/images/img_fv_hybrid.jpg)  
**Obr. 23** – <http://www.nazeleno.cz>  
**Obr. 24** – <http://www.kurenie-solar.sk>  
**Obr. 26** – <http://www.tribaseelectric.cz>  
**Obr. 32** – <http://www.wolfautomation.com/assets/15/RS23.JPG>  
**Obr. 33** – <http://www.evco.it>  
**Obr. 34** – <http://gridconnect.com/blog/tag/modbus-explained>

# Přílohy

## Ukázka regulovaného průběhu na odporovém spotřebiči



Ukázka vytvořeného programu v softwaru UNI-PRO

