

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Analýza VA charakteristik jako metoda ověření
parametrů FVE**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jakub ŠTALMACH**
Osobní číslo: **E11N0196P**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Analýza VA charakteristik jako metoda ověření parametrů FVE**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Zásady pro vypracování:

1. Popište základní vlastnosti a parametry fotovoltaických článků.
2. Vysvětlete vliv jednotlivých parametrů na VA charakteristiku FV článku.
3. Navrhněte metodu sledování parametrů FVE pomocí VA charakteristik.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

1. Poulek, Libra: Solární energie

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

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2012**
Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2013**


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




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

V Plzni dne 15. října 2012

Anotace

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na bližší pochopení funkce FV článků se zaměřením na jejich jednotlivé primární parametry z hlediska elektrického výkonu. Vysvětluje vliv parametrů FV článků na VA charakteristiku a ovlivnění průběhu VA charakteristik. Zabývá se návrhem metody sledování parametrů FVE pomocí VA charakteristik včetně ukázky praktického měření spojeného s následným vyhodnocením naměřených výsledků.

Klíčová slova

FV článek, VA charakteristika, PN přechod, fotoelektrický jev, jednoduchý článek, tandemový článek, monokrystal, polykrystal, koncentrátor, křemík, zkratový proud, napětí naprázdno, proud při maximálním výkonu, napětí při maximálním výkonu, maximální výkon, Fill Factor, účinnost, sériový odpor, paralelní odpor, teplota, degradace, intenzita osvětlení, polymer, analyzátor, diagnostika.

Abstract

This diploma thesis focused on further understanding the function of PV cells with a focus on their individual primary parameters of the electric output. It explains the influence of parameters of PV cells on VA characteristics and influence over the VA characteristics. It deals with design methods for monitoring parameters using PVP VA characteristics including practical examples of measurements associated with subsequent evaluation of the measured results

Key words

PV cell, VA characteristics, PN junction, photoelectric effect, single article, tandem article, single crystals, poly crystals, concentrator, silicon, short circuit current, open circuit voltage, maximum output current, voltage at maximum power, maximum power, Fill Factor, efficiency, series resistance, parallel resistance, temperature, degradation, illumination, polymer, analyzers, Diagnostics.

Prohlášení

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

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

.....

Podpis

V plzni dne 8.5.2013

Bc. Jakub Štalmach

Poděkování

Chtěl bych zde poděkovat všem osobám, jež se více či méně podílely na vzniku této práce. Zejména děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Milanu Bělíkovi, Ph.D. za metodické vedení, odborné poradenství a pomoc, při plnění rozsahu zadání diplomové práce. Dále děkuji panu Marku Zemanovi za poskytnutí přístupu k vlastní FVE a umožnění ověřit navrženou metodu sledování FVE v praxi. V neposlední řadě děkuji své rodině, blízkým a kamarádům, za poskytnutí zázemí, podpory a motivace po celou dobu zpracovávání předkládané diplomové práce.

OBSAH

OBSAH	8
SEZNAM ZKRATEK	10
1. ÚVOD	11
2. POPIŠTE ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI A PARAMETRY FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ	12
2.1. HISTORIE VÝVOJE FV ENERGIE.....	12
2.2. FV ČLÁNEK	16
2.3. ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ FV ČLÁNKŮ A JEJICH PARAMETRY.....	17
2.3.1. KLASICKÉ TECHNOLOGIE KRYSTALICKÝCH ČLÁNKŮ	18
2.3.2. METODY ZÍSKÁVÁNÍ CHEMICKY ČISTÉHO KŘEMÍKU	18
2.3.3. VÝROBA MONOKRYSTALICKÉHO KŘEMÍKU	20
2.3.4. VÝROBA POLYKRYSTALICKÉHO KŘEMÍKU	22
2.3.5. MONOKRYSTALICKÉ FV ČLÁNKY	24
2.3.6. POLYKRYSTALICKÉ FV ČLÁNKY	26
2.3.7. SPECIÁLNÍ FV ČLÁNKY.....	29
2.3.8. TECHNOLOGIE TENKÝCH VRSTEV	31
2.3.9. TECHNOLOGIE VÝROBY TENKÝCH VRSTEV	33
2.3.9.1. AMORFNÍ KŘEMÍKOVÉ ČLÁNKY (A-SI).....	34
2.3.9.2. TANDEMOMÉ TENKOVRSŤVÉ FV ČLÁNKY	35
2.3.9.3. MIKROMORFNÍ SOLÁRNÍ FV ČLÁNKY (U-SI A A-SI).....	36
2.3.9.4. ZVLÁŠTNOSTI TENKOVRSŤVÝCH TECHNOLOGIÍ VS. KRYSTALICKÉ FV ČLÁNKY	37
2.3.10. TECHNOLOGIE NEKŘEMÍKOVÉ	39
2.3.10.1. CSI FV ČLÁNKY (COPPER-INDIUM-DISELENID, DVOJSELENID MĚDI-INDIA)	39
2.3.10.2. FV ČLÁNKY NA BÁZI TELURIDU KADEMNATÉHO (CdTe)	40
2.3.10.3. ORGANICKÉ STRUKTURY FV ČLÁNKŮ	41
2.4. ZÁKLADNÍ PARAMETRY FOTOVOLTAICKÝCH (PV) PANELŮ	46
3. VYSVĚTLETE VLIV JEDNOTLIVÝCH PARAMETRŮ NA VA CHARAKTERISTIKU FV ČLÁNKU	50
3.1. VLIVY PARAMETRŮ FV ČLÁNKŮ NA PRŮBĚH VA CHARAKTERISTIKY.....	50
3.2. STRUČNÉ SHRNUŤÍ VLIVU PARAMETRŮ SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ NA PRŮBĚH VA CHARAKTERISTIKY	60
4. NAVRHNĚTE METODU SLEDOVÁNÍ PARAMETRŮ FVE POMOCÍ VA CHARAKTERISTIK....	61
4.1. POPIS FV ELEKTRÁRNÝ VČETNĚ PARAMETRŮ OSAZENÉ FV TECHNOLOGIE	62
4.2. ANALYZÁTOR FV SYSTÉMŮ HT-INSTRUMENTS - I-V 400.....	65
4.3. NÁVRH METODY ANALÝZY FV ELEKTRÁREN POMOCÍ VA CHARAKTERISTIK	67
4.4. DLOUHODOBÉ POVĚTRNOSTNÍ PODMÍNKY MĚŘENÍ.....	69

4.5.	VÝSLEDKY MĚŘENÍ A JEJICH ZHODNOCENÍ	71
4.6.	ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ A NAVRŽENÉ METODY SLEDOVÁNÍ FVE	75
5.	ZÁVĚR	76
6.	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	78
7.	PŘÍLOHY	1

Seznam zkratek

Al	Hliník
AM	Hodnota spektra záření
EVA	Laminovací materiál
Fe	Železo
FV	Fotovoltaický
FVE	Fotovoltaická elektrárna
HIT	Články s vysokou účinností
pBBTDPP₂:PCBM	Speciální polymerní materiál
PFTBT:PCBM	Speciální polymerní materiál
PN	Polovodičový přechod
Si	Křemík
SS	Stejnoseměrný
STC	Standardní testovací podmínky
<i>c</i>	Rychlost světla [m/s]
<i>E</i>	Energie záření [J]
<i>E_{ef}</i>	Účinnost FV článku [%]
<i>E_k</i>	Kinetická energie [J]
<i>f</i>	frekvence [Hz]
<i>FF</i>	Činitel plnění [-]
<i>h</i>	Planckova konstanta [6,626.10 ⁻³⁴]
<i>I_{mp}</i>	Proud při maximálním výkonu [A]
<i>I_{rr}</i>	Ozáření [W/m ²]
<i>I_{sc}</i>	Zkratový proud [A]
<i>M_{pp}</i>	Pracovní bod [-]
<i>NOCT</i>	Normální provozní teplota [°C]
<i>p</i>	Hybnost [kg·m·s ⁻¹]
<i>P_m</i>	Maximální výkon [W]
<i>R_{sh}</i>	Sériový odpor FV článku [Ω]
<i>R_{so}</i>	Paralelní odpor FV článku [Ω]
<i>T</i>	Teplota [°C]
<i>U_b</i>	Brzdné napětí [V]
<i>U_{mp}</i>	Napětí při maximálním výkonu [V]
<i>U_{oc}</i>	Napětí naprázdno [V]
VA	Volt-Ampérová charakteristika
W	Práce [W]
λ	vlnová délka [m]
ω	úhlová rychlost [rad/s]
π	koeficient π [3,14]
Δ	přírůstek [-]

1. ÚVOD

Tématem diplomové práce je shrnutí základních vlastností a parametrů fotovoltaických článků, vliv jednotlivých parametrů fotovoltaických článků na VA charakteristiku FV článku. Dále zde bude navržena metoda sledování parametrů FVE pomocí průběhů konkrétních VA charakteristik a tato metoda bude ověřena na konkrétním fotovoltaickém zařízení, které je bude ideálně již uvedeno do plného provozu. Téma diplomové práce je velmi zajímavé z hlediska bližšího porozumění souvislostí jednotlivých vlastností primárních materiálů z nich vycházejí konkrétní technologie výroby. Čtenář získá pokročilý přehled o vlastnostech, konstrukci a variantách jednotlivých typů fotovoltaických článků a seznámí se s jejich primárními parametry. Jejich význam bude podrobněji vysvětlen na konkrétních grafických příkladech společně s popisem důsledků změn velikostí hodnot těchto parametrů a bude naznačeno ovlivňování jednotlivých parametrů ostatními.

Nejzajímavější částí práce bude bezesporu praktická část zaměřená na návrh sledovací metody, jejíž pomocí budou změřeny a následně analyzovány konkrétní VA charakteristiky funkční FVE. Bude provedena základní analýza naměřených charakteristik včetně podrobného popisu celého měření. Metoda sledování bude vysvětlena a její zaměření bude na sledování stavu fotovoltaického zařízení z dlouhodobějšího hlediska.

Jedná se o zajímavou problematiku, o níž jsou vedeny dlouhé a nekonečné diskuze zda jsou FVE výhodné. Bohužel se věnuje minimum pozornosti sledování poruchovosti či aktuálního stavu po instalaci a spuštění FVE. Myslím, že je velmi důležité zaměřit se právě na sledování aktuálního stavu fotovoltaických systémů, jelikož se jedná o zařízení, které by mělo po celou dobu životnosti poskytovat maximální možný výkon s přihlédnutím k ročním úbytkům výkonu technologií dle výrobce. Věřím, že tato práce poskytne komplexní náhled na problematiku sledování VA charakteristik a prohloubí vědomosti z oblastí již dávno známých a zažitých včetně přínosu návrhu metody sledování VA charakteristik FVE.

2. POPIŠTE ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI A PARAMETRY FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ

2.1. HISTORIE VÝVOJE FV ENERGIE

Historie výroby fotovoltaické energie sahá až do roku 1839, kdy byl objeven fotoelektrický jev. Princip spočívá v uvolňování volných elektronů v důsledku ozáření PN přechodu. Fotoelektrický jev je fyzikální děj, při kterém dochází k uvolňování volných elektronů (excitaci) do volného prostoru mimo samotný substrát (kov, látku) v důsledku absorpce elektromagnetického záření, v našem případě rentgenového záření či viditelného světla. [15]

Vlnění charakterizujeme vlnovou délkou λ a frekvencí f . Pro částice je charakteristická energie E a hybnost p . Oba přístupy, vlnový i částicový, jsou navzájem propojeny vztahy. [7][28]

$$E = hf \quad (2.1)$$

$$p = h \frac{f}{c} = h \frac{1}{\lambda} \quad (2.2)$$

Spojovacím článkem je Planckova konstanta h . Její hodnota je $6,626 \cdot 10^{-34}$ [J.s]. Vztah pro energii vyjádřený pomocí kruhové frekvence má tvar [7][18]:

$$E = \hbar\omega \quad (2.3)$$

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} \quad (2.4)$$

Fotoelektrický jev znamená uvolňování elektronů z povrchu látek do vnějšího prostředí působením elektromagnetického záření. [18]

Rozlišujeme dva typy fotoelektrického jevu:

- A) **Vnitřní fotoelektrický jev** – generují se volné nosiče náboje, které neopustí danou látku a zůstávají po celou dobu průběhu fotoelektrického jevu uvnitř látky [7][18]
- B) **Vnější fotoelektrický jev** – Elektromagnetické záření frekvence f je pohlcováno v kvantech, jejichž energie E je frekvenci přímo úměrná. Fotoelektron může opustit povrch ozářené látky, jen když je pohlcená energie větší než energie potřebná k tomu, aby se dostal z látky ven. Pro tuto energii se ustálil název výstupní práce a označuje se symbolem W . Po opuštění povrchu látky zbývá fotoelektronu kinetická energie E_k , která je rovna rozdílu energie pohlceného kvanta $h \cdot f$ a výstupní práce W . [7][18]

$$E_k = hf - W \quad (2.5)$$

Vložíme-li mezi obě elektrody fotonky napětí U tak, že fotoelektroda bude kladná vůči sběrné elektrodě, budou fotoelektrony na své cestě brzděny. Se vzrůstajícím napětím U se bude proud vnějším obvodem zmenšovat. Při napětí $U = U_b$, které nazýváme napětím brzdícím, proud vnějším obvodem ustane. Práce $e \cdot U_b$, kterou je třeba v brzdícím elektrickém poli vykonat při přechodu mezi oběma elektrodami, dosáhne v tento okamžik hodnoty kinetické energie E_k . [7]

Platí:

$$eU_b = E_k = hf - W \quad (2.6)$$

Pro brzdné napětí:

$$U_b = \frac{h}{e}f - \frac{W}{e} \quad (2.7)$$

Brzdné napětí je lineární funkcí frekvence f dopadajícího záření. [7]

Dále platí:

$$h = e \frac{dU_b}{df} = e \frac{\Delta U_b}{\Delta f} \quad (2.8)$$

Pro energii emitovaného fotonu platí:

$$eU_f = hf \quad (2.9)$$

kde $e \cdot U_f$ je rozdíl zdánlivých Fermiho (kvazi-Fermiho) hladin oblastí P a N. S použitím U_d můžeme vztah přepsat na tvar [7]:

$$eU_d = hf + e(U_d - U_f) \quad (2.10)$$

Hodnotu Planckovy konstanty, kterou vypočteme, však musíme považovat pouze za orientační, dochází totiž k mnoha ztrátám, hlavně při přenosu nosičů v látce. [7]

Prvním objevitelem fotoefektu byl francouzský fyzik, Alexandre Edmond Becquerel, v roce 1839. Bohužel tehdejší metody neměly dostatečnou vyspělost pro bližší zkoumání či výrobu prvního fotovoltaického článku. Ten sestrojil v roce 1883 Charles Fritts. Prvotní článek dosahoval účinnosti pouze okolo 1% a byl sestroyen potažením selenového polovodiče tenkou vrstvičkou zlata. V roce 1946 vznikl první patent na konstrukci solárního článku a již v roce 1954 vznikla současná podoba solárního článku v Bell Laboratories. Zde byla zjištěna vysoká citlivost dopovaného křemíku na intenzitu osvětlení. Tento výzkum dal vzniknout fotovoltaickému článku, který dosahoval účinnosti kolem 6%. [15][17]

Ještě než se dostala technologie solárních článků na zemský povrch, začala se uplatňovat ve vesmírných misích jako zdroj energie družic a jiných zařízení. První vesmírné uplatnění solárních článků se datuje od 17. března roku 1958, kdy byla umělá družice Vanguard I osazena solárními články vytvořenými Bell Laboratories. [15]

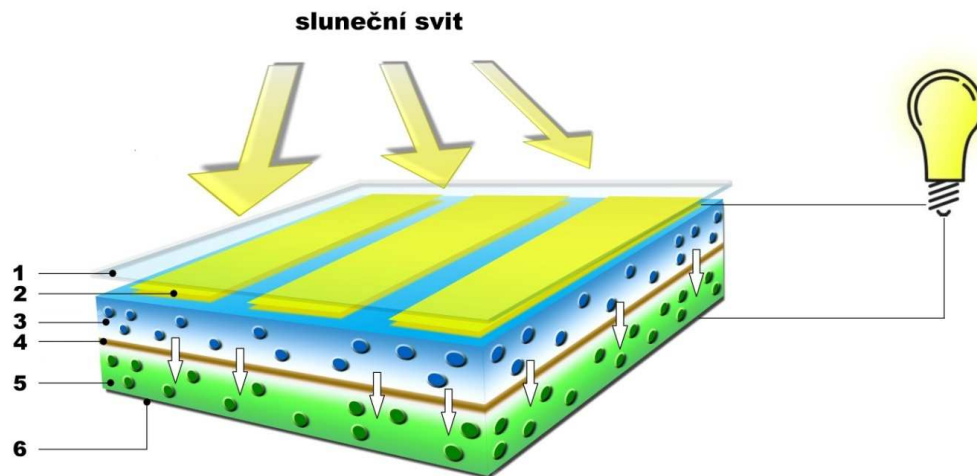
Využití solárních článků jako zdroje energie na zemi nebylo tak rychlé jak by se možná v té době očekávalo. Teprve až v sedmdesátých letech se začala tato technologie uplatňovat v běžném životě mimo technologií užívaných pro vesmírné mise. Využití se týkalo zejména

rovných plošin, které potřebovaly jakýsi primární zdroj energie pro pohon elektrických zařízení při výpadku jiných zdrojů energie, jakými byly např. baterie. Dále se fotovoltaické systémy dostaly do zařízení spotřebního průmyslu a dalších odvětví, jakými byly kalkulačky, parkovací automaty, apod. Technologie zaznamenaly rozvoj v autonomních systémech v odlehklých částech země, jakými byly a jsou dodnes např. horské chaty bez jiné možnosti zásobování elektrickým proudem či další místa tzv. „odříznuta“ od elektrické energie. Pro takováto zařízení je fotovoltaický systém zcela nepostradatelný a jsou zde tato zařízení instalována v tzv. ostrovním režimu. Je zde využívána solární energie, která je dále akumulována. Ostrovním systémem rozumíme případ, kdy není fotovoltaický systém napojen na rozvodnou síť. [15][17]

Připojování fotovoltaických zařízení na rozvodnou síť se začalo realizovat až v 90. letech minulého století. Napojení na síť se začalo realizovat na základě vzniku zákona o obnovitelných zdrojích energie (EEG) a následných dotačních programů. [27][28]

Fotovoltaický průmysl je dnes odvětvím, jež se vyvíjí velice dynamicky a jeho význam stále roste. V důsledku zvyšující se poptávky po obnovitelných zdrojích jsou stále vyvíjeny nové metody zlepšování stávajících technologií. Dochází k masivnímu vývoji nových postupů určených k využití fotovoltaických systémů jako alternativních a ekologických zdrojů dodávajících elektrickou energii do rozvodných sítí. [27]

2.2. FV ČLÁNEK



- 1 - transparentní skleněná folie**
- 2 - elektroda (mřížka)**
- 3 - polovodič typu N**
- 4 - rozhraní P-N**
- 5 - polovodič typu P**
- 6 - elektroda (tenká destička)**

Obr. 1 - Princip jednoduchého FV článku

Schematickou strukturu znázorňuje obr. 1 FV článek je velkoplošná součástka strukturně shodná s polovodičovou diodou, sloužící k přeměně sluneční energie na energii elektrickou. Světlo je přeměněno na jiný typ energie prostřednictvím tzv. fotoelektrického jevu. Ve většině panelů je využíván pouze jeden PN přechod s výjimkou tenkovrstvých technologií, kde se u tzv. tandemových článků jedná až o 3 struktury typu PN. PN přechod je realizován pomocí dvou rozdílně dotovaných křemíkových vrstev. Záporně, fosforem dotovaná strana, směřuje ke slunci. Následuje vrstva dotovaná borem, která je kladná. Z PN přechodu je nutné odebrat elektrický proud. V případě solárních článků se jedná o SS proud. Sběr elektrického proudu je realizován dvěma elektrodami. Zadní elektroda je, mimo výjimek, realizována jako celoplošná. Naproti tomu je přední elektroda (obrácená ke slunci) řešena jako mřížka. Zde není možné realizovat elektrodu celoplošně, jelikož je nutné zachovat co možná největší prostup světla do polovodiče. Je tedy nutné řešit elektrodu strukturně, a sice nejčastěji jako mřížku. Tloušťka takovéto mřížky musí být co nejmenší z výše uvedeného důvodu. Solární článek jako součástka je hojně využívána v ucelených systémech označovaných jako FV panely. Jedná se vždy o určitý počet sériově či paralelně zapojených solárních článků

v jednom FV panelu. Aby bylo možné přenést co nejvíce světla přímo do polovodiče, je jeho přední strana osazena antireflexní vrstvou. Vrstva zajišťuje největší možnou propustnost světla daného článku přímo do polovodiče. S tím je spojen okamžitý výkon, který s vyšší propustností světla roste. Antireflexní vrstva tedy zajišťuje minimální odraz na povrchu solárního článku zpět do okolního prostředí FV článku. Díky tomuto nevnímáme šedou barvu článku, nýbrž vnímáme jiné barvy. Monokrystalické články se jeví jako téměř černé a polykrystalické články jako tmavě modré. Více o jednotlivých systémech solárních článků bude řečeno v příslušné části diplomové práce (kap. 2.3). [15][27][28]

2.3. ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ FV ČLÁNKŮ A JEJICH PARAMETRY

Zde se seznámíme s různými typy solárních článků a jejich základním rozdělením do příslušných kategorií. Zaměříme se na technologii solárních článků na bázi křemíku, který je stále hlavním zdrojem pro výrobu solárních článků. Nekřemíkové technologie budou zmíněny pouze okrajově se svými základními vlastnostmi z důvodu neustálého vývoje a zdokonalování již vyvinutých primárních materiálů, kdy není možné jednoduše sledovat současný trend v oblasti vývoje. V jednotlivých časových obdobích, pohybujících se řádově v jednotkách měsíců, je v popředí výroby jiný primární materiál, na který je zaměřen výzkum. Není tedy možné popisovat všechny tyto materiálové vlastnosti ani materiály jako takové. Vzhledem k rozsahu práce si vystačíme s obecnou znalostí již prakticky zažitých a ověřených vlastností nekřemíkových technologií. [27][28]

Cílem diplomové práce není zhodnocení návratnosti investic jednotlivých technologií či investic provedených trhem do solárních zařízení, nicméně je dobré si uvědomit několik zásadních faktorů, které se odrážejí na životním prostředí jako takovém. Obecně se jedná o výrobu fotovoltaických panelů jako celku.

Křemík jako prvek je v zemské kůře uložen v podobě křemenných solí či oxidu křemičitého. V těchto podobách hovoříme o chemicky stabilní a stálé látce. Větší zrnka křemíku představují tzv. křemenný písek, který slouží jako vstupní materiál pro výrobu chemicky čistého křemíku. Není nutné zde podrobně popisovat jednotlivé metody sloužící k získávání chemicky čistého křemíku, nicméně je dobré znát princip těchto technologií z hlediska vlivu na primární parametry finálního FV článku materiálem. Proto je

u konkrétních typů křemíkových FV článků uveden zevrubný popis procesů vedoucích k získání adekvátní primární suroviny určené k následnému zpracování ve fotovoltaickém průmyslu. Nedílnou součástí výroby polotovarů je také energetická náročnost celého procesu, který musí být započítán do celkových nákladů na výrobu FV článků a musí zde být také počítáno s emisemi, jež byly uvolněny do atmosféry při takovém procesu. Jednotlivé technologie solárních článků jsou popsány níže v příslušných podkategoriích. [16][27]

2.3.1. KLASICKÉ TECHNOLOGIE KRYSTALICKÝCH ČLÁNKŮ

Technologie výroby takzvaných klasických článků spočívá v realizaci na bázi křemíkové destičky tloušťky 100 až 300 μm . Dnes hovoříme spíše o výrobě kolem hodnoty 100 μm . Výroba destiček není nijak jednoduchá a je proto nutné použití vysoce přesných a moderních technologických řezných postupů. Nejprve je nutné zmínit nutnost výroby polotovaru. V našem případě hovoříme o polotovaru v podobě křemíkového ingotu a odlitku, jež představuje monokrystal nebo polykrystal. Polotovar musí splňovat velice přísné požadavky na čistotu křemíku jako takového. Nynější metody dosahují účinnosti až 99%. Hovoříme, o shodné čistotě křemíku tzn. 99% křemík a 1% příměsi zejména typu *Fe*, *Al* a *C*. [27][28]

2.3.2. METODY ZÍSKÁVÁNÍ CHEMICKY ČISTÉHO KŘEMÍKU

Prvotní výroba křemíku je určena pro metalurgické použití. Výroba probíhá redukcí oxidu křemičitého SiO_2 uhlíkem. Celý proces probíhá v obloukové peci o teplotě 2000°C. Katalyzátorem reakce je *Fe*. Redukce uhlíkem probíhá v několika stupních. [16]

Základní redukce popisují rovnice:



Metodou lze získat křemík o chemické čistotě asi 99%. Pro použití ve výrobě polovodičových součástek včetně solárních článků je tato čistota silně nedostačující. Konkrétní výroba čistého

křemíku pro výrobu polovodičů se provádí redukcí halogenidů křemíku hořčíkem, hliníkem nebo zinkem. Dalším stupněm získávání chemicky čistého křemíku je rafinace. Rafinaci křemíku lze provést dvěma způsoby, a sice fyzickou a chemickou cestou. [16][27]

A. Fyzikální cesta - Křemík určený k preciznímu fyzickému čištění je nutné nejprve tvarově upravit do podoby dlouhé tenké tyče. Dále se tento polotovar podrobí dalším procesům. [17][28]

Zonální tavení - křemíkový ingot je postupně natavován po celé své délce ve speciální peci. Je postupně tažen touto pecí. Natavovaná hmota obsahující nečistoty se postupně přesouvá na konec tohoto polotovaru. Nahromaděné nečistoty se poté na jeho konci odříznou. Lze také postupně natavit celý polotovar, který se poté umístí kolmo k zemi. Jelikož mají nečistoty jinou hustotu než křemík samotný, padají pozvolna k zemi, kde jsou po tunutí opět uříznuty. Tento postup se musí několikrát opakovat, než vznikne prakticky čistý křemík. V polovodičovém průmyslu je ještě nutné dotováním křemíku docílit požadovaného typu polovodiče P nebo N. [17][28]

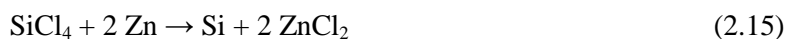
B. Chemický postup - Je hojně využívanou metodou. Jedná se o energeticky méně náročný postup za vzniku více čistého křemíku na jeho výstupu. Čistota křemíku, který byl vyčištěn pomocí chemické metody, disponuje čistotou 99,99999%, což je již plně dostačující hodnota k dalšímu zpracování v polovodičovém průmyslu. Z hlediska chemických reakcí lze toto odvětví rozdělit do tří nejznámějších metod. [20]

a) **Siemensův postup** - V současnosti nejužívanější metoda získávání chemicky, extrémně, čistého křemíku. Siemensova metoda spočívá v první fázi ve výrobě těkavých sloučenin křemíku. Zejména se jedná o výrobu trichlorsilanu HSiCl_3 nebo chloridu křemičitého SiCl_4 . Vzniklé součiny jsou nadále zpracovávány vedením přes chemicky čistý křemík (určitou vrstvu) při teplotě kolem 1100°C . Za působení této teploty dochází k rozkladu těkavých látek. Rozkladem vzniká vysoce chemicky čistý křemík, který se na původní vrstvě usazuje v krystalické podobě. [17]

Reakci popisuje rovnice:

Pomocí tohoto nejvíce využívaného postupu vzniká přímo polykrystalický křemík, který disponuje čistotou až 1 : 1 000 000 000. Pro výrobu polovodičů je tato čistota naprosto dostačující. [17]

- b) **Dupontův postup** - Tato metoda výroby chemicky čistého křemíku se prakticky nevyužívá. Technologie nebyla zcela dokonalá a docházelo při ní k nežádoucím jevům, které vedly k následnému opětovnému znečišťování chemicky čistého křemíku. Jednalo se konkrétně o problémy při rozkladu chloridu křemičitého na vrstvě vysoce čistého zinku. To vše při teplotě kolem 950°C. Vznikající těkavý chlorid zinečnatý byl technologickým problémem. Docházelo k opětovnému znečišťování extrémně čistého křemíku. Díky těmto nedostatkům byl proces nahrazen metodou Siemensovou. [17]

Reakci popisuje rovnice:

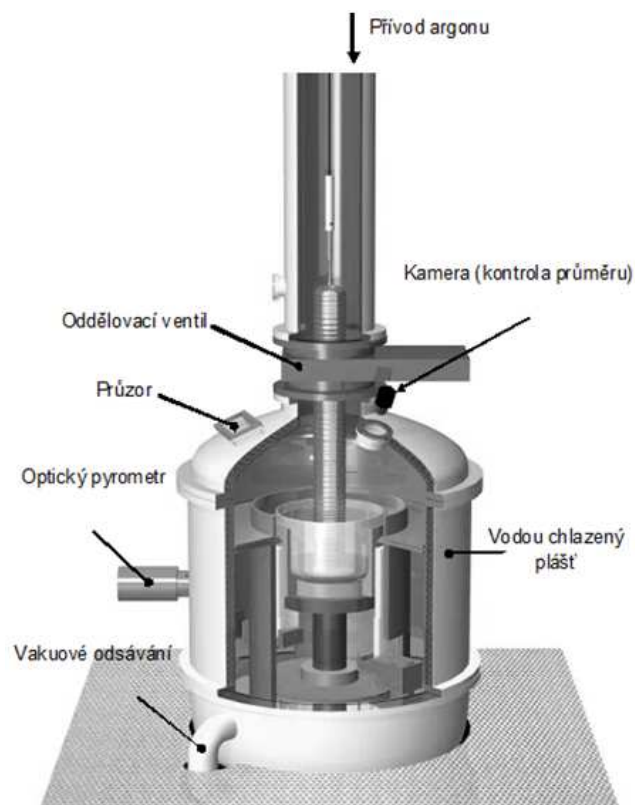
- c) **Destilace trisilanu Si₃H₈** - Třetím zmíněným postupem je rafinace křemíku destilací trisilanu. Destilace trisilanu probíhá obdobně jako klasická učebnicová destilace. Jelikož je trisilan kapalnou látkou, probíhá celý proces na principu oddělování dvou kapalných látek o různých bodech varu. Oddělení je tedy možné pouze za přítomnosti vnějšího působení tepla a ohřívání směsi. Tento postup je užíván zcela ojediněle, především v laboratorních podmínkách vývoje technologií v polovodičovém průmyslu. [28]

2.3.3. VÝROBA MONOKRYSTALICKÉHO KŘEMÍKU

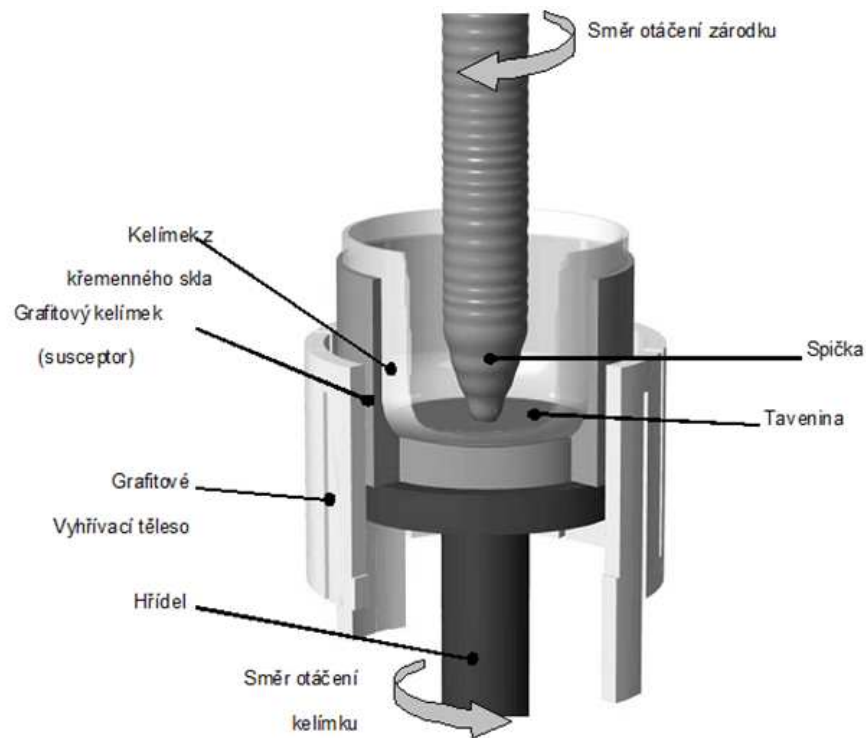
Speciálním případem je výroba monokrystalického křemíku. Vzhledem k produkci fotovoltaických panelů osazených polykrystalickými, monokrystalickými a amorfními solárními články je důležité vnímat výrobu monokrystalického křemíku, který je upřednostňován včetně odvětví výroby polovodičových součástek. [20]

Výroba monokrystalického křemíku se řídí podle tzv. Czochralského procesu. Základem je krystal vysoce čistého křemíku, který je vložen do křemíkové taveniny. Krystal pomocí speciálního řízeného procesu pulsuje a otáčí se. Proces je řízen velice přesnými mechanismy. Současně je také přísně sledována teplota. Reakce je realizována v inertní atmosféře za působení vzácného plynu argonu. Technologie předpokládá proces v nádobách z vysoce chemicky čistého křemene. Zárůdečný krystal zprostředkuje vznik dalších vrstev chemicky čistého křemíku. Produktem reakce je křemíkový ingot dosahující délek až 2m s průměrem až 400mm a je tvořen pouze jediným krystalem. [20]

Zařízení na výrobu monokrystalického křemíku, jinými slovy zařízení pro tažení monokrystalického ingotu křemíku, jsou označována jako tažičky tzv. puller. Obrázky znázorňují princip funkce zařízení s popisky hlavních komponent a názornou ukázkou systému tažení ingotu vysoce chemicky čistého křemíku. [20]



Obr. 2 - Czochralského proces (a) [20]



Obr. 3 - Czochralského proces (b) [20]

2.3.4. VÝROBA POLYKRystalického KŘEMÍKU

Polykrystalický křemík lze oproti monokrystalickému křemíku vyrábět jednodušeji. Metoda se nazývá blokové lití. Jedná se o princip zahřátí surového křemíku na 1500°C, který se postupně ochlazuje až na hodnotu bodu tání v grafitovém kelímku. Pomalým ochlazováním vznikají bloky polykrystalického křemíku o rozměrech 40 x 40cm s výškou 30cm. Bloky se dále řezou na tyče. Dalším řezáním se vyrábí destičky tzv. wafers. Vzhledem k pravoúhlému uspořádání polykrystalických kvádrů je tato metoda efektivnější, což se odpaďů tyče. Nepochází k tvorbě tak velkého množství odpadu řezáním jako v případě monokrystalických ingotů. Metodou blokového lití se tvoří krystaly s rozdílnou orientací. Ve struktuře polykrystalického kvádrů lze jednoduše rozpoznat jednotlivé krystaly díky působení rozdílných odrazů světla na jejich rozhraní. Výrobní kroky následující po procesu výroby destiček jsou analogické se zpracováním destiček monokrystalických. [17][27]

Křemík pro výrobu polykrystalického polotovaru lze získat pomocí tzv. EPITAXE, jež se dále rozděluje na hydridovou a organokovovou (MOVPE). Jedná se konkrétně o podobu plynné fáze tohoto procesu. [17][30]

Plynná fáze epitaxe:

Jedná se o reakci tetrachloridu křemíku ve vodíku při teplotě přibližně 1200 °C. Dochází k výrobě tzv. epitaxního křemíku, který pomalu roste při výše zmíněné reakci. Rychlost růstu tohoto křemíku ovlivňuje jeho strukturu a vlastnosti. Při rychlosti růstu epitaxního křemíku nad 2 μm za minutu, dochází k tvorbě polykrystalického křemíku. Pokud dojde při reakci k nadměrné tvorbě HCl jako vedlejšího produktu, dochází k inverznímu růstu (leptání). V určitých případech lze kyselinu chlorovodíkovou záměrně přidat v rámci cíleného leptání za vzniku nové vrstvy. [30]

Chemický popis reakce:

Tetrachlorid křemíku není jediný vstupní plyn pro úspěšnou funkci epitaxe. Jako vstupní plyn lze užít například silany – silan, dichlorsilan nebo trichlorsilan. Příkladem je následující reakce (rov. 2.18). [30]

Reakce se silanem:

Proces probíhá při podstatně nižší teplotě kolem 650°C oproti 1200°C při reakci pomocí tetrachloridu křemíku. Reakce se silanem nezpůsobuje leptání, což je dalším příznivým jevem procesu. Průběh za nižší teploty s sebou ovšem nese nutnost přísného udržování a sledování teploty. Pokud by nebyla tato podmínka splněna, začalo by docházet k oxidaci produktů reakce. To způsobí následnou kontaminaci epitaxní vrstvy křemíku např. oxidem křemičitým. [30]

2.3.5. MONOKRYSTALICKÉ FV ČLÁNKY

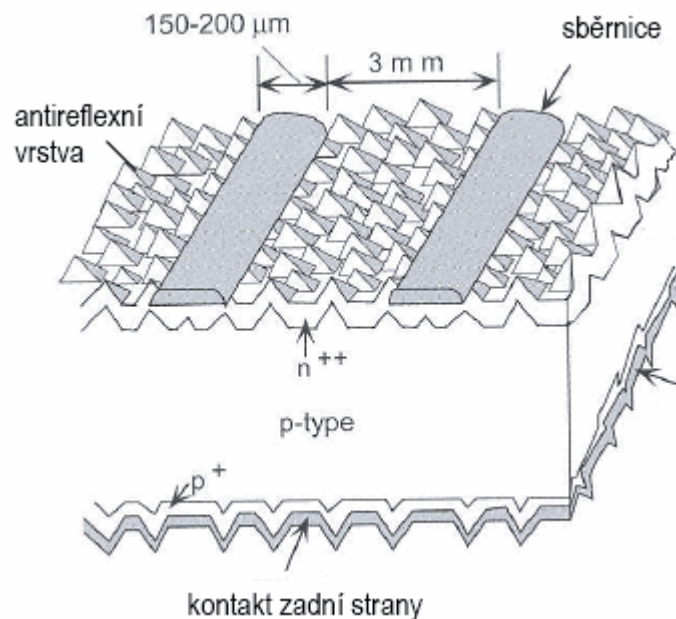
Solární články skládající se pouze z jednoho krystalu křemíku. V rámci použití pro fotovoltaický průmysl je lze nalézt ve čtvercové podobě nebo v podobě čtverce se zaoblenými rohy, který se označuje v zahraniční literatuře jako semisquare. Rozměry článků se udávají v palcích a jedná se o rozměry 4“, 5“, 6“ (10, 12,5 a 15cm). Tyto hodnoty platí pro tvar čtverce či semisquare články. Lze najít monokrystalické články v provedení označovaném jako „poločtvercové“ s délkou hrany 15,2cm. Tyto články lze poznat zejména podle třech vodivých pásků (sběrnice) označovaných „busbar“. Vzhledem k polotovaru, jež je v podobě ingotu kruhového průřezu lze nalézt články polokulaté. Odpadá nutnost přílišného řezání. Tím lze ušetřit spoustu vyrobeného materiálu. Bohužel není tento typ článku s průměrem 6“ (15cm) příliš rozšířen. Důvodem je velká ztráta využívané plochy v solárním panelu, který je hranatého tvaru. Na tuto skutečnost dále navazuje nízká účinnost, nižší výnos apod. Naopak lze tyto panely uplatnit při konstrukcích začleňování solárních panelů do budov. Důvodem je částečná propustnost světla do vnitřku budovy nevyužitými plochami panelu. V neposlední řadě se lze setkat se články šestiúhelníkového provedení, ovšem ani tato koncepce není příliš rozšířená. [25][27][28]

Monokrystalické články se vyznačují velmi vysokou elektrickou kvalitou. Jelikož se jedná o články vyrobené z jednoho krystalu, vnímáme jejich povrch jako tmavě modrý až černý. Účinnosti monokrystalických článků dosahují maximálních hodnot přes 21% a průměrná instalovaná účinnost se celosvětově odhaduje na 15 -17%. V laboratorních podmínkách lze najít články s účinností až 34%. [25][27]



Obr. 4 - Monokrystalický článek

Výroba polotovaru monokrystalu křemíku již byla popsána (2.3.3). Destičky jsou po procesu výroby dotovány příměsí typu P. Pro funkci PN přechodu, je nutné, vytvořit vrstvu typu N. Hovoříme o napařování tenké vrstvy, jež je dotována difúzí fosforu. Nyní již nezbývá než články opatřit kontaktními vrstvami, kontaktního palce a antireflexní vrstvou. Tím je proces výroby článku u konce a lze jej využít např. v zapojení v solárních modulech. Antireflexní vrstva patří mezi důležité části celého článku, neboť zajišťuje minimální odrazivost světla na rozhraní prostředí a článku samotného. Tím je zajištěno maximální využití slunečního svitu k výrobě elektřiny. V rámci vývoje bylo testováno nepřeberné množství antireflexních vrstev. U solárních modulů dále množství antireflexních skel. Výzkumem se zjistilo, že lze zlepšit vlastnosti článků pomocí mikroskopických struktur na povrchu článků. Jedná se zejména o rýhované a pyramidové struktury realizované mechanicky, opticky s použitím laseru nebo chemicky, většinou leptáním. Struktury fungují jako dodatečné pohlcovače a příznivě přispívají k ještě většímu využívání světla potřebného k přeměně energií (Obr. 5). [25][27][28]



Obr. 5 - Struktura současných článků z krystalického křemíku [23][28]

Speciálním odvětvím výroby monokrystalických solárních článků je výroba tzv. HIT článků. Jedná se o speciální články na bázi křemíku s vysokou účinností. Je nutné použít k výrobě těchto speciálních článků extrémně čisté polotovary. Křemík s potřebnými vlastnostmi se nazývá kvazi-monokrystalický s vyšší čistotou. Tyto parametry se docilují procesem zonální tavy (kap. 2.3.2). Výroba je realizována s použitím vysoce čistého

polykrystalického křemíku, do kterého se vloží zárodek monokrystalického křemíku. Hrot se zárodkem monokrystalu je veden skrz vysokofrekvenční elektromagnetickou cívku. Vzniká tak monokrystalická prstencově tavená tyč se stejnými parametry v každé její části. Výrobou extrémně čistého křemíku touto technologií lze docílit zvýšení účinnosti řádově o 2 – 3%. Po dalším zpracování vznikají opět destičky, ovšem tentokrát s vodivostí typu N. S tím je spojeno jednodušší kontaktování zadní strany destiček, čímž dochází opět ke zlepšení vlastností a účinnosti článku. Je zřejmé, že by bylo výhodnější užití HIT článků v každém fotovoltaickém systému, ovšem náklady na zonální tavbu jsou příliš vysoké a bylo by nereálné docílit rozumné návratnosti investic takového systému. [25][27]

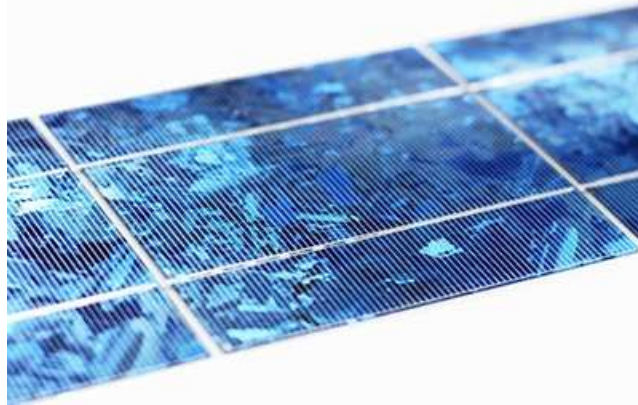
Již v roce 2003 uvedla společnost SANYO na trh články disponující reálnou účinností 16%. Celkově patří tento typ mezi hybridní technologie výroby solárních článků. Užitá monokrystalická destička je po obou stranách opatřena vrstvou amorfního křemíku, čímž lze dosahovat dalšího zvyšování účinnosti až na hodnoty přesahující hranici 20%. Další výhodou článků je možnost využití širšího spektra záření. Systém se dále vyznačuje vyšší energetickou vydatností při vysokých teplotách oproti standardním krystalickým článkům. Při porovnávání článků HIT s články polykrystalickými byl zjištěn vyšší celkový výnos až o 7% při osazení stejného výkonu. [25][27]

Kontaktování zadní strany článků je realizováno tak, že přední sběrné kontakty již nejsou klasicky nanoseny jako mřížka sítotiskem, nýbrž se jedná o „kanálky“ vedoucí k zadní straně článku. Vzhledem k tomu je zde patrné další zvýšení účinnosti. To je možné díky nezastínění ploch solárního článku elektrodami. Kontaktování se provádí pomocí laserových technologií. Cílem je přenést technologii kontaktování zadní strany i do konvenčních systémů klasických krystalických technologií. Kompletně kontaktované články na zadní straně se sériově začali vyrábět v roce 2004, kdy jejich výrobu zavedla společnost SunPower. Články dosahovali účinnosti přes 21%. [25][27]

2.3.6. POLYKRYSALICKÉ FV ČLÁNKY

Výroba polykrystalických článků již byla nastíněna (kap. 2.3.4). Oproti monokrystalickým strukturám se polykrystalické struktury vyznačují odlišným barevným provedením a velikostní řadou. Stejně jako v předchozím případě hovoříme o čtvercovém

provedení o velikostech stran 4“, 5“, 6“ a nově také 8“ (10, 12,5, 15, 15,6 a 21cm). Reálné účinnosti polykrystalických článků se pohybují okolo 13 – 16%. [25][27]



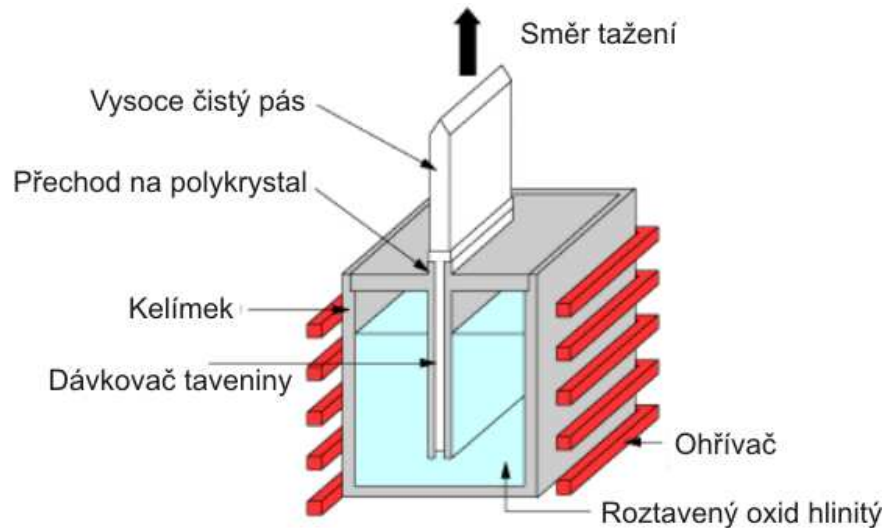
Obr. 6 - Polykrystalická článěk [24]

V posledních letech se do solárního průmyslového odvětví začlenila technologie spočívající v úspoře materiálu pro výrobu solárních článků. Při tradiční výrobě článků přichází asi 50% použitého materiálu nazmar, což prodražuje celkovou výrobu. V rámci technologie je nutné dodržovat určitou tloušťku článků, a sice v rozmezí 100 – 300 μ m. Vzhledem ke snižování nákladů a úspoře materiálu je vyvinuta zmíněná úsporná technologie. Jedná se o metodu tažení pásů. Na principu této technologie je realizováno tažení dlouhých pásů o tloušťce 100 μ m. Vzhledem k tomu, že jsou vyrobené pásy již předem zhotoveny v potřebných dvou rozměrech, řezou se pouze na jednotlivé destičky. Řez je prováděn především pomocí laseru. Takovýmto způsobem lze omezit spotřebu polotovaru polykrystalického křemíku na minimum. [25][27]

A. Metoda EFG (Edge-defined Film-fed Growth)

Mezi vedoucí metody pracující s technologiemi tažení pásů patří zejména systém EFG. Jedná se o sériově používanou průmyslovou technologii, společnosti ASE, která je na trhu od poloviny devadesátých let. Systém realizuje osmihranný segment fungující jako nosič materiálu. Ten se následně ponoří do roztaveného křemíku a je vytahován vzhůru do výšky předem definovanou rychlostí až do výšky 1m. Vzniknou tak osmihranné trubky dlouhé jeden metr, které se dále řezou jak podélně, tak příčně. Vzniknou tak destičky realizující FV články přesného tvaru při zachování velice efektivní výroby. Rozměry destiček jsou přesně dané.

Délka hrany článku činní 12,5cm a tloušťka stěn 280 - 300 μ m. Zajímavým faktorem, který je nesmírně důležitý k efektivnímu využívání materiálu, jsou opět ztráty křemíku při výrobě. Touto technologií lze docílit ztrát materiálu pouze kolem 10%, což představuje určitou revoluci v postupech výroby polykrystalických PV článků. [14][19][27]



Obr. 7 - Princip metody EFG společnosti KYOCERA [14]

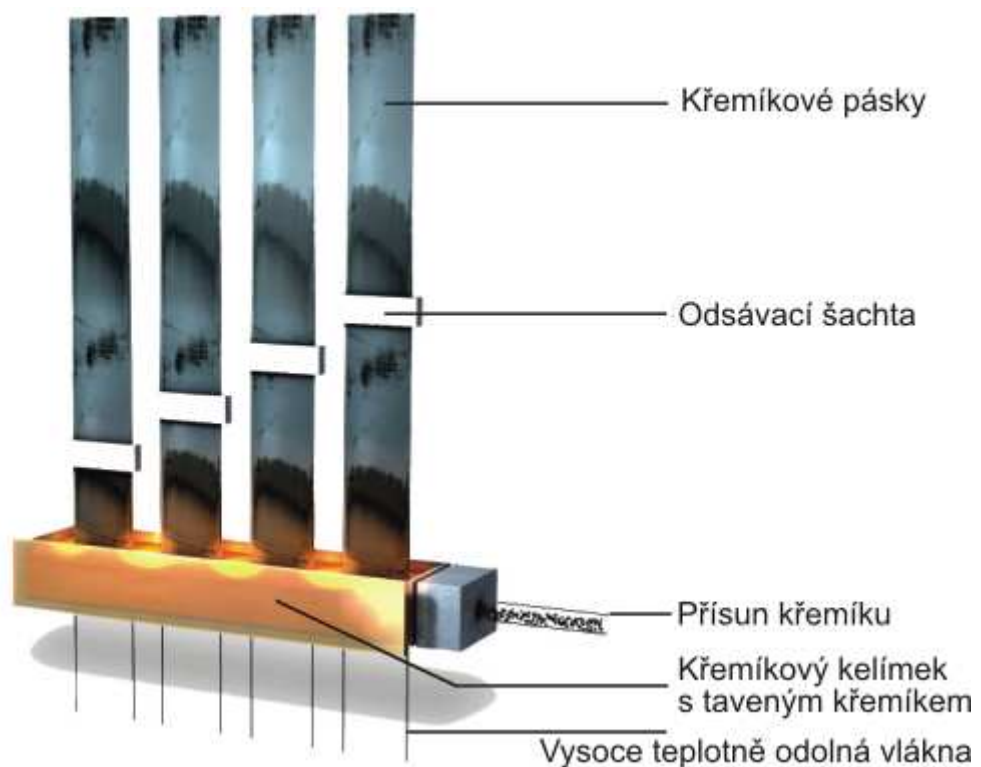
Alternativním provedením EFG technologie jsou články vznikající na základě dvanáctihenné trubky. Články se užívají ve velkých a důležitých solárních systémech a dalších pilotních projektech s délkou hrany 15,6cm (6"). Dalšími alternativními rozměry EFG článků jsou např. 10cm x 10cm x 0,28cm, 10cm x 12,5cm x 0,28cm či 12,5cm x 12,5cm x 0,28cm. Tloušťka je brána jako střední hodnota výrobní technologie. [27]

B. Metoda String-Ribbon

Princip a následná technologie byla vyvinuta ve Spojených Státech Amerických společností Evergreen Solar. Metoda je založena na protahování dvou křemíkových vláken taveninou, kterou představuje opět křemík roztavený na danou teplotu. Protahováním vláken vzdálených 8cm od sebe roste mezi nimi polykrystalický křemíkový pás. Lze tímto způsobem, po příčném nařezání, vyrobit PV články o rozměrech 8cm x 15cm. Zvláštností těchto článků je struktura, která obsahuje pouze málo hranic zrn a podobá se spíše monokrystalické struktuře, nicméně se jedná o strukturu polykrystalickou. Celková struktura je nerovnoměrná, ovšem dostačující jakosti pro reálné sériové použití. Důkazem toho je výroba společnostmi: Evergreen Solar (USA), Sovello (USA) nebo Renewable Energy

Corporation ASA (REC, Norsko). Produkce těchto společností není malá a představuje průměrně roční celkový vyrobený výkon článků až 100MW. [27]

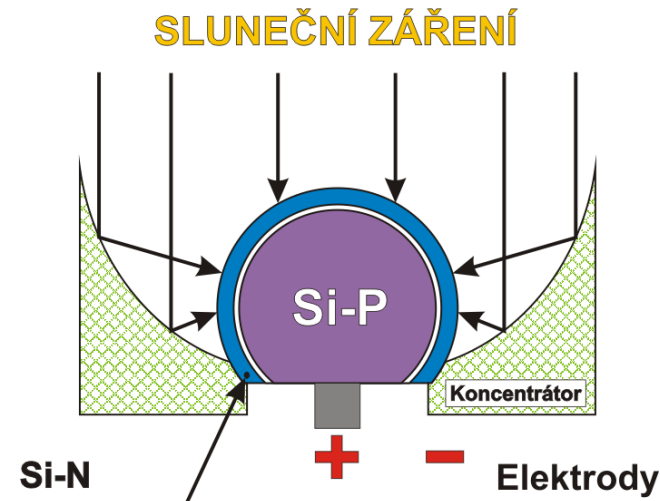
Bylo by jistě možné najít další technologie výroby. Výše zmíněné varianty jsou pro představu plně dostačující a není cílem vyjmenovat všechny výrobní technologie. [27]



Obr. 8 - Metoda String Ribbon [13]

2.3.7. SPECIÁLNÍ FV ČLÁNKY

Mezi zajímavými technologiemi a systémy PV článků lze vyzdvihnout technologicky zajímavou alternativu k systémům konvenčních plochých PV článků. V tomto případě se spíše jedná o popis FV panelu složeného z „miničlánků“. Řez jednotkou, jejichž určitý počet tvoří PV panel je na obr. 8. [28]



Obr. 9 - Schéma uspořádání křemíkové kuličky se sférickým přechodem PN s koncentrátorem záření [28]

V řezu je vidět použitá technologie. Typem se tento systém řadí mezi monokrystalické struktury s ohledem na použitý polotovar. V principu se jedná o využití pospojování monokrystalických kuliček disponujících sférickým přechodem PN. V jednom „miničlánku“ se nachází jedna kulička monokrystalické struktury. Průměr této kuličky činí 0,6mm. Výroba spočívá v odkapávání taveniny, dopované příměsí typu P. Po odkápnutí, padá množství taveniny volným pádem. Je zajištěno, aby tavenina v letu ztuhla. Z fyzikálních principů je zřejmé, že působením síly složené ze všech, které působí na taveninu při pádu, bude tvar taveniny po ztuhnutí ve vzduchu odpovídat téměř ideální kouli. Tak je realizován přesný tvar. Následně se provede tzv. předopování pomocí difúze. Tím je docíleno vodivosti typu N na povrchu kuličky. Vznikl nám sférický přechod PN pod povrchem kuličky. Nosnou část kuliček tvoří hliníková folie. V ní jsou určité počty otvorů v závislosti na požadovaném množství osazení kuliček. Každá díra má stejný průměr, který je menší než průměr kuličky. Tím je zajištěno ukotvení kuliček na správném místě a navíc přesně. Fólie je lisována a jednotlivé díry jsou umístěny v malých důlcích. Tyto důlky jsou funkčním prvkem a představují koncentrátor záření. V řezu je vidět spodní kladná elektroda. Zápornou elektrodu tvoří hliníková folie. Odstranění spodní části kuličky je řešeno pomocí odleptání určité části materiálu. Tím je možné usadit elektrodu do části s vodivostí typu P. celý panel je vyráběn v různých velikostech v provedení flexibilním i pevném. Pevné uspořádání mají na povrchu skleněnou vrstvu stejně jako monokrystalické či polykrystalické panely. U flexibilních se jedná o teflonovou čelní stranu. Flexibilní panely jsou výhodným doplňkem do terénu pro nejrůznější aplikace, jež využívají elektřinu. Mnohdy se v širém okolí jedná o jediný možný

zdroj energie, kde se klade důraz také na skladnost systému. Flexibilní panely se vyrábí v několika řadách tuhosti. Účinnost panelů není nijak závratná, nicméně ji nelze ani označovat za neadekvátní k technologii. Dnes hovoříme o účinnostech až 18%, přičemž reálná účinnost a její průměrná hodnota se pohybují kolem 14%. Komerční prodej a sériová výroba se více rozmohla teprve v letech 2006 – 2008. Neznamena to však, že by tato technologie nebyla dříve známa. Byla představena již v roce 2004 na výstavě v Paříži. Mezi společnostmi vystavující a vyrábějící tyto panely patří např. Spheral Solar Power a Fuji. Společnosti se věnují výrobě jak tuhých, tak flexibilních panelů. [28]

Jednoznačnou předností tohoto systému je obrovská úspora křemíku. Nevýhodou je naopak horší účinnost při šikmém osvětlení, kdy koncentrátor nefunguje 100%. Tím dochází ke ztrátám. Je nutné zajištění přímého sledování slunce. Realizace sledování je možná například za použití sériově vyráběných sledovačů. Tím dochází ke ztrátám. Spekulativní zatím zůstává otázka výroby této technologie. Bližší dokumenty nelze běžně nalézt, tudíž pouze možné dlouze diskutovat o poměru cena, výkon a návratnost. [28]

2.3.8. TECHNOLOGIE TENKÝCH VRSTEV

Podobně jako technologie EFG k výrobě polykrystalických článků za účelem úspory materiálu, vznikla další potřeba úspor křemíku jako suroviny. Problém byl v první polovině devadesátých let s technologiemi, jež by vedly k větší úspoře. Až druhá polovina let devadesátých dala vzniknout technologiím tzv. tenkých vrstev. Již v této době se hojně spekovalo o roce, ve kterém tenké vrstvy nahradí klasické FV články na krystalických bázích. Důraz kladený na nízkou výrobní cenu a minimalizaci spotřeby křemíku jako suroviny bylo možné v rámci možností naplnit. Ve srovnání s technologiemi krystalickými je úspora materiálu a výrobní cena diametrálně odlišná. I přes to se revoluce v osazování článků nekonala a nekoná ani dnes. Myslí se tím případ, kdy by tenké vrstvy zcela nahradily klasické typy FV článků. [27]

Z druhého pohledu na technologie výroby tenkých vrstev jde jejich vývoj kupředu. Zejména díky společnostem v rámci přechodu a specializace na tenkovrstvé technologie a automatizovanou výrobu se na trhu již v letech 2007 – 2008 objevili první PV panely na

tenkovrstvé bázi se zvýšenou účinností vzhledem k do té doby známým technologiím. Bližší informace o nejpoužívanějších technologiích budou uvedeny v dalším textu. [27]

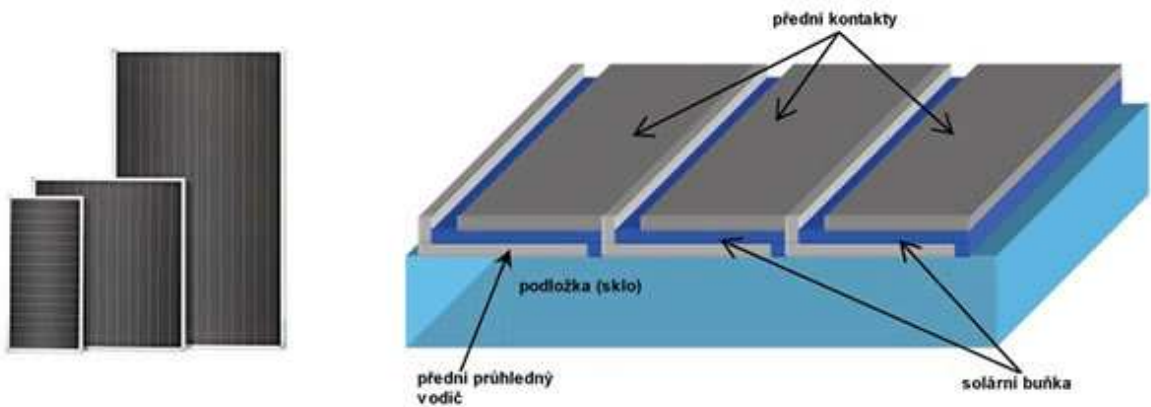
Z technologického hlediska jako obecné skutečnosti, představují tenké vrstvy jistý potenciál pro masové rozšíření do desítek či stovek aplikací nejrůznějšího typu. V posledních letech se stále více výrobci předhánějí v začleňování tenkých vrstev do architektury budov protihlukových stěn a dalších nejrůznějších aplikací. Nejzajímavější využití tenkých vrstev bude uvedeno společně s technologiemi později. Fyzikální výzva pro zkvalitňování technologií není rozhodujícím kritériem pro vývoj tenkých vrstev. Potenciál je především v jejich vlastnostech, kterými disponují. Mezi nejdůležitější patří mimo jiné minimální spotřeba materiálu, nízká výrobní cena, nízká citlivost na teplotu a zastínění, lepší využití slunečního spektra, možnost použití umělého světla, flexibilita, monolitnost, homogenní vzhled, geometrická volnost apod. Dnes tvoří tenkovrstvé panely a technologie cca 14% celkové produkce. Oproti roku 2008 je zde vidět nepatrný nárůst směrem nahoru, avšak trend ukazuje stále více rostoucí produkci. Nabízí se otázka budoucího využití a použitých materiálu. Křemík je v zemské kůře zastoupen hojně, avšak z hlediska účinnosti již není možné dále více zdokonalovat standardní technologie. Možnost zvyšování účinnosti přinášejí nekřemíkové články, jimž je věnována samostatná kategorie (kap. 2.3.10). Zde se jedná o články na bázi jiných polovodičových materiálů. Vývoj směřuje stále více k užití křemíkových sloučenin a křemíku jako takového. Jak je vidět dle nejrůznějších pramenů, v rámci začleňování tenkých vrstev do architektonického světa lze předpokládat, že směr a využívání spojené s cenou tenkých vrstev a solární energie jako takové budou v dalších desetiletích určovat právě tyto technologie, jejichž variabilita spolu nese úsporu volných ploch v přírodních lokalitách a aglomeracích při zachování příjemného vzhledu budov a míst, kde jsou a budou osazovány. [1][27][28]

Konkurenceschopnost vůči velkým fotovoltaickým zařízením (řádově nad 50kW) je již dokázána, ovšem za cenu nižší účinnosti. Jinak řečeno nižší účinnost i přes nízké výrobní náklady vede k následným omezením, nevýhodám a výdajům spojených s instalací. Jedná se o podklady projekčního charakteru, jejichž rozsah je větší. Větší zastavěná plocha se stejným energetickým výkonem s sebou nese následně vyšší náklady za pozemek, na němž se velký systém nachází. S tenkými vrstvami je také spojená složitější instalace zařízení, tudíž zde z ekonomického hlediska dochází opět k nárůstu celkových nákladů. Začleňování do

architektury zde bylo již několikrát jmenováno. V rámci nenápadnosti, flexibility, homogenosti a dalších vlastností lze díky technologiím výroby, docílit vzhledově přijatelného uzpůsobení konkrétní aplikaci. [27]

2.3.9. TECHNOLOGIE VÝROBY TENKÝCH VRSTEV

Výrobní postupy a technologie tenkých vrstev lze rozdělit do čtyř hlavních kategorií dle použitého materiálu FV článků. Obecně je známa výroba v podobě nanášení velmi tenkých vrstev – řádově 1 – 6 μ m – na levný nosný materiál jakým je většinou sklo, nejrůznější druhy kovových folií nebo umělé hmoty. Procedura nanášení je ekonomicky přijatelná. Nezanedbatelným parametrem výroby je nižší teplota při nanášení jednotlivých článků na nosnou desku. Teplota se pohybuje řádově mezi 200 – 500°C oproti teplotám při zpracovávání polotovarů na klasická provedení krystalických PV článků. Tyto teploty dosahují až 1500°C, což vede k více jak trojnásobně vyšší spotřebě energie. Kontaktování tenkých vrstev se provádí již při nanášení samotném, kdy je elektroda přední vrstvy tvořena průhlednou vysoce vodivou vrstvou tvořenou materiály typu TCO (Transparent Conductive Oxide). Mezi tyto materiály se mimo jiné používají zejména oxid cínčitý, oxid indium-cínčitý nebo oxid zinečnatý. TCO materiály jsou výrobně nejdražší částí. Z hlediska nákladů hrají rozhodující roli v ceně výsledného FV panelu. Jednoduchost technologie spočívá ve strukturálním nanášení jednotlivých vrstev. Výsledkem je jediný výrobní proces spojený s kontaktováním, čímž vzniká jeden dlouhý PV článek tloušťky kolem 1cm. Vzniká článek na nosné konstrukci, který se dále opatřuje ochrannou vrstvou EVA (etylvinylacetát), která se zahřeje nad teplotu tání a zalije kompletně celou plochu. Dále uzavře a ochrání celý panel před mechanickými i povětrnostními vlivy. Jednoduchost výroby je vykoupena nízkou účinností panelů, ovšem existují již tenké vrstvy výkonově srovnatelné s krystalickými strukturami. Je-li k dispozici dostatečná plocha a další finančně výhodné práce spojené s instalací, dosahují tenké vrstvy výborných výsledků a jejich ekonomická návratnost je velmi zajímavá. [27]



Obr. 10 - Princip tenkých vrstev [1]

2.3.9.1. Amorfnní křemíkové články (a-Si)

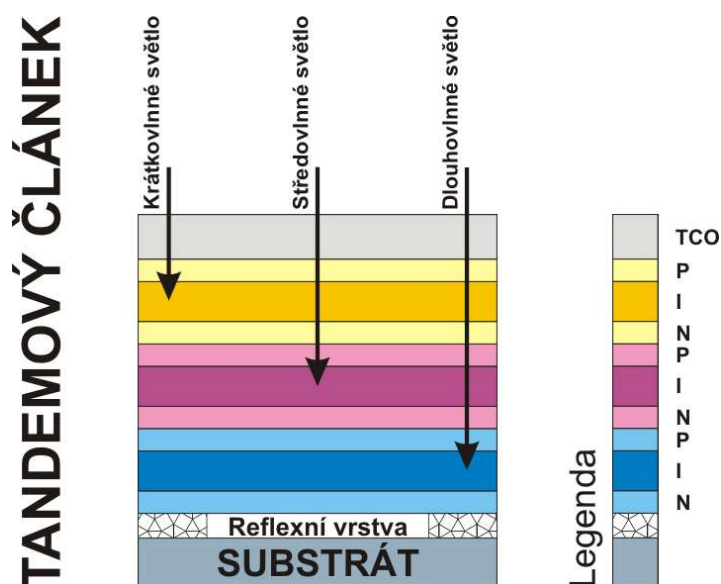
Křemík v amorfnní podobě je již znám od 80. let minulého století. Konkrétně lze jeho využití v prvních funkčních článcích situovat do roku 1974. Později se rychle začala technologie rozšiřovat po světě. Dlouho na sebe nedalo čekat průmyslové odvětví, kde se začala technologie uplatňovat. Amorfnní články je možné najít v milionech zařízeních. Příkladem jsou např. kapesní kalkulačky, hodinky, kapesní svítelnky a další zařízeních, kde je možné využít malého prostoru a výkonu článku. V rámci prvotního vývoje převažoval názor, že nelze vyrobit dlouhodobě stabilní článek s dostatečným výkonem. Také se spekulovalo o procesu stárnutí a s tím spojené degradace článků s následným úbytkem výkonu. Nakonec se, z dlouhodobého hlediska, tyto obavy nepotvrdily ani praxí ani měřeními. Nežádoucí projevy zde nejsou nacházeny ve větší míře, než je tomu u ostatních technologií. [27]

K typu struktury tvořící amorfnní články je vázána nepravidelná krystalická struktura jako u jiných systémů. Výroba článku probíhá technologií odlučováním z plynného silanu při velice nízkých teplotách. Konkrétně zde hovoříme o teplotě 200°C. Dle polovodičové struktury se jedná o strukturu PIN diody. Funkce je založena na vložení intrinsické vrstvy mezi PN přechod. Důvodem je krátká difúzní vzdálenost dotovaného křemíku. Volné nosiče náboje zde rychle rekombinují (volný elektron se sváže s nejbližším atomem, kterému chybí právě jeden volný elektron). Vložení intrinsické vrstvy (nedotovaná vrstva) mezi PN přechod lze životnost volných nosičů náboje prodloužit. V této vrstvě se realizuje absorpce světla s následným vytvářením náboje. Vrstvy na okrajích P a N oddělují náboje a vytvářejí elektrické pole. [1][27]

Důležitou informací je také účinnost článků, která je malá v porovnání s klasickými systémy. Bylo řečeno, že se ve velké míře neuplatňuje degradace článků. Degradace probíhá u každé technologie, zde se jedná především o dobu prvního roku provozu. Výkon amorfních článků je rozdělen do dvou kategorií. Jedná se o maximální a jmenovitý výkon. Maximální hodnota je zpravidla o 15% vyšší, než je výkon jmenovitý. Jmenovitá hodnota výkonu je konečná maximální hodnota výkonu jednotlivých článků po prvotní degradaci. [27]

2.3.9.2. Tandemové tenkovrstvé FV články

Speciálním odvětvím ve výrobě tenkovrstvých technologií je vícevrstvé uspořádání jinak označováno jako tandemové uspořádání. Zejména hovoříme o dvou až třívrstevných článcích. Vzhledem k více vrstvám o různých charakteristikách a parametrech dochází ke zvýšení účinnosti. To je zajištěno rozdílnou absorpcí světla jednotlivých vrstev amorfních článků. Příkladem takového tandemového článku je výrobek společnosti Uni-Solar (USA), která vyvinula článek s rozměry 30cm x 30cm a jmenovitou účinností 10,2%. Princip článku je uveden na obr. 11 – třívrstvý FV článek. Každá z vrstev je uzpůsobena k pohlcování jiné vlnové délky slunečního spektra. Vyšší účinnost článku předurčuje schopnost absorpce každé vrstvy. [6][27]

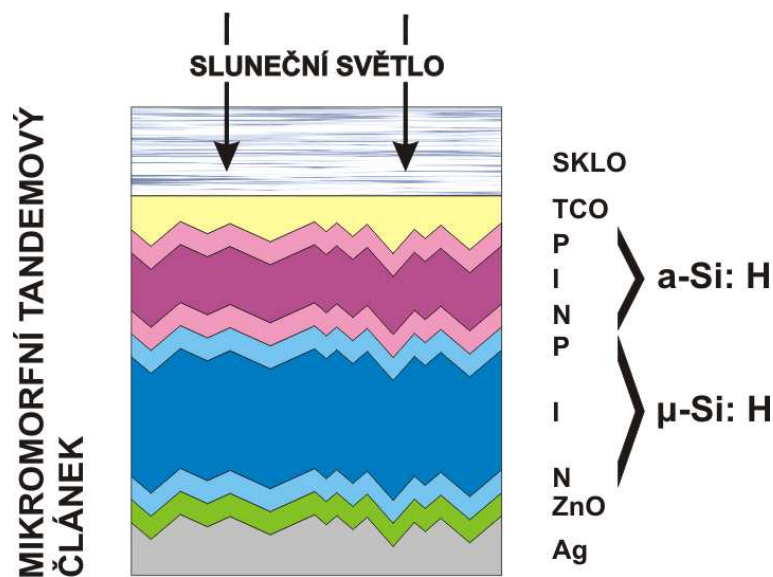


Obr. 11 - Struktura amorfního tandemového článku [27]

Nanášením na kovovou desku bez vrstvy EVA a krycího skla bylo dosaženo ohebnosti panelu, který lze umístit na téměř jakoukoli plochu. Systém společnosti UniSolar je nadále zvláštní také typem zapojení celého panelu. V klasických případech se jedná o tenké proužky probíhající celým panelem, kdežto panely Uni-Solar jsou složeny z velkoplošných článků o standardní ploše velikosti 34cm x 12cm. V každém článku je zapojeno několik pásů článků. Jednotlivé velkoplošné články jsou dále spojeny do panelu přes obtokové diody zajišťující toleranci vlivů zastínění panelů. Tímto pospojováním lze dosáhnout velikostí až 6 m². Při osazování střech se uplatňuje také vliv na statiku objektu. Technologie jsou velice lehké, tudíž nemají velký vliv na zatížení střechy objektu či jiné nosné konstrukce. [6][27]

2.3.9.3. Mikromorfnní solární FV články (u-Si a A-Si)

Vývoj klasických amorfnních článků dal vzniknout článkům mikromorfnním. Jedná se o spojení amorfnních článků a mikrokrystalických struktur v tandemovém provedení. Provedení lze demonstrovat pomocí obr. 11. [27]



Obr. 12 - Struktura mikromorfnního tandemového článku

Základní, jednoduché, uspořádání článku se vyrábí pomocí podobného postupu jako v případě klasických amorfnních článků. Jedná se opět o nanášení vrstev pomocí silanu. Při teplotě 200°C se vytvoří plasma určitých parametrů, která zabezpečí nanášení vrstvy na skleněný substrát o tloušťce 0,3μm. Při změně parametrů plasmy, zejména teploty, tlaku a mikrovlnné frekvence se začne tvořit na odvrácené straně skleněného substrátu tenká

krystalická struktura. Jedná se o mikrokrystalickou vrstvu s tloušťkou 0,25 μ m. Změnou parametrů plasmu dochází k přeměně amorfni struktury křemíku na mikrokrystalickou strukturu. Cílem je nepřeměnit všechny amorfni křemík, ale docílit přeměny pouze části této struktury. To vede k vytvoření pyramidového uspořádání struktur, jež disponují lepšími elektrickými i optickými vlastnostmi. Kladně tak přispívají ke zvyšování účinnosti jednoduchých článků ve srovnání s klasickou amorfni technologií hladkých struktur. [1][27]

Mikrokrystalická struktura se vyznačuje vlastnostmi tandemových článků vzhledem ke dvěma odlišným vrstvám amorfniho a mikrokrystalického křemíku. Díky této struktuře dosahují články reálné účinnosti 11%. Mezi vylepšené vlastnosti lze řadit podstatně nižší počáteční degradaci článků. Články s účinností 9% jsou na trhu již od roku 2004. Výrobu zahájila společnost Kaneka (Japonsko). [27]

Rozvoj a zkvalitňování technologie vedl, k vývoji třívrstvého článku tandemového uspořádání. Princip znázorňuje Obr. 12. Jedná se o oddělení dvou mikromorfni vrstev. Uvedení na trh bylo opět společností Kaneka a to v roce 2009. Pozadu není ani společnost Sharp – gigant ve výrobě PV panelů. Ta vyrábí od roku 2008 mikromorfni články s účinností 9% a od roku 2010 se zabývá vývojem a výrobou tříčlánkových modulů s výrobní kapacitou až jeden gigawatt. Samozřejmě se nelze zabývat vývojem pouze dvou společnostmi. Zmíněné společnosti jsou největšími vývojovými centry na světě, proto jsou zde vyzdviženy. Rozvoj byl zapříčiněn především díky výrobcům zařízení určených k výrobě vrstev – mimo jiné lze uvést společnosti Applied Materials, Ulvac či Oerlikon. Ve výrobě je nadále velký potenciál pro zlepšování článků zejména v oblasti proudového přizpůsobení jednotlivých vrstev a optických vlastností TCO vrstvy včetně optických vlastností zadního kontaktu článků. Díky tomu lze v budoucnu docílit dalšího zvýšení účinnosti v řádech procent. [27]

2.3.9.4. Zvláštnosti tenkovrstvých technologií vs. krystalické FV články

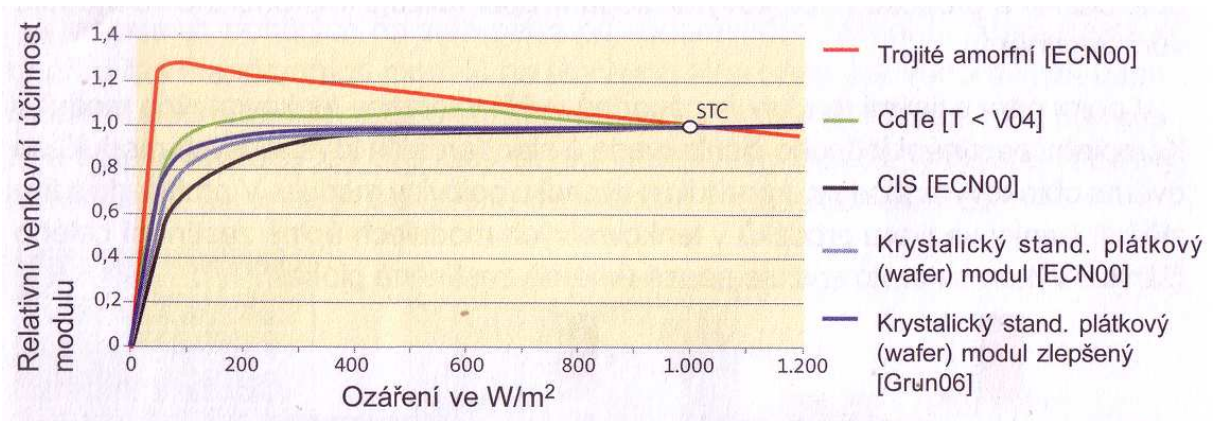
Technologie tenkých vrstev a křemíkových technologií se neliší pouze účinností a optickým vzhledem. Jak vyplývá z dosavadního textu, liší se reakcí na zastínění, optickými a geometrickými vlastnostmi, apod. Nižší účinnost a s tím spojená vyšší nutná plocha pro dosažený stejného výkonu jako u krystalických metod je kompenzována geometrickou přizpůsobitelností, kdy je možné využít i plochy, které by nebylo možné osadit krystalickými strukturami. Krystalické struktury lze spojovat za sebou. Tím je umožněno zapojování těchto

technologií do série či paralelně. To znamená, že velikost napětí je dána zapojením jednotlivých článků. [15][27]

Větší tolerance tenkých vrstev na vliv zastínění oproti krystalickým strukturám dále zvyšuje možnosti jejich instalací. Například zastínění jednoho článku vede u klasické technologie se dvěma obtokovými diodami k situaci, kdy dojde k výpadku celé poloviny modulu. Jde o nemalý problém s instalací panelů, jelikož je nutné přesně znát pohyb slunce a následného stínu během celého dne a roku. U tenkovrstvých článků tvaru proužků zastínění způsobí pouze úměrný úbytek výkonu.

Srovnáním např. teplotních parametrů dostaneme další z argumentů pro využití tenkých vrstev. Zatímco krystalické moduly jsou náchylné na vysoké teploty, které zapříčiní ztrátu výkonu za nejvyšších teplot, u tenkých vrstev není výkon závislý na teplotě článku s výjimkou určitých technologií. S tím je spojena možnost dokonce vyšších výnosů tenkých vrstev oproti krystalickým strukturám. Dále lze porovnávat vlivy osvětlení, kdy krystalické články potřebují silnou intenzitu osvětlení a nejsou příliš účinné při zamračené obloze. Naproti tomu nabízejí tenkovrstvé technologie možnost tandemového uspořádání s použitím materiálově rozdílných vrstev. Ty absorbují jen určité vlnění. Je tak pokryto větší pole slunečního spektra spojené s vyšší účinností oproti krystalickým článkům. Lze dosáhnout dokonce vyšší účinnosti než při standardních laboratorních podmínkách (zpravidla až o 30%). [28]

Je tedy jasné, že již situace předurčuje zaměření se na tenké technologie. Samozřejmě je nutné stále vyrábět a stavět elektrárny na principu klasických krystalických materiálů už jen z hlediska zastavěné plochy a mechanické odolnosti, nicméně i tato kritéria je již možné splnit s užitím tenkých vrstev. Je vždy nutné vytvořit správný projekt s ohledem na všechny možné situace a vybrat tak nejvhodnější metodu pro instalaci. Na Obr. 13 jsou patrné účinnosti jednotlivých technologií včetně nekřemíkových (kap. 2.3.10). [27]



Obr. 13 - Srovnání relativní účinnosti vybraných technologií [27]

2.3.10. TECHNOLOGIE NEKŘEMÍKOVÉ

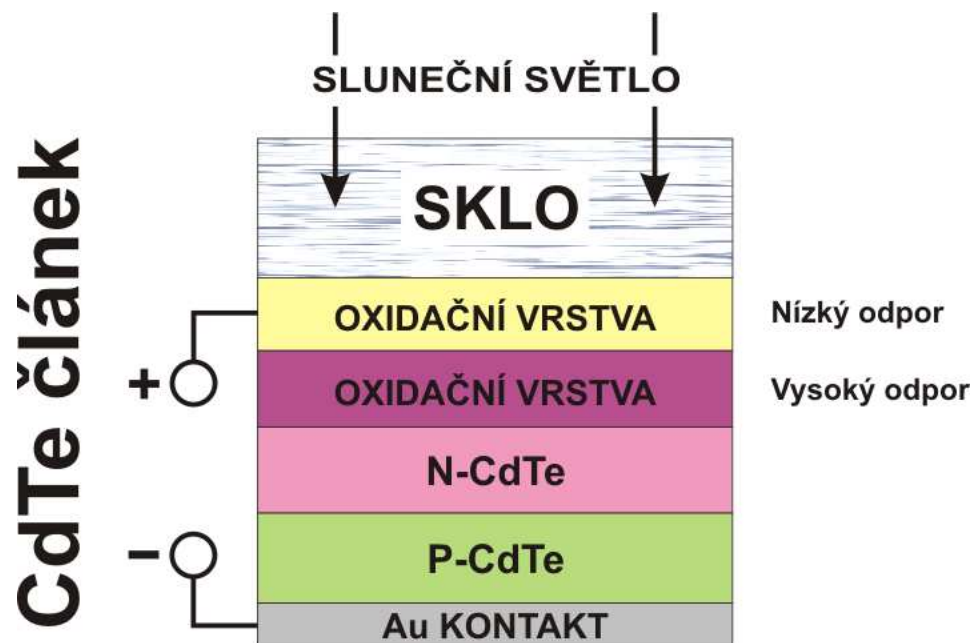
2.3.10.1. CSI FV články (Copper-Indium-diSelenid, dvojselenid mědi-india)

Články typu CIS jsou z hlediska účinnosti těmi nejlepšími. Technologie je přitom prakticky jednoduchá. Výroba probíhá za vyšší teploty (500°C). Ve vakuové komoře se na nosný skleněný materiál nanese jednodolitá absorpční vrstva CIS. Vrstvu CIS charakterizuje vodivost typu P. Druhá vrstva, tvořená sulfidem kadmia vyrovnává chyby v krystalické mřížce P vrstvy a představuje vrstvu s vodivostí N. FV články na bázi CIS nepodléhají degradaci světlem. Bohužel s sebou technologie nese také negativa. Mezi hlavní nevýhody patří nestabilita systému při vysokých teplotách a špatně snášení vlhkosti. Opatřením proti těmto vlivům může být instalace do méně slunných prostor a prostředí ve spojení s kvalitním zapouzdřením proti vlhkosti. [27]

Články představují veliký potenciál pro další vývoj. Vzhledem k velké účinnosti (11%) se jedná o technologii, na níž přechází spousta společností zabývajících se výrobou a distribucí FV článků. Barva článků je šedá až černá a lze je mimo sklo také vyrábět na základě kovových desek za účelem ohebnosti. V takovém případě se jedná o zalévání pomocí technologie EVA podobně jako u monokrystalických a polykrystalických struktur. Alternativou jsou články na bázi sulfidu mědi-india.[27]

2.3.10.2. FV Články na bázi teluridu kadmnatého (CdTe)

Cenová dostupnost a jednoduchost výroby jsou hlavními argumenty pro osazování článků na bázi CdTe. Články se vyznačují tmavě zelenou barvou přecházející až do černé. Disponují vyšší účinností než je tomu u čistě amorfních článků. Výroba je realizována vakuovou metodou nanášení vrstev při teplotě 700°C. Osvědčené moduly osazované od roku 2003 vyrábí dodnes společnost First Solar (USA) s mírnými úpravami. Od tohoto roku jsou tyto panely hojně osazovány v nejrůznějších typech zařízení po celém světě, zejména pro jejich cenovou dostupnost. FV panely First Solar CdTe osazených dvojitým sklem a bezrámovým řešením představují vynikající kombinaci pro osazování panelů v nejrůznějších aplikacích. Zejména jsou tyto technologie vhodné pro umístění a použití ve velkých projektech FV elektráren. Použití předurčuje možnost zapojení panelů do maximálního systémového zapojení až na hodnotu 1000V. Dalším argumentem je reálná účinnost 11%. V současnosti vyrábí tyto panely dle dostupných zdrojů pouze čtyři společnosti na základě vydaného patentu společnosti First Solar. CdTe článek a příslušný panel lze vidět na obr. 14 a obr. 15. [2][27]



Obr. 14 - Struktura CdTe článku [2][27]



Obr. 15 - Flexibilní CdTe solární panel (Technologie Thin Film) – PrimeStar Solar [3]

2.3.10.3. Organické struktury FV článků

Novinkou v oblasti využití solární energie je technologie zakládající se na biologických přírodních postupech. V rámci dynamického rozvoje nových technologií zaměřených na genetiku, klonování a nanotechnologie vznikl v odvětví využití sluneční energie nový trend. Nová technologie využití sluneční energie představuje revoluci v přeměně světla na elektrickou energii. Hlavní úlohu zprostředkovává speciální geneticky vyvinutá bílkovina zajišťující přeměnu pomocí umělé fotosyntézy energii světla na energii elektrickou. Vynikajícím parametrem v porovnání s klasickými metodami je výrobní cena v přepočtu na 1m^2 . Právě taková plocha vyjde u organické technologie na 1 dolar, kdežto křemíkové technologie v této ploše znamenají finanční zátěž v průměru okolo 200 dolarů. V rámci nanotechnologií spojených s genetickým inženýrstvím by mělo dojít k výraznému posunu v této oblasti z hlediska účinnosti systému, která by měla dosahovat až reálných 25%, což nyní umožňují pouze klasické panely na bázi křemíkových struktur určených pro vesmírný výzkum a osazování vesmírných zařízení, kde slouží jako hlavní zdroj energie určený k zajištění provozu elektrických komponent. Reálná účinnost panelů pro užití ve vesmírných projektech dosahuje nyní až 34% na bázi křemíkových struktur např. společnosti Kyocera. [19][31]

Vrátíme-li se zpět k hlubšímu poznání technologie organických fotovoltaických článků, je nutné se zaměřit právě na zmíněnou bílkovinu označovanou jako PSI (Protein Structure Initiative). Výzkum vývoje proteinových technologií na bázi tvorby geneticky modifikovaných bílkovin započal v roce 2000. Cílem vývoje je uplatnění organických materiálu v běžném životě. Konkrétně jako podpůrný prostředek v rámci plnění stále přísnějších kritérií s vztahených na ohled k životnímu prostředí. Celý projekt byl původně financován Národním institutem obecných lékařských věd ve Spojených státech (NIGMS). Nezanedbatelný je také vývoj z hlediska poznání a urychlování rozkládání biologických struktur obecně za pomoci jiných organických technologií. Vývoj technologie byl rozdělen do tří částí. [32][33]

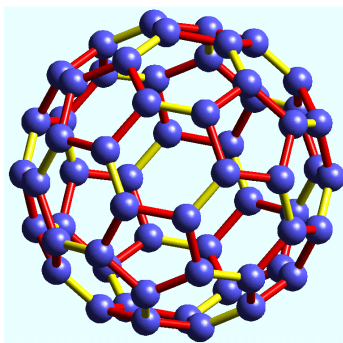
Fáze 1 – probíhala v letech 2000 – 2005. Jednalo se zde o určení konkrétních cílů. Možnost provést demonstraci proveditelnosti vysoce výkonné organické struktury byl jen začátek. Následuje myšlenka řešení jedinečné proteinové struktury s následnou přípravou výrobní fáze prozatím teoretických předpokladů. [33]

Fáze 2 - jde o uvedení výrobních fází do chodu. Prakticky se zde jedná o implementaci navržených výrobních technologií a homologaci modelových struktur včetně řešení problémů na biologické bázi z hlediska membránových vlastností proteinových buněk jako stavebních jednotek výkonného organického materiálu, který má být výsledkem celého výzkumu. [33]

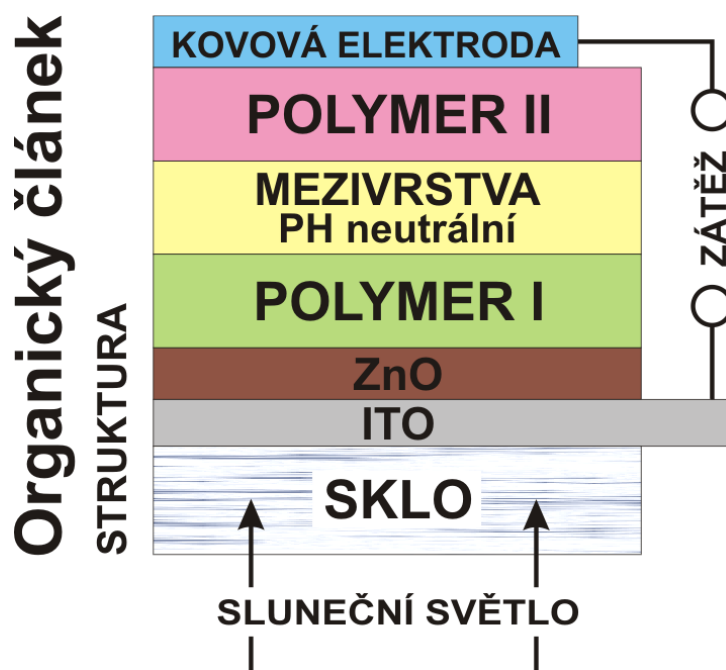
Fáze 3 – jedná se o čistě biologickou fázi, kdy je výsledný produkt implementován do nejrůznějších technologií v odvětví zdravotnickém i průmyslovém. Jedná se o fázi započatou v roce 2010 a již nyní jsou známy konkrétní technologie, které jsou ve stádiu výzkumu či v praxi využívány a schváleny. [33]

V diplomové práci se zabýváme využitím solární energie se zaměřením na nejrůznější parametry FV článků. Z hlediska účinnosti současných organických struktur na bázi proteinů dosahují výrobci hodnot kolem 8%. V roce 2005 se dle dostupných pramenů hovořilo o reálné účinnosti 3%, jež byla také prakticky ověřena. Je vidět nemalý vývoj užití organických sloučenin. V současné výrobě se uplatnil systém tandemového uspořádání. Podobně jako je tomu u tenkých vrstev. Příkladem takového článku jsou například tandemová uspořádání

postavená na bázi fullerenu. Fullereny jsou molekuly, tvořené atomy uhlíku uspořádaných do vrstvy z pěti- a šestiúhelníků s atomy ve vrcholech, která je prostorově svinuta do uzavřeného tvaru (nejčastěji do tvaru koule nebo elipsoidu). Vzhledem k této struktuře jsou mimořádně odolné vůči vnějším fyzikálním vlivům. V dutině molekuly fullerenu může být uzavřený jiný atom, několik atomů či malá molekula. Konkrétní představu o používaných organických molekulách znázorňuje obr. 16. [32]

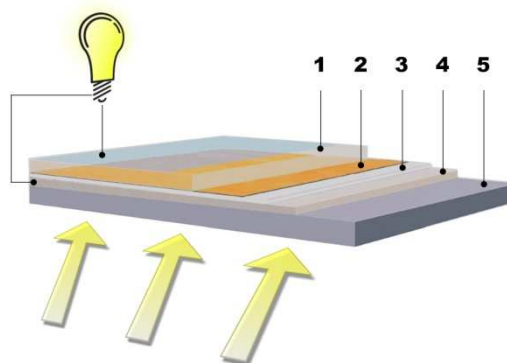


Obr. 16 - Struktura jedné molekuly Fullerenu [4]



Obr. 17 - Obecná struktura základního organického článku [5]

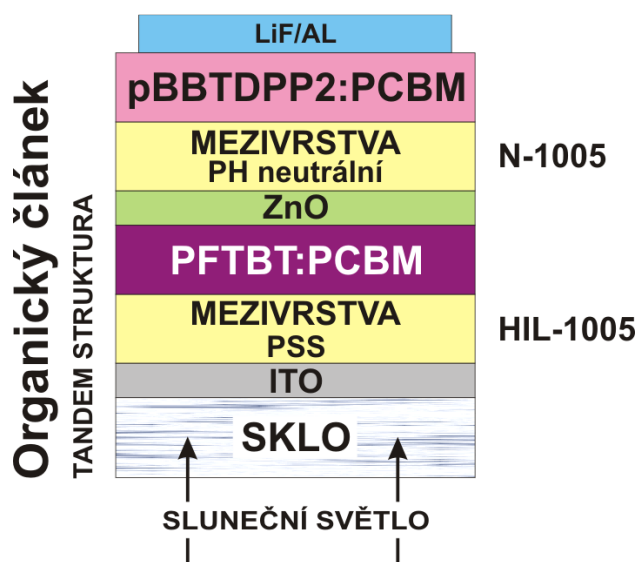
Obr. 17, 18 znázorňují příklad obecného uspořádání organických solárních článků. Jedná se o spojení dvou rozdílných organických polymerů ve struktuře. Z hlediska vývoje organických solárních článků hovoříme o jedné buňce, jelikož v praxi vyvíjené moduly disponují několika vrstvami uspořádanými do tandemových struktur solárních článků.



- 1 - katoda
- 2 - polymerová vrstva
- 3 - vodivá mřížka
- 4 - anoda
- 5 - poddajná vrstva

Obr. 18 - Struktura organického FV článku

Každá solární buňka dále plní funkci reakce na určitou vlnovou délku světelného spektra za účelem maximálních možných zisků a účinností organických solárních článků. Konkrétní příklad tandemového organického článku se dvěma organickými buňkami je na obr. 19. [6]



Obr. 19 - Tandemový organický článek obsahující dva rozdílné organické solární články [6]

Oba články jsou odděleny oxidem titanu TiO_x . Tato folie zajišťuje hned několik funkcí. Drží pohromadě celou strukturu. Zprostředkovává navázání obou sloučenin proteinů rozdílných chemických vlastností. Brání tím průchodu děr a slouží jako transportní vrstva

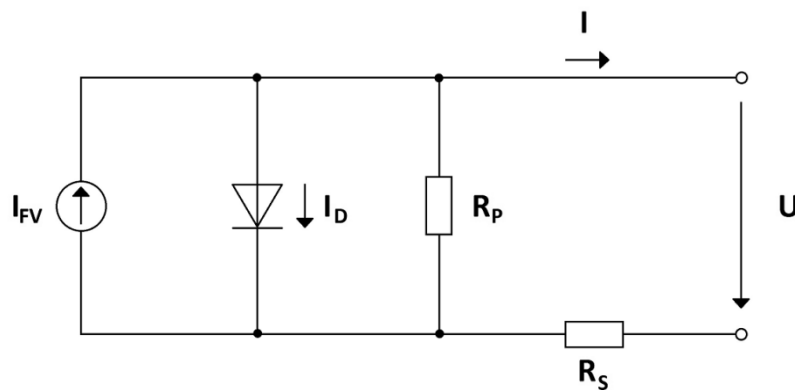
elektronů. Vrstva je opticky polopropustná, což umožňuje prostupu světla též do druhé nižší vrstvy. Vrstva je důmyslně navržena. Z hlediska optického je navržena tak, aby zprostředkovala každé vrstvě optimální množství fotonů určité potřebné vlnové délky. Každý z dané dvojice článků je tedy citlivý na jinou část spektra slunečního záření. Chemické složky tvořící základní stavební prvky článků nejsou předmětem této práce a vystačíme si zde pouze s jejich zkratkami. V seznamu zkratk jsou tyto názvy sloučenin uvedeny v plném znění. Jedná se o chemické sloučeniny pBBTDPP2:PCBM a PFTBT:PCBM. Samotné chemické sloučeniny nepřeměňují přímo energie. Elektrická energie je tvořena v oblasti heteropřechodů tvořených sloučeninami pBBTDPP2:PCBM pro infračervenou a ultrafialovou oblast vlnových délek. Ve viditelné části spektra je aktivní sloučenina PFTBT:PCBM [6][33].

Z pohledu uspořádání tandemových článků jsou dodržována jistá pravidla. Například horní vrstva bývá realizována materiálem s větší šířkou zakázaného pásu. Následkem toho je absorpce fotonů kratších vlnových délek právě touto vrstvou a propustnost větších vlnových délek do spodních vrstev s menší šířkou zakázaného pásu. Uspořádání již existuje nepřehledné množství, nám postačí informace o situaci, kdy je mezi vrstvami umístěn nosný materiál, který mimo jiné tvoří jednu z aktivních částí článku. Tandemový systém připomíná sendvičové uspořádání, které je možné vrstvit na sebe. Tím je zajištěno využití širokého spektra slunečního záření. S tím je dále spojeno zvýšení účinnosti organických solárních článků.

Technologie organických článků s sebou nese také vynikající mechanické výhody, které je předurčují k využití všech možných odvětví. Zejména se testují v odvětví automobilového průmyslu pro použití v automobilech, kde působí jako zdroj energie určitých méně energeticky náročných zařízení. Je také možné pevné a odolné provedení pro použití ve velkých solárních systémech. Lze říci, že potenciál využití organických sloučenin není limitován prakticky ničím. Je jen otázkou času, kdy budou organické materiály plně konkurovat současným technologiím. Nelze zanedbat také časovou stálost a životnost, která již dnes vyhovuje standardním a zažitým parametrům konvenčních systémů na bázi krystalických technologií a tenkých vrstev. [33][34]

2.4. ZÁKLADNÍ PARAMETRY FV ČLÁNKŮ

Základními parametry rozumíme údaje, které lze sledovat a reálně naměřit u většiny druhů a typů solárních článků. Dále je uveden přehled základních parametrů, jejichž hodnoty z hlediska provozu určují efektivitu využití sluneční energie daného fotovoltaického systému. Popis jednotlivých parametrů je rozdělen na dvě části, z nichž je první zaměřena na stručný popis konkrétního parametru (kap. 2.4). Následující část je zaměřena na praktické vlivy daných parametrů na VA charakteristiku solárních článků. Vysvětlení a názorný příklad vlivu parametrů na VA charakteristiku FV článku je uvedeno v následující kapitole (kap. 3). Veškeré parametry lze pozorovat jak u zařízení s malým, tak velkým výkonem.



Obr. 20 - Náhradní schéma jednoduchého solárního článku [25][26]

A. Zkratový proud – I_{sc} [A]

Přestavuje v souvislosti s fotovoltaickými články maximální možnou hodnotu proudu procházející kolektorem. Hovoříme zde o krátkodobém průchodu takového proudu. V případě dlouhodobého působení maximální hodnoty proudu článkem dochází k degradaci těchto článků a následné ničující destrukci článků. Hodnota maximálního zkratového proudu je uvedena v datasheetech jednotlivých typů fotovoltaických panelů v závislosti na STC. [10][12][26]

B. Napětí naprázdno - U_{oc} [V]

Parametr, který určuje maximální možné napětí solárního článku. Hodnota představuje stav naprázdno. Rozumíme stav, kdy jsou výstupní svorky solárního článku rozpojeny.

V souvislosti s tímto není článek nijak zatížen. Interpretovaná hodnota je uváděna ve vztahu k STC. Změřené napětí představuje maximální možnou hodnotu napětí článku. Hodnota je vždy větší než U_{mp} solárního článku. [10][12][26]

C. Proud, při kterém solární článek dodává maximální výkon – I_{mp} [A]

Logicky vzato lze říci, že bude maximální výkon dodáván v závislosti na maximálním možném proudu nejčastěji označovaným I_{sc} . Realitou je ovšem hodnota nižší než je hodnota proudu I_{sc} . Stejně jako hodnota maximálního (zkratového) proudu je hodnota I_{mp} obsahem datasheetu konkrétního solárního článku výrobcem. Pomocí proudu I_{mp} je matematicky počítán maximální výkon solárního článku označovaný nejčastěji P_m . [10][12][26]

D. Napětí, při kterém solární článek dodává maximální výkon – U_{mp} [V]

Analogicky jako v případě I_{mp} je i napětí U_{mp} nižší v porovnání s maximálním napětím solárního článku naprázdno. Jedná se o údaj datasheetu sloužící, stejně jako I_{mp} , k matematickému výpočtu P_m . Hodnota U_{mp} představuje jeden z hlavních parametrů solárního článku pro reálnou představu o výkonu FV článku jako v případě I_{mp} . [10][12][26]

E. Maximální výkon, který může článek dodávat – P_m [W]

Matematickým výpočtem lze určit tento parametr pomocí dvou výše zmíněných hodnot - U_{mp} a I_{mp} . Není nutné tuto hodnotu počítat, neboť je opět součástí informací datasheetu. V případě sériové výroby je uvedena v datasheetu také maximální přípustná tolerance maximálního výkonu vztažená na konkrétní intenzitu osvětlení. Nejčastěji pro laboratorní podmínky, kde je hodnota osvětlení pevně nastavena na $1000\text{W}/\text{m}^2$ (STC). [10][12][26]

F. Činitel plnění (Fill Factor) – FF [-]

$$FF = \frac{(I_{mp} \cdot U_{mp})}{(U_{oc} \cdot I_{sc})} [-] \quad (2.19)$$

Jedná se o výpočtovou hodnotu (rov. 2.19), jejímž porovnáním z naměřených výsledků lze zjistit, v jaké kondici se solární článek nachází. Fill Factor je bezrozměrné číslo. V případě

porovnávání vypočtených výsledků je třeba mít na zřeteli nepřesnosti, jež mohou vzniknout při měření dílčích parametrů. V konečném důsledku může být tento údaj na základě jediného chybného dílčího parametru nepřesný a je tudíž jeho charakter, mimo údaje výrobce (musí být článek řádně testován), pouze informativní. Teoretická maximální hodnota FF je 1 (100%), tudíž lze z výpočtu či konkrétní VA charakteristiky celkem rychle získat představu o vlastnostech solárního článku, kvalitě výroby spojené s kvalitou použitých materiálů apod. FF představuje tzv. elektrickou účinnost FV článku. [10][12][26]

G. Účinnost fotovoltaického článku - E_{ef} [%]

$$E_{ef} = \frac{(I_{mp} \cdot U_{mp})}{(P_{in})} [\%] \quad (2.20)$$

Výpočet je jednoduchý (rov. 2.20), ovšem za předpokladu znalosti hodnoty P_{in} . P_{in} představuje celkový příkon dodávaný solárnímu článku. Dodávaným příkonem je myšlen výkon dopadajícího záření na solární článek. Účinnost je nejvíce vypovídajícím faktorem o provozním stavu fotovoltaického systému obecně. Stejně jako v případě FF je velmi nutné důsledně kontrolovat naměřené, či odečtené údaje z VA charakteristiky solárního článku při STC.

H. Sériový odpor solárního článku - R_{so} [Ω]

Parametr charakterizuje reálný odpor použitého materiálu solárního článku a osazených proudových sběrnic solárního článku. Hodnota sériového odporu je důležitá z hlediska vlivu na VA charakteristiku a na hodnotu účinnosti FV článku. Parametr negativně ovlivňuje velikost výstupního proudu a ovlivňuje sklon VA charakteristiky. [10][12][26]

I. Paralelní odpor solárního článku - R_{sh} [Ω]

Hodnota paralelního odporu je mnohdy označována v literatuře jako svodová vodivost. Jedná se opět o parametr související s tvarem výsledné VA charakteristiky. Svodová vodivost vyjadřuje vazbu mezi materiálem solárního článku s jinou částí konstrukce celého článku či panelu za STC. Standardními provozními podmínkami je myšlen provoz bez jakékoli poruchy daného systému. Ovlivnění VA charakteristiky je znázorněno v další kapitole včetně bližšího

popisu vlivu na VA charakteristiku. Mezi faktory ovlivňující R_{sh} je nutné zmínit např. vlhkost, která zapříčiní zvýšení svodové vodivosti v praxi solárním článkem a konstrukcí FV panelu osazeného takovým solárním článkem. [10][12][26]

J. Teplota – T [°C]

Parametr nebývá uveden v dokumentaci k FV článku, nicméně hraje důležitou roli v přeměně sluneční energie na energii elektrickou. Ovlivnění teplotou solárního článku je negativním parametrem. Při návrhu solárního článku a jeho následné výrobě je nutné zajistění co možná nejmenší reakce systému na změnu teploty. Účinnost systému klesá se zvyšující se teplotou. Dochází k posunu pracovního bodu a ovlivnění ostatních parametrů FV článku, z nichž dále vychází celková účinnost článku dle výpočtu (rov. 2.20). [19][28][29]

V souvislosti s teplotou je výrobcem uveden teplotní parametr, který určuje nominální operační teplotu fotoelektrického článku označovaný v literatuře zkratkou NOCT (Nominal Operating Control Temperature). Cílem parametru NOCT je určení nejlepších provozních podmínek pro osazení konkrétního modulu, zejména v extrémních atmosferických podmínkách je tento parametr nezanedbatelný. [19][28][29]

K. Intenzita osvětlení – I_{rr} [W/m²]

Ovlivnění energetické přeměny je dáno především reakcí materiálu na intenzitu osvětlení dopadající na povrch solárního článku, z něhož je vyroben. V neposlední řadě také na spektru záření. Každý materiál reaguje na sluneční svit a jeho spektrum jiným způsobem, z čehož vyplývá další použití solárních článků v konkrétních aplikacích. Intenzita osvětlení ovlivňuje celkový okamžitý výkon fotovoltaického systému jako zdroje energie. Vše se děje pomocí metody přímé úměrnosti, kdy se snižující se intenzitou klesá celková účinnost článku a naopak. Ovlivnění VA charakteristiky a bližší popis této problematiky je obsažen v následující kapitole (kap. 3). [19][28]

Úkolem kapitoly není hlubší zkoumání parametrů, nýbrž obecné seznámení se s měřitelnými základními parametry a získání představy o souvislosti výše zmíněných parametrů. K hlubšímu pochopení významu jednotlivých parametrů slouží navazující

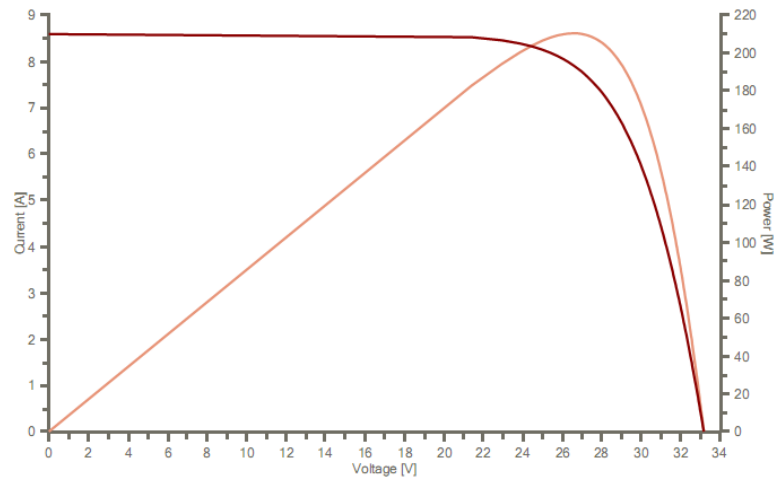
kapitola, kde jsou dále rozebrány také vlivy jednotlivých parametrů na VA charakteristiku fotovoltaických zařízení (kap. 3).

3. VYSVĚTLETE VLIV JEDNOTLIVÝCH PARAMETRŮ NA VA CHARAKTERISTIKU FV ČLÁNKU

3.1. VLIVY PARAMETRŮ FV ČLÁNKŮ NA PRŮBĚH VA CHARAKTERISTIKY

Kapitola prakticky demonstruje vliv základních parametrů fotovoltaických zařízení na průběh VA charakteristiky reálných systémů. Z praktického hlediska se jedná o velmi důležitou část, která ukazuje teoretické účinky výše zmíněných parametrů solárních článků na elektrickou VA charakteristiku solárních článků velmi názorně. VA Charakteristika vypovídá o kondici daného fotovoltaického zařízení. Nejedná se zde o možnost přesné analýzy kondice solárního systému. Studium průběhu VA charakteristiky slouží k bližšímu určení možných chyb spojených s výrobou a provozem fotovoltaického systému. Dle popisu v předchozí kapitole je charakter VA charakteristiky ovlivňován konkrétními parametry (kap. 2). Úkolem je bližší popis a ukázka konkrétních příkladů ovlivnění průběhu VA charakteristiky. Rozbor účinků je strukturně analogický s předchozí kapitolou z důvodu přehlednosti (kap. 2.4).

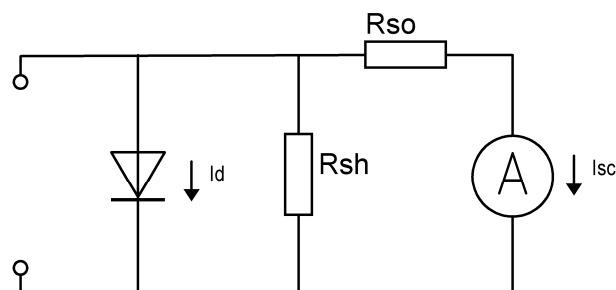
Pro bližší představu o VA charakteristice zde uvádím příklad průběhu z konkrétního měření analyzátozem FVE, které bylo provedeno na základě navržené měřicí metody FV systémů (obr. 21). Měření a konkrétní měřicí metoda bude uvedena v poslední části této diplomové práce (kap. 4).

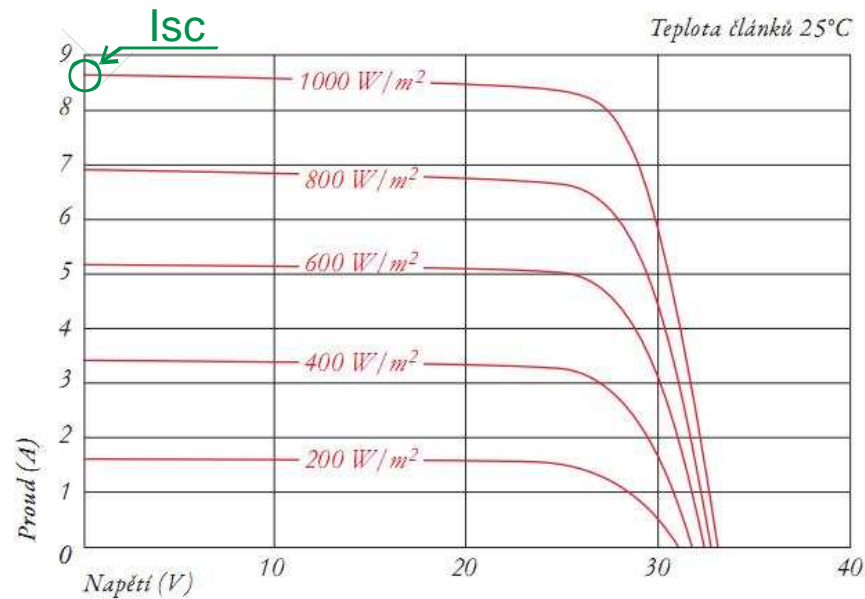


Obr. 21 - VA charakteristika

A. Zkratový proud – I_{sc} [A]

Představuje nejvyšší možnou hodnotu proudu, jež může článek krátkodobě dodávat. Představuje jeden z výchozích bodů na proudové ose VA charakteristiky. Na Obr. 23 je I_{sc} označen zeleným kruhem. Ovlivnění VA charakteristiky jako průběhu je minimální. Udává „pouze“ maximální úroveň hodnoty proudu, od které se charakteristika odvíjí. Vliv na maximální hodnotu I_{sc} je dán teplotou článku a bude popsán níže společně s reakcí na R_{sh} . Katalogová hodnota je při měřících podmínkách STC. Hodnota proudu I_{sc} je závislá na celkové teplotě solárního článku, přičemž se, se zvyšující teplotou hodnota I_{sc} snižuje. S tímto ovlivněním dochází k poklesu M_{pp} , což v důsledku znamená snížení celkové účinnosti systému vzhledem k rostoucí teplotě solárního článku. Zjednodušené schéma zapojení pro měření I_{sc} solárním článkem popisuje obr. 22. [10][12][19]

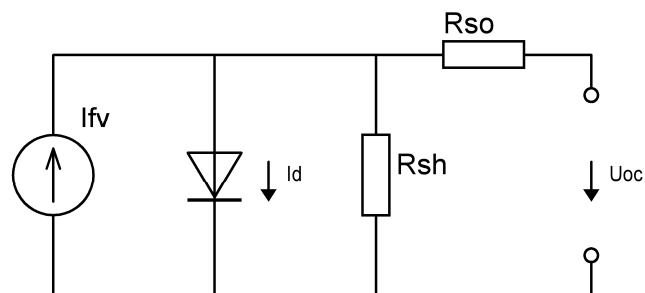
Obr. 22 - Zjednodušené zapojení měření I_{sc} [25][26]

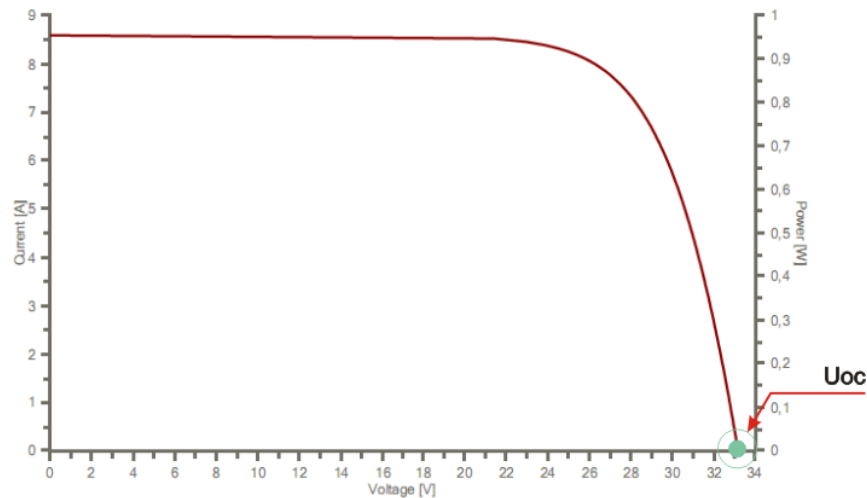


Obr. 23 - VA charakteristika dle STC panelu Kyocera KD210-2PU [19]

B. Napětí naprázdno - U_{oc} [V]

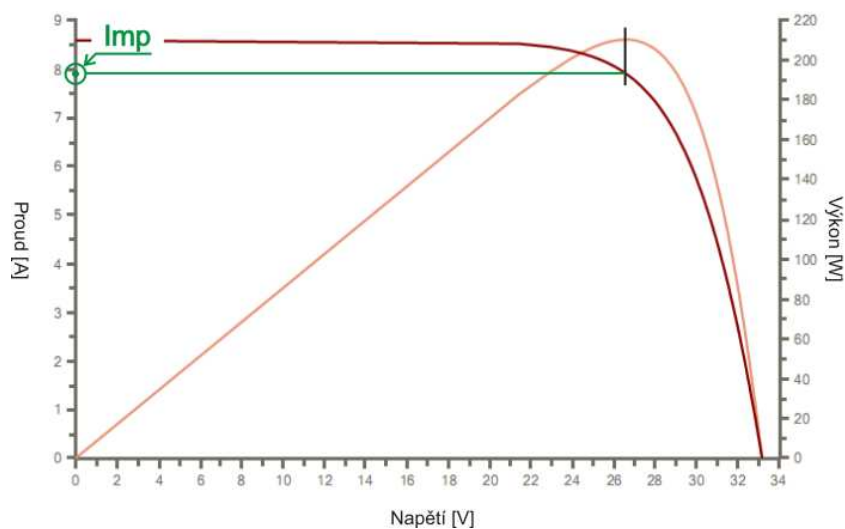
Napětí naprázdno určuje maximální velikost, jež je solární článek schopen dodávat při nulové zátěži. Maximální hodnota napětí je druhým výchozím bodem VA charakteristiky. Kromě konkrétní úrovně dále neovlivňuje VA charakteristiku. Ovlivnění maximální hodnoty U_{oc} je dáno aktuální teplotou solárního článku, jak bude vysvětleno později a velikostí R_{so} . Měření napětí naprázdno je realizováno pro rozpojení výstupních svorek solárního článku při průchodu nulového elektrického proudu I a tudíž bez připojené zátěže Z . Obr. 25 označuje maximální hodnotu napětí, která je výchozím napěťovým bodem VA charakteristiky a je označena zeleným kruhem. Zjednodušené schéma zapojení s vyznačením rozpojených svorek a napětím naprázdno je na obr. 24. [10][12][19]

Obr. 24 - Zjednodušené schéma zapojení pro měření U_{oc} [25][26]

Obr. 25 - U_{oc} - VA charakteristika [10][26]

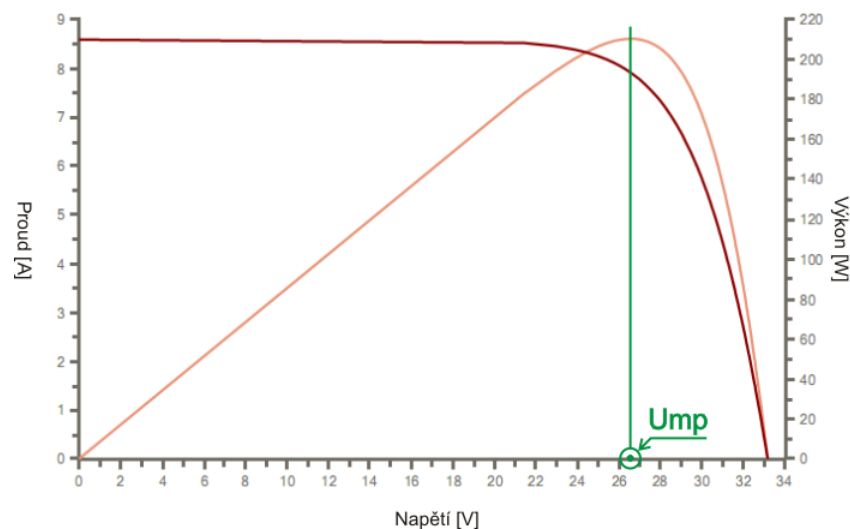
C. Proud, při kterém solární článek dodává maximální výkon – I_{mp} [A]

Hovoříme o hodnotě proudu, který odpovídá průsečíku pracovního bodu solárního článku. Jedná se o hodnotu maximálního výkonu, která se skládá z příslušného proudu I_{mp} a napětí U_{mp} . Parametr nemá vliv na průběh VA charakteristiky, pouze udává hodnotu při maximálním výkonu solárního článku. Naopak v důsledku změn hodnot ostatních parametrů svoji hodnotu zvyšuje či snižuje. Na obr. 26 je I_{mp} znázorněn zeleným kruhem společně se zelenou osou procházející pracovním bodem M_{pp} FV článku. [10][12][26]

Obr. 26 - I_{mp} v bodě M_{pp} [26]

D. Napětí, při kterém solární článek dodává maximální výkon – U_{mp} [V]

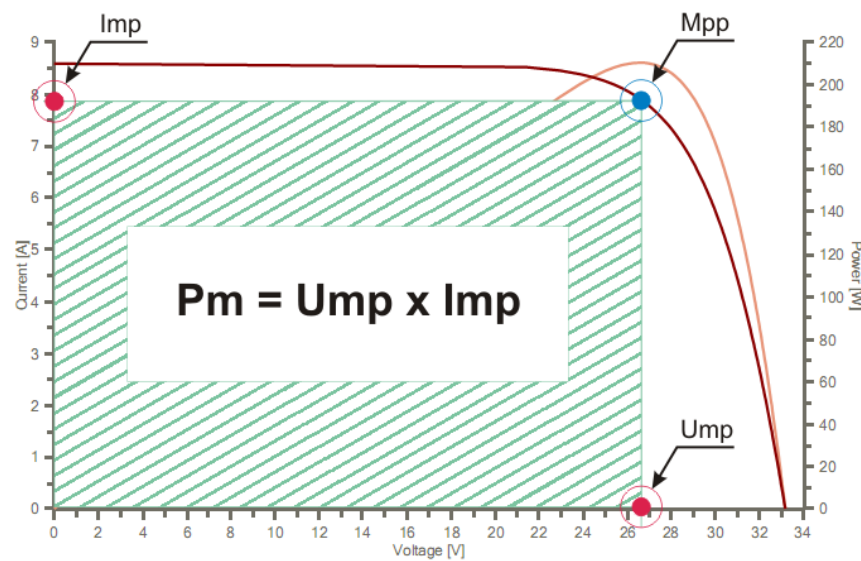
Hodnota maximálního napětí, stejně jako v předchozím případě neovlivňuje VA charakteristiku, nýbrž vychází z průsečíku bodu určujícího maximální výkon článku M_{pp} a je ovlivňováno důsledkem změn parametrů majících vliv na tvar průběhu VA charakteristiky solárního článku. Posouvá-li se M_{pp} , mění se také hodnota U_{mp} a I_{mp} . Na obr. 27 je U_{mp} označeno včetně osy procházející pracovním bodem M_{pp} článku. [10][12][26]



Obr. 27 - U_{mp} v bodě M_{pp} [26]

E. Maximální výkon, který může článek dodávat a pracovní bod – P_m [W], M_{pp} [-]

Maximální výkon udává průběh VA charakteristiky v důsledku hodnoty pracovního bodu, který na ní závisí. Maximální výkon najdeme v katalogových listech konkrétních článků. Výkon dosahující svého maxima přímo souvisí s pracovním bodem článku, který se označuje M_{pp} . Čím lépe je M_{pp} nastaven, tím větší výkon může solární článek dodávat na výstupních svorkách. M_{pp} dále určuje hodnoty I_{mp} a U_{mp} jako funkci závislosti maximálního výkonu článku. Hodnota pracovního bodu je ovlivněna ostatními parametry, jež mají vliv na celkový průběh VA charakteristiky, a sám tento průběh neovlivňuje. Maximální výkon, který může dodávat solární článek lze vyčíst opět z VA charakteristiky jako plochu obdélníku s limitními hodnotami U_{mp} , I_{mp} respektive hodnotou M_{pp} (U_{mp} , I_{mp}). Na obr. 28 je P_m vyznačen šrafovanou plochou a M_{pp} je zde značen modře. V důsledku ovlivnění U_{mp} a I_{mp} teplotou je zřejmý vliv na P_m článku.[10][12][26]

Obr. 28 - P_m , M_{pp} jako funkce U_{mp} , I_{mp} [26][28]

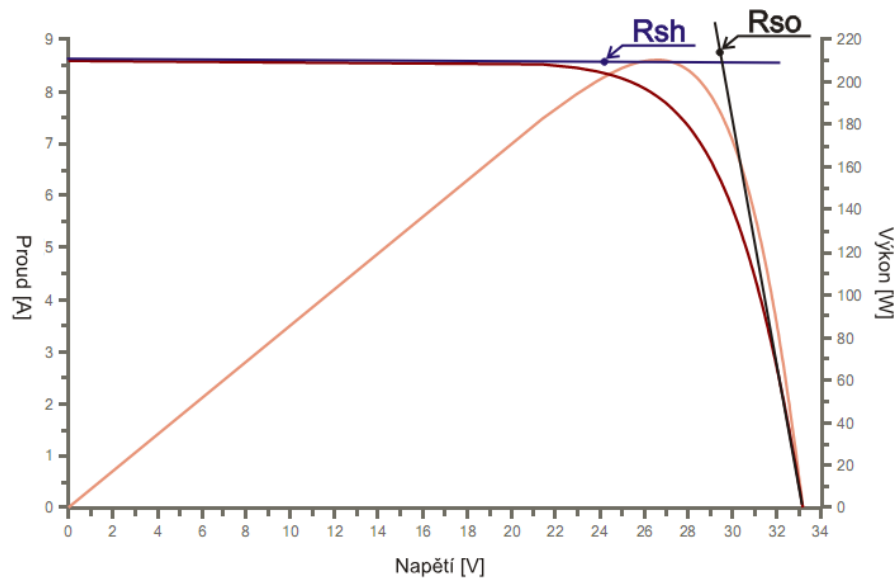
F. Činitel plnění (Fill Factor) – FF [-] a účinnost fotovoltaického článku - E_{ef} [%]

Parametry, které matematicky vyplývají z ostatních nutných vstupních dat v podobě primárních parametrů solárních článků, tudíž nemají vliv na VA charakteristiku a nejsou názorně uvedeny graficky. Parametry vyplývají z dobře známých rovnic, dostupných v drtivé většině publikací (rov. 2.19, 2.20). Úkolem FF a E_{ef} je dát jasnou představu o stavu solárního článku z hlediska dosahování předepsaných výkonů výrobcem včetně možnosti sledování degradace článků dlouhodobým měřením primárních parametrů. Teoreticky byly tyto parametry vysvětleny blíže v první části diplomové práce, proto zde nebudou dále vysvětlovány (kap. 2.4). [10]

G. Sériový odpor solárního článku - R_{so} [Ω], svodová vodivost - R_{sh} [Ω]

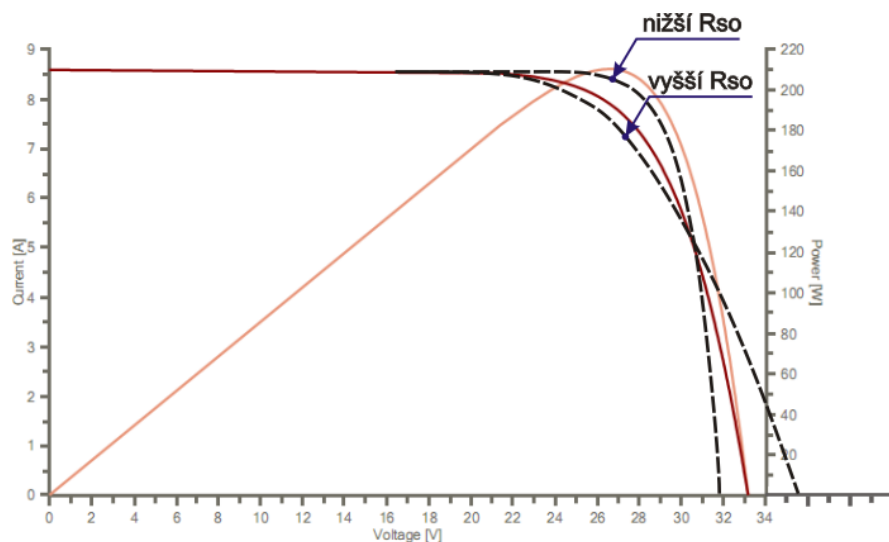
Obr. 29 naznačuje vliv odporů R_{so} a R_{sh} na VA charakteristiku solárního článku. Sériový odpor deformuje průběh VA charakteristiky na „vertikální“ části průběhu. R_{so} ovlivňuje VA charakteristiku určitým nakloněním průběhu charakteristiky. Svodová vodivost R_{sh} úzce souvisí se zkratovým proudem I_{sc} , jehož velikost přímo ovlivňuje. R_{sh} ovlivňuje sklon „horizontální“ části charakteristiky a jeho přítomnost značí většinou technickou nedokonalost, proniknutí vlhkosti pod EVA fólii, či jinou možnou závadu např. v raném stádiu budoucího vzniku větší závady. Samozřejmě nelze tato působení brát doslovně, nýbrž každý z těchto

odporů ovlivňuje VA charakteristiku jako celek velice výrazným způsobem. Je nutné hodnoty R_{so} a R_{sh} omezit a udržovat na maximálním možném minimu již při výrobním postupu konkrétního článku či FV panelu složeného z více těchto článků. Možnost ovlivnění sklonu charakteristiky v důsledku působení R_{so} a R_{sh} je naznačeno graficky pomocí Obr. 30, 31. [10][12][26]

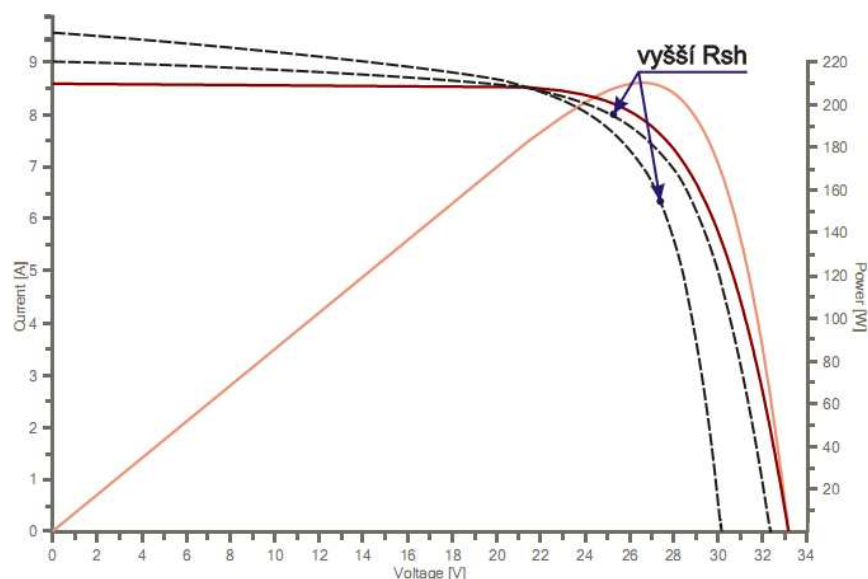


Obr. 29 - Naznačení změny sklonů díky R_{so} a R_{sh} [12][26]

R_{so} je spojen s hodnotou napětí na výstupu článku. S tím je také spojena celková účinnost článku. Ovlivnění je možné popsat nepřímou úměrností tak, že v případě nízkého R_{so} je hodnota napětí na výstupu článku vyšší, čímž roste i celková účinnost článku a naopak vyšší hodnota způsobuje nižší výstupní napětí spojené s nižší hodnotou účinnosti. Dále R_{so} udává sklon průběhu VA charakteristiky, jak bylo výše popsáno. [10][12][26]

Obr. 30 - Závislost I na R_{so} [10][12][26]

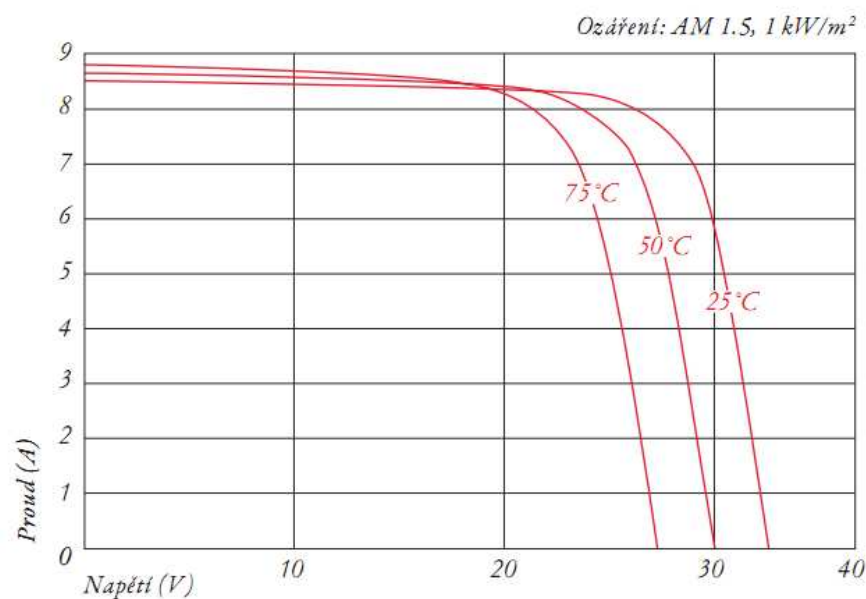
R_{sh} vychází z technologických nedokonalostí výroby solárních článků a je spojena s hodnotou výstupního proudu článku a s tvarem sklonu VA. Z obrázku vychází jasná nutnost minimalizace svodové vodivosti. V případě vyšší hodnoty má R_{sh} negativní vliv na proudové poměry solárního článku spojené se sníženou účinností takového systému. Opět zde, jako v případě R_{so} , platí pravidlo nepřímé úměrnosti, tentokrát vztažené k hodnotě proudu na výstupu článku. S tím je dále spojen sklon VA charakteristiky, ze kterého vyplývá také nižší hodnota pracovního bodu a dále účinnosti takového FV článku. [10][12][26]

Obr. 31 - Závislost I na R_{sh} [10][12][26]

Parametry R_{so} a R_{sh} úzce souvisí s kvalitou solárních článků. Snižování ohmických hodnot je možné docílit pouze zkvalitňováním technologických postupů výroby spojených s výrobou chemicky čistších primárních materiálů. Dále je možné snížit ohmickou hodnotu R_{so} použitím primárních materiálů disponujících vyšší hodnotou vodivosti. Ke snižování R_{so} lze přispět také kvalitnějším kontaktováním článků apod.

H. Teplota – T [°C]

Zásadním parametrem, ovlivňujícím průběh VA charakteristiky každého fotovoltaického článku, je teplota. Nesprávně zažitým předpokladem je teorie o dobrém počasí spojeném s nejvyššími výnosy FV článku. Předpoklad je správný v případě, že bude solární článek konstruován tak, že bude pohlcovat maximum vlnových délek spektra slunečního záření a nebude reagovat na rostoucí teplotu sebe sama. S lepší počasím, čili s lepšími atmosférickými podmínkami, ovšem souvisí negativně teplota. Parametr teploty velice nepříznivě ovlivňuje výkon celkového solárního systému, jak je ukázáno na Obr. 32. [28][29]



Obr. 32 - Vliv T na P_m [19][28]

Obr. 32 popisuje vliv teploty na posun pracovního bodu a změnu celkového průběhu VA charakteristiky. Pracovní bod a průběh nejsou jedinými parametry, které teplota ovlivňuje. S teplotou je spojeno také ovlivnění I_{sc} a U_{oc} .

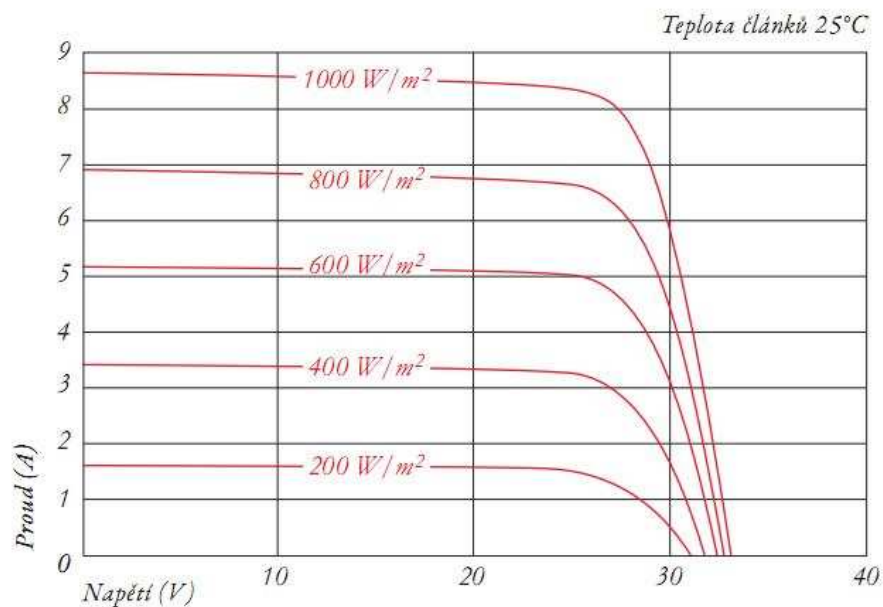
Se zvyšující se teplotou je spojen určitý nárůst I_{sc} , jak je z průběhů VA charakteristiky patrné. Naopak, v případě U_{oc} se jedná o situaci snižování napětí v důsledku rostoucí teploty. Z těchto poznatků vychází rozdílný průběh výsledné VA charakteristiky, se kterým dále souvisí posun pracovního bodu solárního článku a celkového snížení P_m . [28]

Vliv teploty je důsledně zkoumán výrobci, přičemž jsou vyvíjeny různé metody omezování účinků T na solární články. Jedná se o řešení z hlediska konstrukce výsledných fotovoltaických panelů, kde je sledováno především chlazení díky změnám ve skladbě článků a panelů jako takových. Další možností je použití jiných materiálů, které disponují nižší absorpcí světla mimo solární články. Hovoříme zde o laminačních technologiích EVA a dalších nosných materiálů zvyšujících mechanickou odolnost článku. Cílem je dosažení nejvyšší možné absorpce solárního článku ve spojení s nízkou akumulací tepelné energie spojené s kvalitnějším chlazením FV panelů. Je zřejmé, že se jednotlivé parametry vylučují, tudíž není z hlediska výroby jednoduché zvolit nejlepší možný kompromis mezi těmito parametry v rámci získání nejvyššího možného výkonu v průběhu celoročního provozu FV systémů. Zajímavým řešením je použití hybridního systému, kdy je panel konstruován jako ohříváč vody kombinovaný se solárními články pro výrobu elektřiny. Plní tak dvě funkce zároveň za cílem využití zbytkového tepla panelu a s tím spojené následné chlazení za účelem vyššího výkonu FV článků.

I. Intenzita osvětlení – I_{rr} [W/m^2]

Velmi důležitý parametr. Na jeho základě je uváděn výkon solárního článku. Jednotliví výrobci fotovoltaických panelů uvádějí maximální hodnotu P_m v závislosti na STC. Hodnota I_{rr} při STC je $1000W/m^2$. Se snižující se intenzitou I_{rr} při nepříznivých atmosferických podmínkách klesá výkon P_m solárních článků a naopak. Intenzita $1000W/m^2$ není limitní hodnotou, nýbrž hodnotou předepsanou normou pro měření solárních článků v rámci sjednocení měřících podmínek. Vyšší intenzita ozáření je spojena s nárůstem výkonu, nicméně výkon článků není nekonečný a je omezen charakterem použitých výchozích materiálů. Závislost intenzity osvětlení na výkonu článku je patrná z obr. 33. Bližším zkoumáním intenzity osvětlení solárního článku lze dospět k souvisejícímu vlivu charakteru spektra záření dopadajícího na solární článek. Reakce článku na spektrum záření závisí na atmosférických podmínkách konkrétního prostředí a na typu použitého polovodiče či

organické polymerní látky v případě organických solárních článků a také na případné konstrukci, kdy se pro pokrytí širšího spektra hojně užívají tandemové struktury solárních článků. [12][19][28]



Obr. 33 - Vliv I_{rr} na P_m [19][28]

3.2. STRUČNÉ SHRNUTÍ VLIVU PARAMETRŮ SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ NA PRŮBĚH VA CHARAKTERISTIKY

Z elektrického hlediska jsou v této kapitole uvedeny nejdůležitější parametry ovlivňující tvar průběhu VA charakteristiky. Všechny parametry spolu souvisejí. Změna pouze jediného parametru může mít za následek rapidní pokles výkonu fotovoltaického článku a nelze žádný z nich podcenit či označit jako méně významný. V ideálním případě by měly solární články disponovat vlastnostmi uvedenými v tabulce (tab. 1).

Tab. 1 - Teoretické obecné vlastnosti ideálního FV článku

PARAMETR FV ČLÁNKU	IDEÁLNÍ OBECNÁ HODNOTA
Zkratový proud – I_{sc} [A]	Maximální, technologicky dosažitelné hodnoty
Napětí naprázdno - U_{oc} [V]	
Proud, při kterém solární článek dodává maximální výkon – I_{mp} [A]	
Napětí, při kterém solární článek dodává maximální výkon – U_{mp} [V]	
Maximální výkon, který může článek dodávat – P_m [W]	
Činitel plnění (Fill Factor) – FF [-]	$FF = 1$
Účinnost fotovoltaického článku - E_{ef} [%]	Maximální technologicky dosažitelná
Sériový odpor solárního článku - R_{so} [Ω]	Minimální či nulový
Paralelní odpor solárního článku - R_{sh} [Ω]	Minimální či nulový
Teplota – T [°C]	Stabilní, neovlivňující konkrétní materiál solárního článku
Intenzita osvětlení – I_{rr} [W/m^2]	Maximální množství, jež může dopadnout v reálném čase na $1m^2$ při spektru, pro které je článek navržen a konstruován

Vyhodnocení parametrů v konkrétním funkčním fotovoltaickém systému včetně použité metody sledování stavu systému je uvedeno v následující kapitole, určené pro reálné měření FV systému navrženou sledovací metodou a podrobným popisem konkrétního FV systému a použitých měřících a vyhodnocovacích systémů.

4. NAVRHNĚTE METODU SLEDOVÁNÍ PARAMETRŮ FVE POMOCÍ VA CHARAKTERISTIK

Kapitola popisuje sledovací metodu použitou u reálného fotovoltaického systému. Návrh nejlepší možné metody lze provést několika způsoby a je nutné brát zřetel na poskytnutí maxima možných údajů z měření danou metodou. Jako nejpříznivější metoda byla zvolena varianta za použití analyzátoru VA charakteristik, která se jeví jako relativně dostupná, časově nenáročná, jednoduchá a přitom prokazatelně užitečná pro analýzu FV systémů a následné zpracování dat v číselné i grafické podobě jejího výstupu.

Pro ukázkou konkrétního vyhodnocení reálné FVE, která je stabilně osazena a uvedena do provozu, byla zvolena sestava FV panelů výrobce Kyocera. Výrobce patří k předním dodavatelům solárních panelů disponujících vysokou účinností. Panely Kyocera s nejvyšší

účinností jsou mimo jiné použity i ve vesmírné technologii jako zdroj elektrické energie družic, včetně mezinárodní vesmírné stanice ISS. V našem případě se jedná o komerčně dostupné panely s označením KD210-2PU. Dle výrobce se jedná o panely s dlouhou životností při zachování parametrů uváděných v katalogových listech s ročním procentuelním úbytkem výkonu, který se po prostudování několika typů FV panelů, řadí do kategorie s nižší roční procentuelní ztrátou P_m .

4.1. POPIS FV ELEKTRÁRNY VČETNĚ PARAMETRŮ OSAZENÉ FV TECHNOLOGIE



Obr. 34 - Situační pohled FVE Radnice

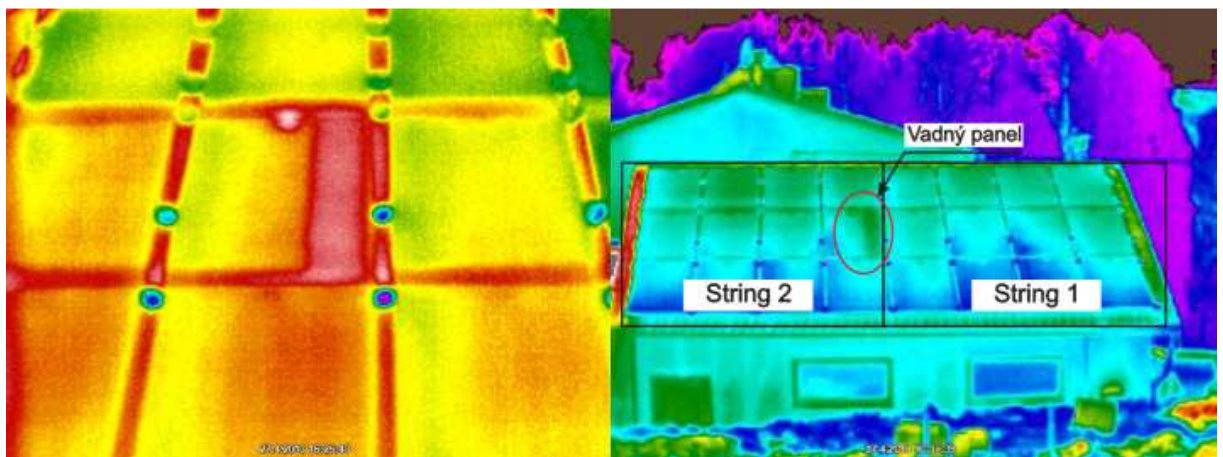
Měření bylo provedeno v lokalitě obce Radnice, okres Rokycany. Zařízení se nachází na střeše přístavku rodinného domu. FVE je stabilně v provozu od roku 2010 a je napojena na veřejnou distribuční síť. V návaznosti na elektrické měření byla provedena kontrola systému pomocí termovizních snímků, čímž bylo možné získat data potvrzující, či vyvracející výstup elektrického měření. Více o technických parametrech a instalaci FV elektrárny obsahuje příslušná tabulka včetně údajů o použitých FV panelech (tab. 2).

Tab. 2 - Přehled parametrů FVE a osazených FV panelů [19]

FOTOVOLTAICKÁ ELEKTRÁRNA MALÉHO VÝKONU V RADNICÍCH	
<i>Majitel:</i>	Marek Zeman
<i>Místo instalace a provoz:</i>	Radnice, okr. Rokycany
<i>GPS souřadnice:</i>	GPS: 49°51'12.490"N, 13°36'4.425"E
<i>Orientace:</i>	Jihovýchodní směr
<i>Maximální výkon:</i>	5,04Wp
<i>Počet uzlů stringů:</i>	2
<i>Počet panelů:</i>	2 x 12 ks
<i>V provozu od:</i>	2010
<i>Napojena na distribuční síť:</i>	Ano
<i>Spojení panelů:</i>	Sériové
<i>Splňuje normy:</i>	Normy ČSN zvláště pak dle ČSN 33 2000-4-41, ČSN 33 2000-3, ČSN 2000-5-54, ČSN 2000-7-712
INSTALOVANÉ FV PANELE VČETNĚ TECHNICKÝCH ÚDAJŮ	
<i>Výrobce:</i>	Kyocera Corporation GMBH Japan
<i>Typ:</i>	KD210-2PU
Při STC ($I_{rr} = 1000\text{W/m}^2$, $T = 25^\circ\text{C}$, $AM = 1,5$)	
<i>Jmenovitý výkon:</i>	210 W
<i>Maximální napětí systému:</i>	1000 V
U_{mp} :	26,6 V
I_{mp} :	7,9 A
U_{oc} :	33,2 V
I_{sc} :	8,58 A
<i>NOCT:</i>	45 °C
<i>Počet obtokových diod:</i>	3
<i>Počet článků na modul:</i>	54
<i>Velikost článku:</i>	156 x 156
<i>Technologie článku:</i>	Polykrystalický Si
<i>Kontaktování článku:</i>	Se 3 přípojnými
<i>Tolerance výkonu:</i>	+5/-3%

V tabulce jsou uvedena základní data včetně elektrických parametrů FV panelů a celkového zapojení FVE (tab. 2). Jelikož jsou předmětem diplomové práce solární články, budou dále popisovány pouze údaje a informace z hlediska FV panelů. Střídače, jištění, ochrany apod. zde nebudou řešeny.

Díky nepříznivým atmosférickým a povětrnostním podmínkám nebylo možné provádět zamýšlená opakovaná měření v řádu měsíců či jiných delších intervalech pro sledování vývoje výroby elektrické energie a průběhů VA charakteristik popisované FVE. Měření bylo nakonec rozděleno do několika etap, z nichž první se konalo dne 27.4.2013. Bylo zcela orientační a sloužilo zejména k základní představě a odzkoušení nastavení použitého zařízení, kterým byl analyzátor výrobce HT-INSTRUMENTS typ I-V400. Termovizní měření bylo nápomocno k získání přibližné představy o stavu měřené FVE z hlediska poruchových jevů. Pomocí termovizního snímkování byla nakonec objevena porucha jednoho fotovoltaického panelu umístěného ve stringu č. 2. Porucha je viditelná na obr. 35, kde je detailně zobrazen vadný panel. Dále ukazuje celkový pohled na pole FV panelů. Bohužel nebyly ideální teplotní podmínky a snímek je nepřehledný. V rámci zvýšení přehlednosti snímku a zvýraznění poruchy je vadný panel červeně ohraničen. Termovizní měření není z hlediska měření VA charakteristik potřebné, avšak pro pozdější srovnání se jeví jako užitečná pomůcka při následné analýze naměřených elektrických hodnot analyzátozem.



Obr. 35 - Termovizní snímek FV elektrárny Radnice

4.2. ANALYZÁTOR FV SYSTÉMŮ HT-INSTRUMENTS - I-V 400



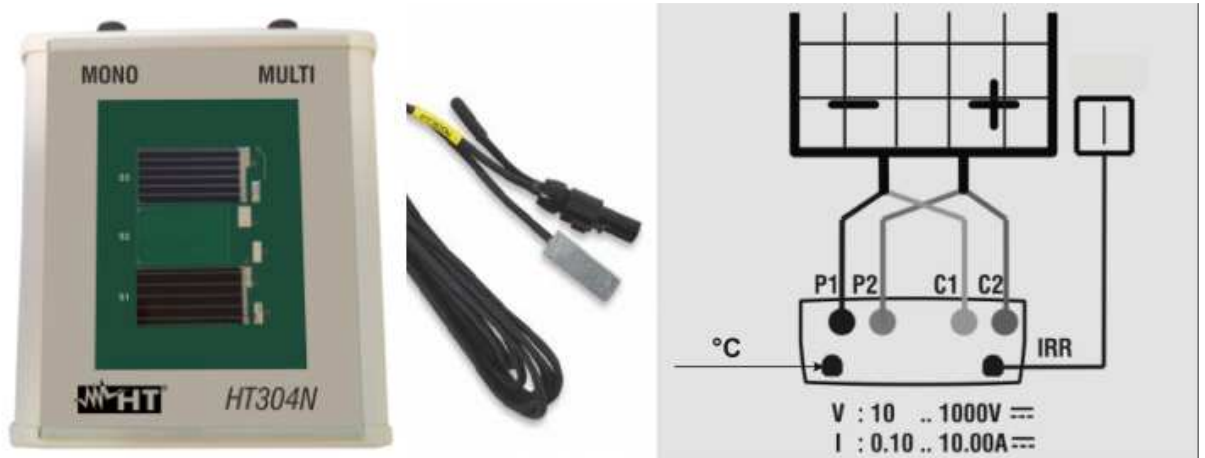
Obr. 36 - Čelní pohled na analyzátor HT I-V 400 [9]

Tab. 3 - Tabulka rozsahů VA analyzátoru [9]

ANALYZÁTOR FV SYSTÉMŮ - HT I-V 400	
Výrobce:	HT-INSTRUMENTS
Typ:	I-V 400
Datum poslední kalibrace:	17. 10. 2012
Pracovní rozsah analyzátoru vztažený na jeden panel:	
Max. počet stringů:	50
P_m [W]:	50 – 3200
U_{oc} [V]:	15 – 320
I_{sc} [A]:	0,5 – 9,99
U_{mp} [V]:	15 – 320
I_{mp} [A]:	0,5 – 0,99
R_{os} [Ω]:	0 – 10

Přístroj je moderní a jeho ovládání není složité. Z hlediska připojení na FV systém dokonce triviální a nezaměnitelný. Problémem může být nastavení konkrétních parametrů měřeného zařízení. Po pečlivém přečtení příloženého manuálu již není nastavení velkým problémem a je řešeno v několika navazujících krocích. Nejprve je nutné vygenerovat a zadat parametry jediného FV panelu osazeného v instalaci. Ideálním zdrojem informací je zde katalogový list výrobce, který je volně dostupný a obsahuje vše potřebné k pečlivému zadání nového typu FV panelu do paměti analyzátoru. Po úspěšném přidání nového panelu je nutné nastavit pomocí rozhraní menu na displeji počet panelů v jednom stringu, hodnotu

minimálního osvětlení, při kterém má přístroj povoleno provádět měření a nastavení použití externích čidel. Externím čidlem rozumíme srovnávací, kalibrovaný modul HT304N umožňující zapojení pro měření monokrystalických i polykrystalických systémů. Modul je osazen dvěma články výše zmíněných technologií. Druhým a posledním čidlem je externí teplotní čidlo, které je nutné připevnit na FV panel aktivního měřeného stringu. V ideálním případě je dobré připevnit teploměr na zadní stranu panelu pomocí pásky za použití teplovodivé pasty pro minimalizaci ztrát na rozhraní FV panel a teploměr. Také referenční modul HT304N je nutné umístit na místo instalace a zajistit shodné osvětlení a sklon stejně jako je tomu u měřeného stringu. Máme-li vše připravené, přichází na řadu námi nastavený analyzátor I-V400. Je nutné správně připojení na FVE, kterou je nutno v první řadě kompletně vyřadit z provozu! Nedodržení této zásady může vést k závažným škodám na přístroji či k úrazu elektrickým proudem. Zapojení je čtyřvodičové. Každý vstup barevně odpovídá konektoru, jež má být připojen. Před zapojením je dále nutné vybrat správné typy redukcí vzhledem k možným rozdílným typizovaným konektorům. Pro úplnost je nutno zkontrolovat zapojení pomocí tlačítka nápovědy v režimu měření. Pomocí tlačítka HELP je zobrazeno schéma zapojení a je tedy možné ověřit správnost připojení k FVE. Příslušenství včetně schématu zapojení je znázorněno na obrázku a není potřeba jej dále popisovat (Obr. 37).



Obr. 37 - Příslušenství IV400 + schéma zapojení FV systému [9]

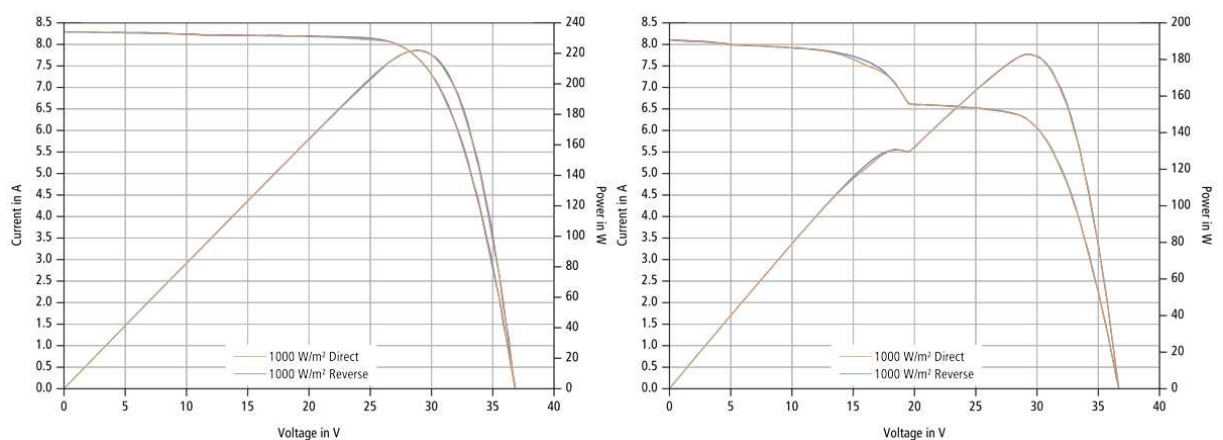
4.3. NÁVRH METODY ANALÝZY FV ELEKTRÁREN POMOCÍ VA CHARAKTERISTIK

Měřený systém včetně použitého přístroje, pokud nepočítáme souběžné měření, mimo tuto práci již bylo zmíněno výše (kap. 4.1, kap. 4.2). Návrh metody analýzy FVE představuje nesnadný úkol a není možné jednoznačně určit nejlepší možnou variantu. Důvodů je hned několik a lze je okrajově nastínit. Měření VA charakteristik lze provést s použitím několika přístrojů. Klasickou metodou je VA charakteristika měřena pomocí regulovatelného odporu, což představuje obrovské množství hodnot. To nepředstavuje problém v rámci měření či přesnosti, ovšem klade důraz na nutnost stabilních atmosferických podmínek po poměrně dlouho dobu. Použitím jediného univerzálního přístroje představuje výhodu z hlediska mobility pracovníka provádějícího měření a zároveň nabízí poskytnutí velmi rychlého proměření FVE. Cílem analýzy je především rychlost měření, přesnost měření a především vhodná a rychlá interpretace výsledků jak přímo na místě samotném, tak prostřednictvím PC bez nutnosti připojování externích zařízení. Technologické postupy jdou stále kupředu a i přes důslednou kontrolu výstupních výrobků se výrobci fotovoltaických systémů nevyhnou výrobním chybám, či případným poruchovým stavům zařízení, která jsou již v provozu. Z hlediska výše zmíněného vede jednoduchost před absolutně přesnými výsledky. Přesný průběh VA charakteristiky je nutný především k testování výrobku ze strany výrobce. K tomu slouží specializovaná akreditovaná zařízení vystavující certifikační protokoly a provádějící certifikační měření dle striktních a stabilních podmínek označovaných zkratkou STC. V terénu se jen těžko dá změřit VA charakteristiky za podmínek STC, tudíž nastává druhotný problém, srovnání výsledků s hodnotami výrobců. Opět zde situace nahrává jednoduchosti a kompaktnosti. Důvodem není nic jiného než automatická funkce přepočtu hodnot změřených při konkrétních podmínkách na podmínky odpovídající specifikacím STC. Víceru měřicími prvky, lze teoreticky docílit vyšší přesnosti při použití technologií odpovídajících parametrů vyšších tříd přístrojů, ovšem pro zběžné vyhodnocení a představě o stavu FVE bohatě postačí All-in-One systém jakým je například použitý analyzátor I-V400. Neznamená to však, že nelze s tímto přístrojem docílit přesných měření, naopak v rámci nastavení a kroku jednotlivých parametrů lze považovat měření za velmi přesné při podmínkách blízcích se STC. Problém zde tedy nastává s aktuálními povětrnostními vlivy. Bylo řečeno, že analýza musí být rychlá, účinná s rychlými výsledky. To vše je po technické stránce použitím I-V400

splněno, ovšem nelze ovládnout vliv počasí v danou chvíli měření, čímž vzniká jistá odchylka.

Příkladem měření FVE za nepříznivých povětrnostních vlivů je i výsledné měření popisované v této diplomové práci. Opět to neznamená, že jsou data nepoužitelná. Pro hrubou představu o funkčnosti měřené elektrárny ji lze považovat za dostačující. Podmínky za jakých bylo měření provedeno, jsou nastíněny v následujícím bloku, kde zdůvodněna nemožnost dlouhodobého měření pro lepší uplatnění navržené metody (kap. 4.4). [11]

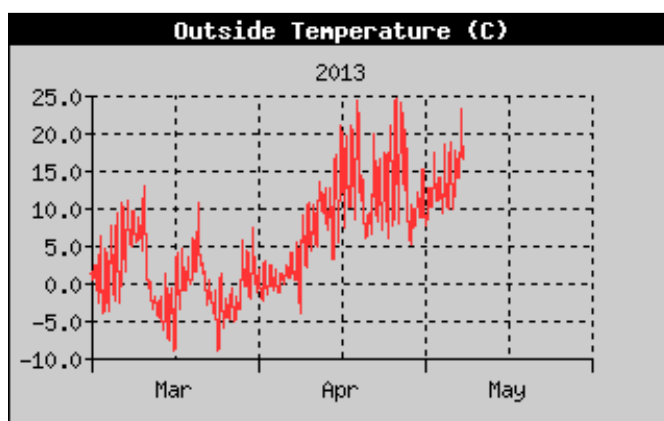
Analýza VA charakteristik pomocí analyzátoru je průkazná, co se týče přesnosti měření. Je zde nutné dbát zřetel na pokud možno co nejlepší atmosférické podmínky, které jsou v daném časovém intervalu přibližně stabilní. Dlouhodobým zkoumáním VA charakteristik konkrétního systému lze sledovat průběh charakteristiky a dosahování hodnot odpovídajícím hodnotám z katalogového listu výrobce. Je možné porovnávat veličiny typu I_{sc} , U_{oc} , R_{so} , R_{sh} , M_{pp} a další. Srovnáváním měření provedeným ve zvolených časových intervalech, je možné vysledovat možné vznikající vady stárnuacího zařízení, pohyb účinnosti, stabilitu výkonu systému, projev degradace FV článků, zda nedochází k úbytkům napětí díky vyšší svodové vodivosti apod. To lze bez problémů odhalit výše zmíněným pozorováním díky projevům vlivů primárních parametrů FV článků průběh VA charakteristiky. Příkladem chybného průběhu VA charakteristiky je např. situace, jež popisuje obr. 38. Krásně je zde vidět rozdíl mezi průběhem, který je z hlediska měření v pořádku, a naopak na situaci kdy popisuje vadný panel. Rozdíl ve špatné a dobré charakteristice je evidentní.



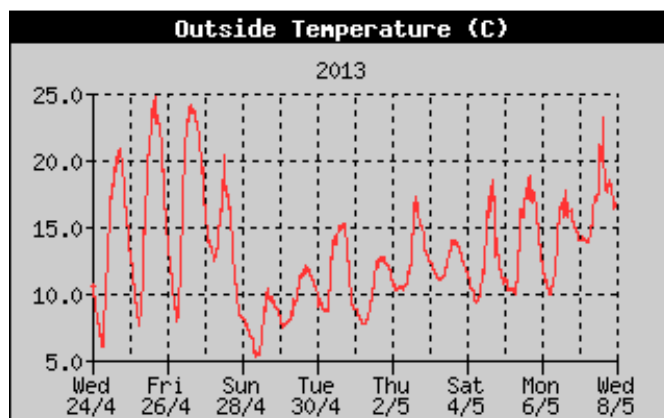
Obr. 38 - Srovnání správného průběhu VA charakteristiky (vlevo) s průběhem vadného panelu (vpravo) [8]

4.4. DLOUHODOBÉ POVĚTRNOSTNÍ PODMÍNKY MĚŘENÍ

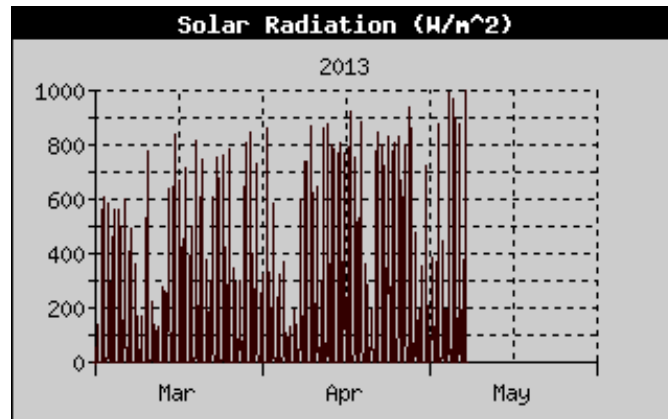
Kapitola 4.3 je věnována návrhu metody sledování parametrů FVE pomocí VA charakteristiky. Popsány jsou také nutné měřicí podmínky potřebné pro správnost údajů pořízených z měření navrženou technologií. Pro úplnost se jedná o dlouhodobě příznivé podmínky pro měření FVE přibližující se podmínkám STC. Vzhledem k letošnímu vývoji počasí, ovšem není tato podmínka splněna. Z důvodu nutnosti včasného odevzdání diplomové práce musela být FVE změřena v nejlepších možných podmínkách, které jsou ovšem pro prokazatelné výsledky zcela nedostačující a silně ovlivňují výsledky měření uvedené ve zhodnocení (kap. 4.5). Pro úplnost je aktuální vývoj počasí v období březen – květen 2013, včetně výtahu hodnot v období, kdy bylo prováděno měření uveden v obrázcích umístěných níže (Obr. 39,40 ,41 ,42).



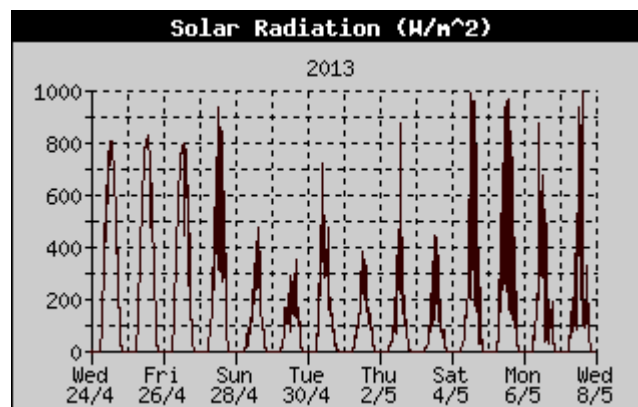
Obr. 39 - Průběh teplot březen - květen 2013 [11]



Obr. 40 - Průběh teplot od 24.4. do 8.5.2013 [11]



Obr. 41 - Průběh intenzity osvětlení březen - květen 2013 [11]



Obr. 42 - Průběh intenzity osvětlení bod 24.4. do 8.5.2013 [11]

Stručným popisem obrázků lze zjistit pohyb teplot a intenzity záření. V období od března do května 2013 zaznamenávaly teploty přechod přes hranici 20°C pouze zřídka. Intenzita záření se pohybovala v rozmezí hodnot $400 - 800\text{W/m}^2$. Pro nejlepší možné měření z hlediska intenzity záření hovoříme o hodnotě 1000W/m^2 a teplotě panelů cca 25°C . Teplota zde není problémem, jelikož splňuje určitou toleranci a pohybuje se v hodnotách blízkých STC. Obr. 39 a obr. 41 poskytují detailnější informaci v rozmezí 24.4. – 8.5.2013.

Tab. 4 - Podmínky včetně naměřených vstupních parametrů FVE [11]

LOKALITA, PODMÍNKY MĚŘENÍ	
Lokalita:	Plzeňský kraj
Datum / Čas:	27.4.2013 - 4.5.2013
Teplota okolí [°C]:	18,2 – 22,6 °C
Stav oblohy:	Polojasno
Vlhkost vzduchu:	Cca 80%
Srážky [mm/cm ²]:	0
Vítr [m/s]:	3 – 4 Východní
Vstupní údaje z hlediska FVE	
Teplota osazených panelů [°C]:	23,0 – 31,9
Ozářenost [W/m ²]:	130 – 641
Úhel sklonu panelů [°]:	34
Zapojení panelů jednoho stringu:	Sériové

4.5. VÝSLEDKY MĚŘENÍ A JEJICH ZHODNOCENÍ

Začátkem kapitoly je nutné uvést naměřené hodnoty, jež budou dále podrobněji vyhodnoceny pomocí VA charakteristik. Naměřené hodnoty zde uvedené jsou nejdůležitějšími daty navržené analýzy (tab. 4 ,5 ,6 ,7). Uvedená data představují výčet nejpodrobnějších měření (tab. 4, 5) pro string č. 1 a č. 2, dále tab. 6 a 7 obsahuje data měření při podmínkách maximálně nevyhovujících pro testování. Bude ukázáno jak velký vliv má tato skutečnost na průběhy VA charakteristik a především na přesnost měření.

Tab. 5 - Naměřené hodnoty String č. 1

Měření	P_{max} [W]	V_{OC} [V]	V_{mpp} [V]	I_{mpp} [A]	I_{SC} [A]	Osvětlení [W/m ²]	Teplota [°C]	FF
1	1911,11	370,80	295,70	6,46	7,05	634	29,8	73
2	1920,31	369,80	295,16	6,51	7,10	641	31,1	73
3	1906,13	369,10	294,61	6,47	7,06	640	31,9	72

Tab. 6 - Neměřené hodnoty String č. 2

Měření	P_{max} [W]	V_{OC} [V]	V_{mpp} [V]	I_{mpp} [A]	I_{SC} [A]	Osvětlení [W/m ²]	Teplota [°C]	FF
4	1790,34	362,90	292,97	6,11	6,71	608	29,0	74
5	1741,06	362,30	291,88	5,97	6,59	594	29,5	73
6	1729,27	360,90	290,78	5,95	6,60	592	30,3	73
7	1690,60	359,80	289,14	5,85	6,47	572	31,1	73

Tab. 7 – naměřené hodnoty při zcela nevyhovujících podmínkách – String č. 1

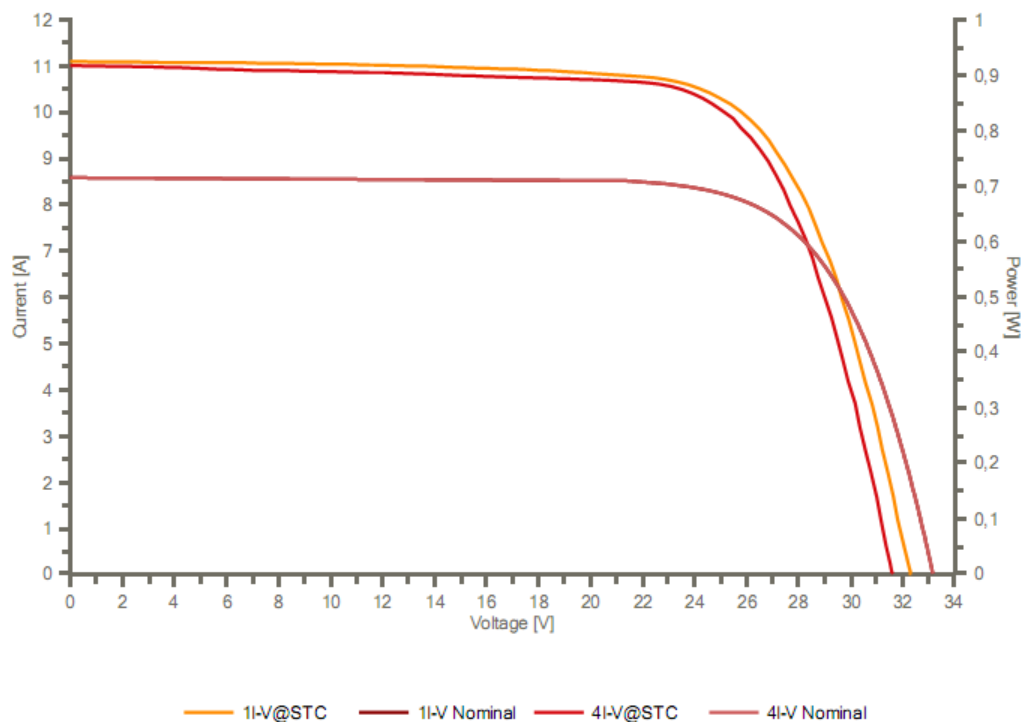
Měření	P_{max} [W]	V_{OC} [V]	V_{mpp} [V]	I_{mpp} [A]	I_{SC} [A]	Osvětlení [W/m ²]	Teplota [°C]	FF
8	436,81	352,10	295,16	1,48	1,72	130	24,8	72
9	459,37	353,10	301,72	1,52	1,81	132	24,8	72
10	488,84	354,30	297,89	1,64	1,93	137	24,6	72
11	354,70	354,70	300,08	1,71	2,02	143	24,6	72

Tab. 8 - naměřené hodnoty při zcela nevyhovujících podmínkách – String č. 2

Měření	P_{max} [W]	V_{OC} [V]	V_{mpp} [V]	I_{mpp} [A]	I_{SC} [A]	Osvětlení [W/m ²]	Teplota [°C]	FF
12	560,68	365,60	304,45	1,84	2,06	145	24,3	74
13	537,40	364,60	302,81	1,77	1,99	141	24,1	74
14	534,64	364,50	302,81	1,77	1,98	142	23,9	74
15	516,21	364,00	301,72	1,71	1,92	143	23,1	74
16	502,46	363,40	300,62	1,67	1,87	141	23,0	74

Naměřená data jsou k dispozici a je možné přistoupit k vykreslení a ukázce VA charakteristik. Jednotlivé křivky, včetně rozlišení stringů, jsou interpretovány pomocí software, který je součástí dodávky analyzátoru. Software pod označením TopView ve verzi 2.0.0.19-00 byl instalován do PC a bylo jeho prostřednictvím možné stáhnout naměřené dat do počítače. Software se tváří uživatelsky velice přívětivě a jeho ovládání je intuitivní. Výsledky měření jsou k dispozici ve srovnání s aktuálními podmínkami při měření celé FVE (Measures@OPC), jednoho ze stringů, v přepočtu na jeden panel konkrétního stringu (Measures Avg@OPC) a také v přepočtu na STC. Nedílnou součástí je zobrazení nastavení, jež jsme zadávali na samém počátku při přidávání nového FV panelu do databáze analyzátoru (Nominal). S nominálními hodnotami lze porovnávat přepočtenou hodnotu STC bez ohledu na to, jaké byly aktuální podmínky s přihlédnutím na vznik možné odchylky měření v důsledku rychlých změnách počasí. Pro srovnání s nominálními hodnotami jsem vybral ze

všech měření, nejlepší možná data z každého stringu. Vycházel jsem z předpokladu nutnosti co nejvyššího osvětlení panelu a podobné teploty panelů dle STC. Nedílnou součástí slunečního záření je spektrum, které má vliv na výkon FV článku dle citlivosti materiálu na šírku určité části spektra. Právě I_{rr} a T jsou hlavními parametry, jež deformují VA charakteristiky. Jednotlivé charakteristiky STC v porovnání s nominálními hodnotami jsou na obr. 43, 44, 45, 46. Výhodou použitého převodu do počítačové podoby je možný export zvolených dat do formátu PDF v libovolných kombinacích dle potřeby. Obr. 43 popisuje změřené hodnoty v nejpříznivějších podmínkách, v nichž bylo možné měřit. Naopak v případě obr. 44 se jedná o hodnoty měřené za podmínek nejméně příznivých k vyhodnocení VA charakteristik FVE. V obou případech jsou uvedeny hodnoty přepočtené na jeden panel k podmínkám STC.

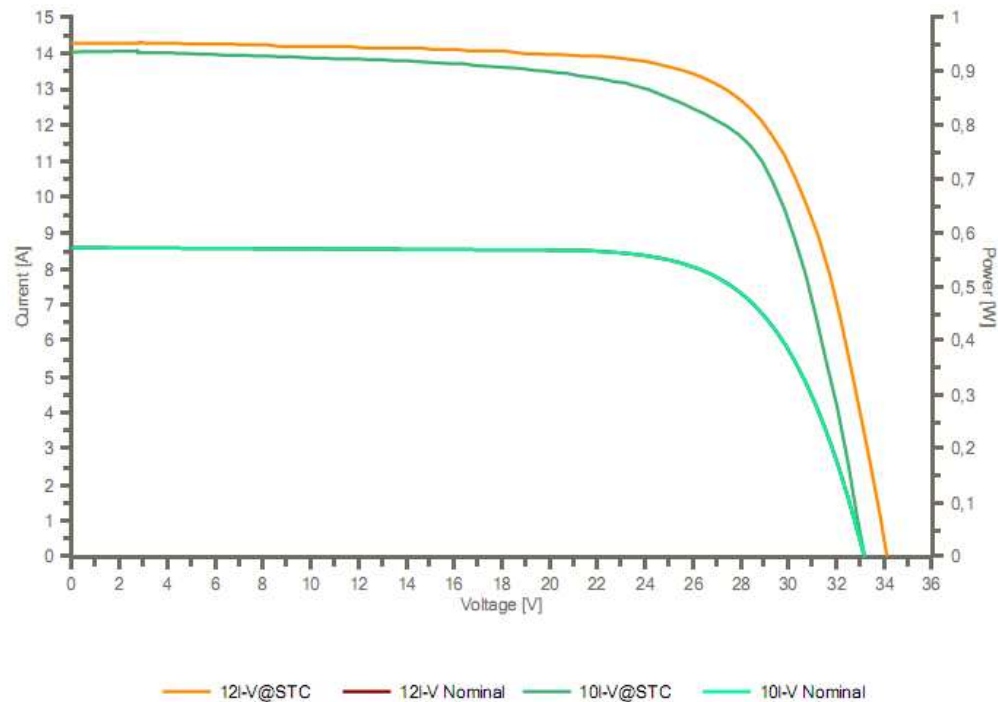


Obr. 43 - Vyhodnocení FVE jednotlivých stringů v přepočtu na STC v porovnání s nominálními hodnotami

Zhodnocení těchto výsledků je poměrně jednoduché. Vzhledem k vygenerování pouhých VA charakteristik v přepočtu na jeden panel a srovnání nominálních hodnot katalogového listu je zcela evidentní rozdíl mezi těmito průběhy u obou měření. Obě dvě měření stringů je možné porovnávat dohromady. Je nutné zmínit, že v grafech není vyznačena výkonová křivka určující M_{pp} , U_{mp} a I_{mp} . Příslušné hodnoty jsou obsaženy v tab. 4, 5 nebo v originálních

tabulkách (příloha A, B). Průběhy VA charakteristik stringů pak (příloha C, D, E, F). Srovnáním s VA charakteristikou uváděnou výrobcem dospějeme překvapivému zjištění v podobě většího okamžitého proudu I_{sc} u obou měření, které jsou si velmi podobné. V porovnání s nominálními hodnotami hovoříme o nárůstu proudu o velikost pohybující se kolem hodnoty 2,5A. To je oproti normálu při STC velký nárůst a jedná se o jedinou hodnotu vypovídající o vyšším okamžitým výkonu v době měření, kdy následným přepočtem takto velká odchylka vznikla. Zaměříme-li se na horizontální a vertikální sklon VA charakteristik, liší se pouze nepatrně a je tedy zřejmé, že v rámci R_{so} a R_{sh} se jednotlivé panely jeví jako bez poruchy. Nárůst proudu a s ním spojená odchylka měření je zřejmě důsledkem nepřesného měření. Vznik odchylky byl zapříčiněn špatným počasím při měření. Přesto, že se jedná o velice rychlou metodu, trvá měření přeci jen určitý čas. V rámci měření docházelo k cyklickým nárazovým změnám intenzity osvětlení a změnám v šířce spektra dopadajícího na FV články díky rychle se měnící oblačnosti a je tedy možné, že došlo k nepřesnému vyhodnocení aktuálního provozního stavu jednotlivých stringů. Z průběhů je také patrné, že jsou výkonové hodnoty stringu č. 2 nepatrně nižší, což může být zapříčiněno vadou některého z panelů či jinou intenzitou osvětlení a slunečního spektrem záření. Mírné zvlnění průběhu VA charakteristiky v měření č. 10, 11 dále ukazuje na skutečnost možnosti existence vadného panelu či většího počtu panelů.

Termovizní snímek znázorňující poruchu stringu č. 2 ukazuje na problém, který by měl teoreticky vést k celkovému poklesu při STC o 70W v celém stringu (Obr. 35). Vizually nelze tímto měřením rozpoznat vadný panel a vzhledem k odchylce v měření není tato ztráta zřetelná. Vadu v panelu zřejmě způsobuje bypass dioda, která v důsledku velkých proudů způsobuje celkový ohřev 1/3 celkové plochy panelu, což představuje vyřazení 18 solárních článků, které jsou společně propojené.



Obr. 44 - Vyhodnocení FVE jednotlivých stringů v přepočtu na STC v porovnání s nominálními hodnotami

Obr. 44 je opět důkazem vlivu stavu počasí na výsledek měření. Měření bylo provedeno za podmínek uvedených tab. 6, 7. Účelem bylo ověření nárůstu odchylky jako funkce vlivu počasí na průběh měření. Potvrdilo, že čím nižší je intenzita osvětlení, tím vyšší je změřená odchylka dále zvětšená o přepočet hodnot změřených na hodnoty odpovídající STC. String č. 2 a jeho hodnoty I_{sc} a U_{oc} vykazuje opět vyšší údaje oproti stringu č. 1, tudíž je zde potvrzena jistá odlišnost obou větví FVE. Hodnoty I_{sc} jsou oproti lepším podmínkám měření vyšší, což způsobuje odchylka měření z výše zmíněných důvodů.

4.6. ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ A NAVRŽENÉ METODY SLEDOVÁNÍ FVE

Přesto, že se nepodařilo potvrdit ani vyvrátit existenci nalezené chyby pomocí termovizní kamery, považuji měření, vzhledem k podmínkám měření, za úspěšné. Změřené hodnoty nejsou nicméně prokazatelně přesné. Navržená metoda je základním stavebním kamenem, poskytujícím zevrubnou informaci o stavu zařízení. V případě větší závady či výpadku například celého panelu by se touto metodou závada odhalila bez použití termovizních prostředků či jiných nákladnějších metod měření. Dnes je situace o něco jednodušší, jelikož

střídače FVE disponují prostředky na sledování aktuálních výnosů. Je zřejmé, že i tato informace poskytne představu o tom, zda FVE pracuje korektně či ne. Mezi výhody této metody bych rád vyzdvihl její rychlost, jednoduchost a přehlednost zpracovaných údajů. Naopak jako nedostatek bych hodnotil chybovost při ne příliš ideálních povětrnostních podmínkách, kdy není možné zajistit stabilní intenzitu ozáření a další nutné parametry potřebné k přesnému měření. Pro menší firmy zabývajícími se FVE, bych doporučil rozšířenou verzi analyzátoru, a sice typového označení SOLAR I-V, který disponuje řadou nadstavbových měření, které dále zpřesňují a zkvalitňují vyhodnocení měřeného systému. Pro správnou funkci navržené metody a získání korektních výsledků je nutné dodržení stabilních podmínek z dlouhodobého časového horizontu v příslušných dnech měření včetně znalosti parametrů osazených FV článků, což dále pomáhá k průkaznějšímu vyhodnocení. V ideálním případě bych doporučil kombinovat tuto metodu právě s metodou sledování pomocí termovizních kamer, která by v tomto případě sloužila pro zevrubný přehled správnosti funkce systému před započítím elektrického měření VA charakteristik.

5. ZÁVĚR

Diplomová práce pojednává svojí strukturou o parametrech a vlastnostech FV článků užívaných pro přeměnu sluneční energie na energii elektrickou. Uvádí základní technologické postupy výroby vstupních materiálů včetně jejich základních vlastností. Dále poskytuje přehled o používaných technologiích solárních článků, struktuře a vlastnostech FV článků. Úkolem diplomové práce je zaměřením se na průběhy VA charakteristik FV článků z obecného i praktického hlediska ovlivňování průběhů křivek v závislosti na primárních parametrech solárních systémů. Ovlivňování je dáno jak teoretickým rozborem (kap. 2), tak praktickou ukázkou ovlivňování jednotlivých parametrů pomocí obrázků s parametry v nich vyznačenými (kap. 3).

Nedílnou součástí diplomové práce je třetí bod zadání, jež předpokládá návrh sledovací metody VA charakteristik FVE z hlediska vyhodnocení stavu a závadnosti osazeného zařízení. Diagnostika je možná na základě poznatků ovlivňování průběhů VA charakteristik. Uspokojivá je rychlost navržené metody pomocí analyzátoru FVE společnosti HT-INSTRUMENTS typu I-V400. Navržena a ověřena byla pomocí měření na

konkrétní FVE v lokalitě obce Radnice, okr. Rokycany. Měření probíhalo za dlouhodobě nepříznivých povětrnostních podmínek (kap. 4.4). Jeho výsledek není jednoznačný v rámci možnosti diagnostiky FVE, kdy není možné zcela jistě určit, zda je FVE v pořádku či ne. Nicméně v případě povětrnostních vlivů parametricky se blížících k STC je tato metoda zcela jednoznačně průkazná a její grafický výstup zde bude vypovídat o stavu FVE velmi korektně. Analýzu nelze provádět prostřednictvím jediného měření, proto je navržena jako dlouhodobá při sledování trendu změn VA charakteristiky zařízení. Ideálním stavem je poté kombinace této metody s metodou na základě termovizních snímků, ovšem není nutným předpokladem úspěšného elektrického měření navrženou metodou.

Pro splnění celého rozsahu zadání diplomové práce bylo vynaloženo maximum úsilí a prostředků pro korektnost zpracovaných údajů a věřím, že může být nápomocna v rámci objasněné představy o funkci FV článků, parametrech majících vliv na celkový výkon FV článků a v neposlední řadě o možnosti rychlé a uspokojivé metody analýzy VA charakteristik FVE.

6. SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ

- [1] Fotovoltaika. *Green Technology* [online]. 2007 [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: <http://www.green-t.cz/informace/technologie/fotovoltaika/>
- [2] Low Cost Solar Panels. *Jc-solarhomes.com* [online]. 2006 [cit. 2013-03-13]. Dostupné z: http://jc-solarhomes.com/low_cost_solar_panels.htm
- [3] GE develops thin film photovoltaic panels. *Green power news portal and community* [online]. 2012 [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: <http://gotpowered.com/2011/ge-develops-thin-film-photovoltaic-panels/>
- [4] Wiedza i Życie. *Wiedza i Życie* [online]. 1997 [cit. 2013-04-26]. Dostupné z: <http://archiwum.wiz.pl/images/duze/1997/03/97032012.GIF>
- [5] UCLA engineers create tandem polymer solar cells that set record for energy-conversion. *UCLA engineering* [online]. 2013 [cit. 2013-05-07]. Dostupné z: <http://www.engineer.ucla.edu/newsroom/featured-news/archive/2012/ucla-engineers-create-tandem-polymer-solar-cells-that-set-record-for-energy-conversion>
- [6] Conducting Polymer Materials for Flexible OPV Applications: Orgacon™ PEDOT : PSS. *Sigma-Aldrich chemical directory: [elektronický zdroj]* [online]. Nottingham: Hampden Data, c1997 [cit. 2013-04-22]. Dostupné z: <http://www.sigmaaldrich.com/materials-science/organic-electronics/agfa-opv.html#ref>
- [7] Protokol - Plancova konstanta. *UNIUM* [online]. 2009 [cit. 2013-04-17]. Dostupné z: <http://www.unium.cz/materialy/vut/fekt/protokol-plancova-konstanta-m11015-p1.html>
- [8] Diagnostika FV modulů a FVE. *Abot.cz* [online]. 2011 [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: <http://www.abot.cz/cs/sluzby/diagnostika-fv-modulu-a-fve#va-charakteristika>
- [9] PV instalation testers. *HT-instruments* [online]. 2012 [cit. 2013-04-26]. Dostupné z: <http://www.ht-instruments.com/uploads/03/9c/039cf96706753e5fd9c8f57c3405d76d/PV-testers-four-sided-leaflet-English.pdf>
- [10] Měření V-A charakteristiky různých fotovoltaických článků. *Department of electrical power engineering* [online]. 2013 [cit. 2013-4-30]. Dostupné z: http://www.ueen.feec.vutbr.cz/cz/images/stories/images_laboratory/H2aFVE/Files/Laboratorn_i_uloha_c6.pdf
- [11] Meteo.zcu.cz. Monthly Graphs From Automatic Meteo Station at ZCU FEL [online]. Dostupné z: <http://meteo.zcu.cz/monthly.php> [cit. 2013-5-7]
- [12] BĚLÍK, Milan. Přednášky SOES, Plzeň: ZČU FEL, [2011]
- [13] Product and service providers. *Climate Action Programme* [online]. 2013 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: <http://www.climateactionprogramme.org/products-and-services/list>
- [14] Single Crystal Sapphire Products. *KYOCERA* [online]. 2010 [cit. 2013-05-02]. Dostupné z: <http://americas.kyocera.com/kicc/industrial/crystal.html>
- [15] Fotovoltaický článek. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2013 [cit. 2013-04-28]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Fotovoltaick%C3%BD_%C4%8Dl%C3%A1nek
- [16] Křemík. ŠTĚPÁNEK, Petr. *Periodická tabulka* [online]. 2007 [cit. 2013-03-09]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/14.html>
- [17] Křemík. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2013 [cit. 2013-04-27]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/K%C5%99em%C3%ADk>
- [18] Fotoelektrický jev. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2013 [cit. 2013-03-06]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Fotoelektrick%C3%BD_jev
- [19] *KYOCERA: Global* [online]. 2010 [cit. 2013-04-25]. Dostupné z: <http://global.kyocera.com/>
- [20] Kde se bere monokrystalický křemík. *Materiálová věda* [online]. [cit. 2013-04-02]. Dostupné z: <http://materialovaveda.blogspot.cz/2011/07/kde-se-bere-monokrystalicky-kremik.html>

- [21] *OZEportál: Fotovoltaika* [online]. 2011 [cit. 2013-04-02].
- [22] OZEportál. *OZEportál: Fotovoltaika* [online]. 2011 [cit. 2013-04-02]. Dostupné z: http://www.ozeportal.cz/img_obsah/mono_2.jpg
- [23] Solární články z krystalického křemíku - základní technologie současné fotovoltaiky. *TZBinfo* [online]. 2006 [cit. 2013-03-29]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/3553-solarni-clanky-z-krystalickeho-kremiku-zakladni-technologie-soucasne-fotovoltaiky>
- [24] *Ostrovni fotovoltaické elektrárny a systémy* [online]. 2011 [cit. 2013-03-29]. Dostupné z: <http://files.ostrovni-fotovoltaika.cz/200000040-030aa0401d/Fotovoltaick%C3%BD%20%C4%8DI%C3%A1nek.jpg>
- [25] BENDA, Vítězslav. Fotovoltaické články z krystalického křemíku - současné trendy. In: *Fotovoltaické články z krystalického křemíku - současné trendy* [CD]. 2009 [cit. 2013-04-28].
- [26] FEJFAR, Antonín. Křivítka pro Volt-Ampérové charakteristiky slunečních článků. In: *Křivítka pro Volt-Ampérové charakteristiky slunečních článků* [CD]. 2009 [cit. 2013-04-28].
- [27] HASELHUHN, Ralf. *Fotovoltaika: budovy jako zdroj proudu*. 1. české vyd. Ostrava: HEL, 2011, 176 s. ISBN 978-80-86167-33-6.
- [28] LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. *Fotovoltaika: teorie i praxe využití solární energie*. 1. vyd. Praha: ILSA, 2009, 160 s. ISBN 978-80-904311-0-2.
- [29] MACHÁČEK, Zdeněk, Kamil STANĚK a Petr WOLF. Vliv nerovnoměrně rozložené teploty na elektrické parametry FV pole. *Vliv nerovnoměrně rozložené teploty na elektrické parametry FV pole* [CD]. č. 2009, s. 4 [cit. 2013-04-28].
- [30] Epitaxe. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2013 [cit. 2013-04-28]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Epitaxe>
- [31] Solární panel. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2013 [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Sol%C3%A1rn%C3%AD_panel#Organick.C3.BD_sol.C3.A1rn.C3.AD_panel
- [32] Fullereny. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2013 [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Fullereny>
- [33] Protein Structure Initiative. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2013 [cit. 2013-04-12]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Protein_Structure_Initiative
- [34] HAVRÁNEK, Miroslav. Organické polymery jako zdroj energie. *Aldebaran* [online]. 2007, roč. 2007, č. 30 [cit. 2013-04-12]. Dostupné z: http://aldebaran.cz/bulletin/2007_30_org.php

7. PŘÍLOHY

Příloha A – Tabulka výchozích naměřených hodnot (Tab. 4, 5)

	Nmod	Pmax	Voc	Vmpp	Impp	Isc Irradiance	Module Temp.	FF	Temp	alpha	beta	tol+	tol-
Meas. 1 - KYOCERA KD210 4.5.2013 14:43													
1 Measures@OPC	12	Not Ok (23,06%)	370,80	295,70	6,46	7,05	634	73	AUX	0,0597	-0,361	5	5
1 Meas Avg@OPC	1	159,26	30,90	24,64	6,46	7,05	634	73	AUX	0,0597	-0,361	5	5
1 STC	1	258,43	32,35	25,42	10,17	11,09	1000	72	AUX	0,0597	-0,361	5	5
1 Nominal	1	210,00	33,20	26,60	7,90	8,58	1000	74	AUX	0,0597	-0,361	5	5
Meas. 2 - KYOCERA KD210 4.5.2013 14:43													
2 Measures@OPC	12	Not Ok (22,69%)	369,80	295,16	6,51	7,10	641	73	AUX	0,0597	-0,361	5	5
2 Meas Avg@OPC	1	160,03	30,82	24,60	6,51	7,10	641	73	AUX	0,0597	-0,361	5	5
2 STC	1	257,64	32,35	25,14	10,25	11,04	1000	72	AUX	0,0597	-0,361	5	5
2 Nominal	1	210,00	33,20	26,60	7,90	8,58	1000	74	AUX	0,0597	-0,361	5	5
Meas. 3 - KYOCERA KD210 4.5.2013 14:44													
3 Measures@OPC	12	Not Ok (22,42%)	369,10	294,61	6,47	7,06	640	73	AUX	0,0597	-0,361	5	5
3 Meas Avg@OPC	1	158,84	30,76	24,55	6,47	7,06	640	73	AUX	0,0597	-0,361	5	5
3 STC	1	257,07	32,41	25,53	10,07	10,98	1000	72	AUX	0,0597	-0,361	5	5
3 Nominal	1	210,00	33,20	26,60	7,90	8,58	1000	74	AUX	0,0597	-0,361	5	5
Meas. 4 - KYOCERA KD210 4.5.2013 14:50													
4 Measures@OPC	12	Not Ok (19,77%)	362,90	292,97	6,11	6,71	608	74	AUX	0,0597	-0,361	5	5
4 Meas Avg@OPC	1	149,20	30,24	24,41	6,11	6,71	608	74	AUX	0,0597	-0,361	5	5
4 STC	1	251,51	31,65	25,09	10,03	10,99	1000	72	AUX	0,0597	-0,361	5	5
4 Nominal	1	210,00	33,20	26,60	7,90	8,58	1000	74	AUX	0,0597	-0,361	5	5
Meas. 5 - KYOCERA KD210 4.5.2013 14:50													
5 Measures@OPC	12	Not Ok (19,45%)	362,30	291,88	5,97	6,59	594	73	AUX	0,0597	-0,361	5	5
5 Meas Avg@OPC	1	145,09	30,19	24,32	5,97	6,59	594	73	AUX	0,0597	-0,361	5	5
5 STC	1	250,84	31,70	24,71	10,15	11,04	1000	72	AUX	0,0597	-0,361	5	5
5 Nominal	1	210,00	33,20	26,60	7,90	8,58	1000	74	AUX	0,0597	-0,361	5	5
Meas. 6 - KYOCERA KD210 4.5.2013 14:51													
6 Measures@OPC	12	Not Ok (19,55%)	360,90	290,78	5,95	6,60	592	73	AUX	0,0597	-0,361	5	5
6 Meas Avg@OPC	1	144,11	30,08	24,23	5,95	6,60	592	73	AUX	0,0597	-0,361	5	5
6 STC	1	251,06	31,70	24,71	10,16	11,11	1000	71	AUX	0,0597	-0,361	5	5
6 Nominal	1	210,00	33,20	26,60	7,90	8,58	1000	74	AUX	0,0597	-0,361	5	5
Meas. 7 - KYOCERA KD210 4.5.2013 14:52													
7 Measures@OPC	12	Not Ok (21,50%)	359,80	289,14	5,85	6,47	572	73	AUX	0,0597	-0,361	5	5
7 Meas Avg@OPC	1	140,88	29,98	24,10	5,85	6,47	572	73	AUX	0,0597	-0,361	5	5
7 STC	1	255,15	31,70	25,03	10,19	11,27	1000	71	AUX	0,0597	-0,361	5	5
7 Nominal	1	210,00	33,20	26,60	7,90	8,58	1000	74	AUX	0,0597	-0,361	5	5

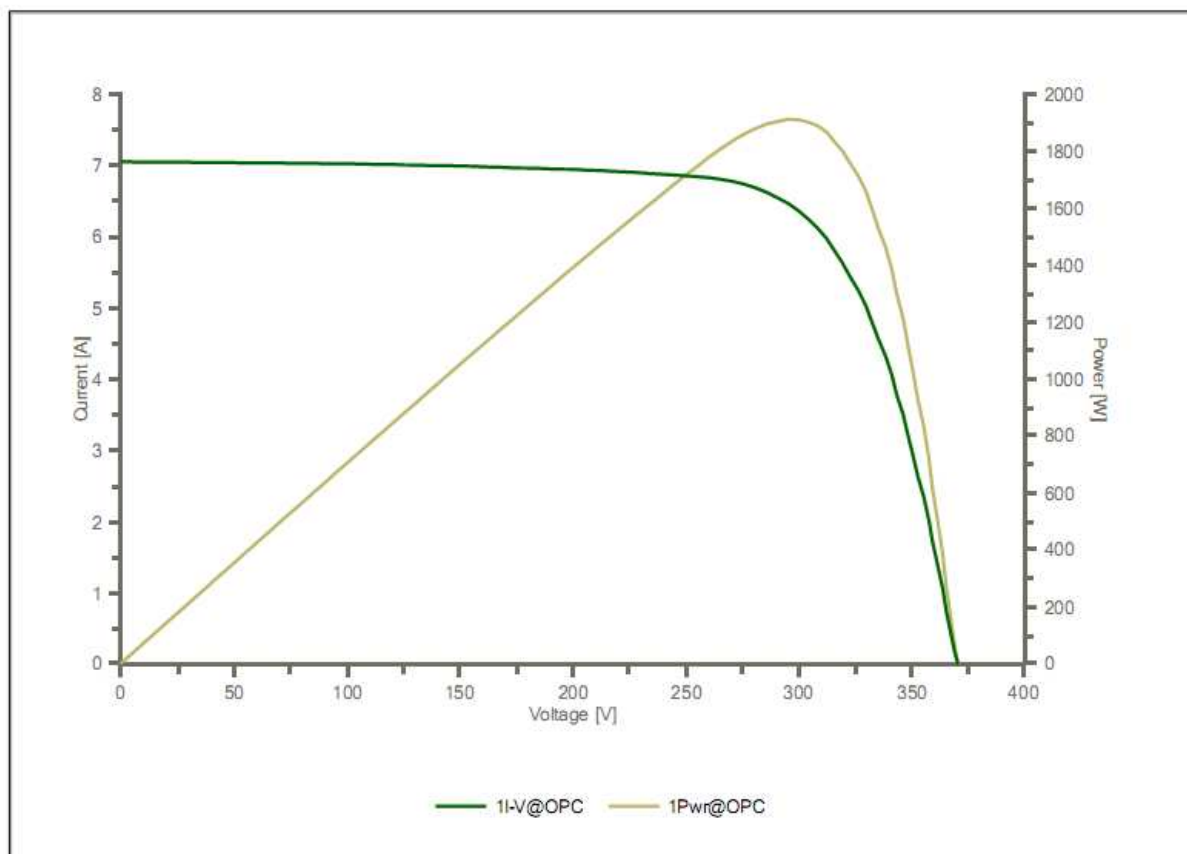
Příloha B – Tabulka výchozích naměřených hodnot – část. 1 (Tab. 6, 7)

	Nmod	Pmax	Voc	Vmpp	Impp	Isc Irradiance	Module Temp.	FF	Temp	alpha	beta	tol+	tol-
Meas. 12 - KYOCERA KD210 7.5.2013 14:29													
12	Measures@OPC	Not Ok (69,31%)	365,60	304,45	1,84	2,06	145	24,3	AUX	0,0581	-0,361	5	5
1	Meas Avg@OPC	46,72	30,47	25,37	1,84	2,06	145	24,3	AUX	0,0581	-0,361	5	5
1	12 STC	355,55	34,10	27,44	12,96	14,26	1000	25,0	AUX	0,0581	-0,361	5	5
1	12 Nominal	210,00	33,20	26,60	7,90	8,58	1000	25,0	AUX	0,0581	-0,361	5	5
Meas. 13 - KYOCERA KD210 7.5.2013 14:30													
12	Measures@OPC	Not Ok (66,59%)	364,60	302,81	1,77	1,99	141	24,1	AUX	0,0581	-0,361	5	5
1	Meas Avg@OPC	44,78	30,38	25,23	1,77	1,99	141	24,1	AUX	0,0581	-0,361	5	5
1	13 STC	349,85	34,05	27,82	12,58	14,08	1000	25,0	AUX	0,0581	-0,361	5	5
1	13 Nominal	210,00	33,20	26,60	7,90	8,58	1000	25,0	AUX	0,0581	-0,361	5	5
Meas. 14 - KYOCERA KD210 7.5.2013 14:30													
12	Measures@OPC	Not Ok (64,18%)	364,50	302,81	1,77	1,98	142	23,9	AUX	0,0581	-0,361	5	5
1	Meas Avg@OPC	44,55	30,38	25,23	1,77	1,98	142	23,9	AUX	0,0581	-0,361	5	5
1	14 STC	344,78	33,99	27,77	12,42	13,93	1000	25,0	AUX	0,0581	-0,361	5	5
1	14 Nominal	210,00	33,20	26,60	7,90	8,58	1000	25,0	AUX	0,0581	-0,361	5	5
Meas. 15 - KYOCERA KD210 7.5.2013 14:31													
12	Measures@OPC	Not Ok (57,53%)	364,00	301,72	1,71	1,92	143	23,1	AUX	0,0581	-0,361	5	5
1	Meas Avg@OPC	43,02	30,33	25,14	1,71	1,92	143	23,1	AUX	0,0581	-0,361	5	5
1	15 STC	330,82	33,83	27,60	11,99	13,41	1000	25,0	AUX	0,0581	-0,361	5	5
1	15 Nominal	210,00	33,20	26,60	7,90	8,58	1000	25,0	AUX	0,0581	-0,361	5	5
Meas. 16 - KYOCERA KD210 7.5.2013 14:32													
12	Measures@OPC	Not Ok (55,87%)	363,40	300,62	1,67	1,87	141	23,0	AUX	0,0581	-0,361	5	5
1	Meas Avg@OPC	41,87	30,28	25,05	1,67	1,87	141	23,0	AUX	0,0581	-0,361	5	5
1	16 STC	327,32	33,83	27,06	12,10	13,30	1000	25,0	AUX	0,0581	-0,361	5	5
1	16 Nominal	210,00	33,20	26,60	7,90	8,58	1000	25,0	AUX	0,0581	-0,361	5	5
Meas. 8 - KYOCERA KD210 7.5.2013 14:26													
12	Measures@OPC	Not Ok (47,93%)	352,10	295,16	1,48	1,72	130	24,8	AUX	0,0581	-0,361	5	5
1	Meas Avg@OPC	36,40	29,34	24,60	1,48	1,72	130	24,8	AUX	0,0581	-0,361	5	5
1	8 STC	310,64	33,12	27,38	11,34	13,19	1000	25,0	AUX	0,0581	-0,361	5	5
1	8 Nominal	210,00	33,20	26,60	7,90	8,58	1000	25,0	AUX	0,0581	-0,361	5	5
Meas. 9 - KYOCERA KD210 7.5.2013 14:27													
12	Measures@OPC	Not Ok (47,73%)	353,10	301,72	1,52	1,81	132	24,8	AUX	0,0581	-0,361	5	5
1	Meas Avg@OPC	38,28	29,43	25,14	1,52	1,81	132	24,8	AUX	0,0581	-0,361	5	5
1	9 STC	310,23	33,17	26,89	11,54	13,74	1000	25,0	AUX	0,0581	-0,361	5	5
1	9 Nominal	210,00	33,20	26,60	7,90	8,58	1000	25,0	AUX	0,0581	-0,361	5	5
Meas. 10 - KYOCERA KD210 7.5.2013 14:27													
12	Measures@OPC	Not Ok (56,05%)	488,84	354,30	1,64	1,93	137	24,6	AUX	0,0581	-0,361	5	5

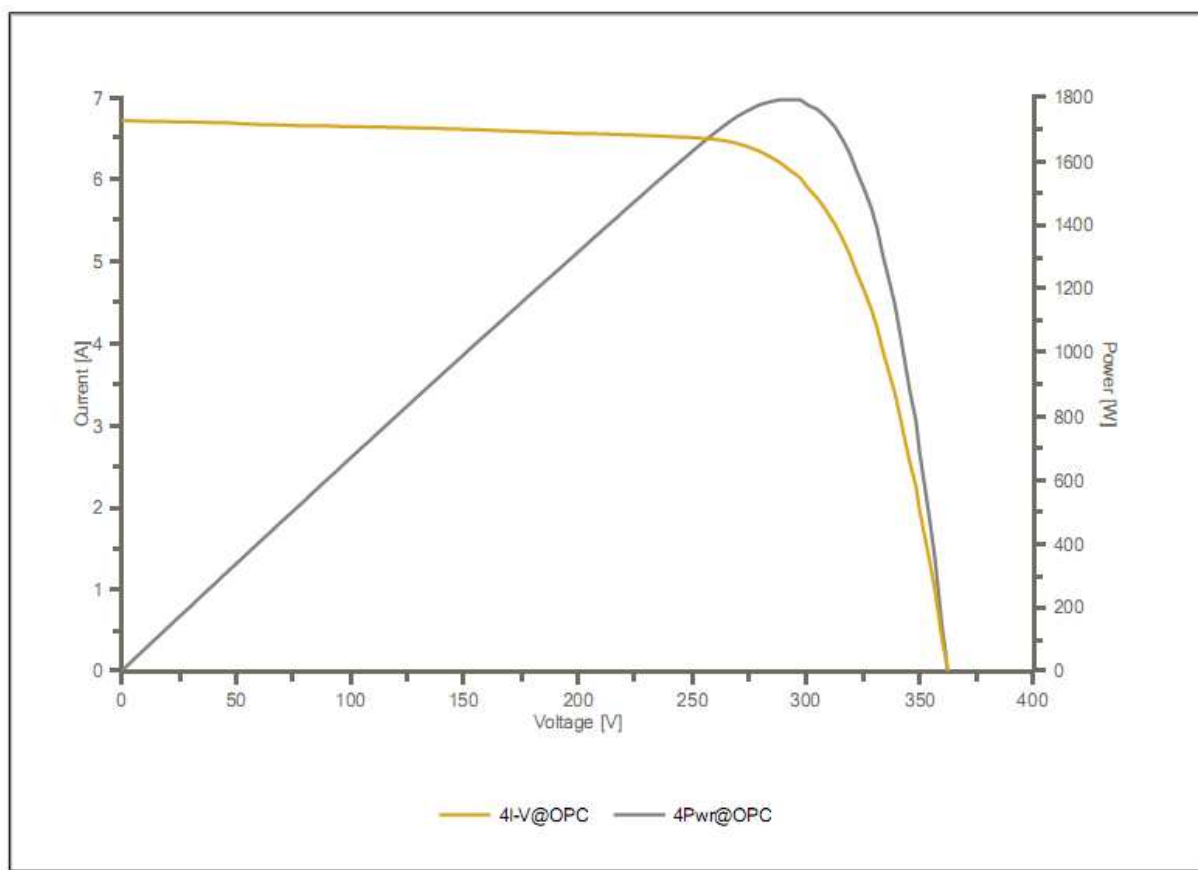
Příloha B – Tabulka výchozích naměřených hodnot – část. 2 (Tab. 6, 7)

	Nmod	Pmax	Voc	Vmpp	Impp	Isc Irradiance	Module Temp.	FF	Temp	alpha	beta	tol+	tol-
10 Meas Avg@OPC	1	40,74	29,53	24,82	1,64	1,93	137	24,6	AUX	0,0581	-0,361	5	5
10 STC	1	327,70	33,17	27,44	11,94	14,04	1000	25,0	AUX	0,0581	-0,361	5	5
10 Nominal	1	210,00	33,20	26,60	7,90	8,58	1000	25,0	AUX	0,0581	-0,361	5	5
Meas. 11 - KYOCERA KD210 7.5.2013 14:28													
11 Measures@OPC	12	514,31	354,70	300,08	1,71	2,02	143	24,6	AUX	0,0581	-0,361	5	5
11 Meas Avg@OPC	1	42,86	29,56	25,01	1,71	2,02	143	24,6	AUX	0,0581	-0,361	5	5
11 STC	1	330,00	33,17	27,55	11,98	14,13	1000	25,0	AUX	0,0581	-0,361	5	5
11 Nominal	1	210,00	33,20	26,60	7,90	8,58	1000	25,0	AUX	0,0581	-0,361	5	5

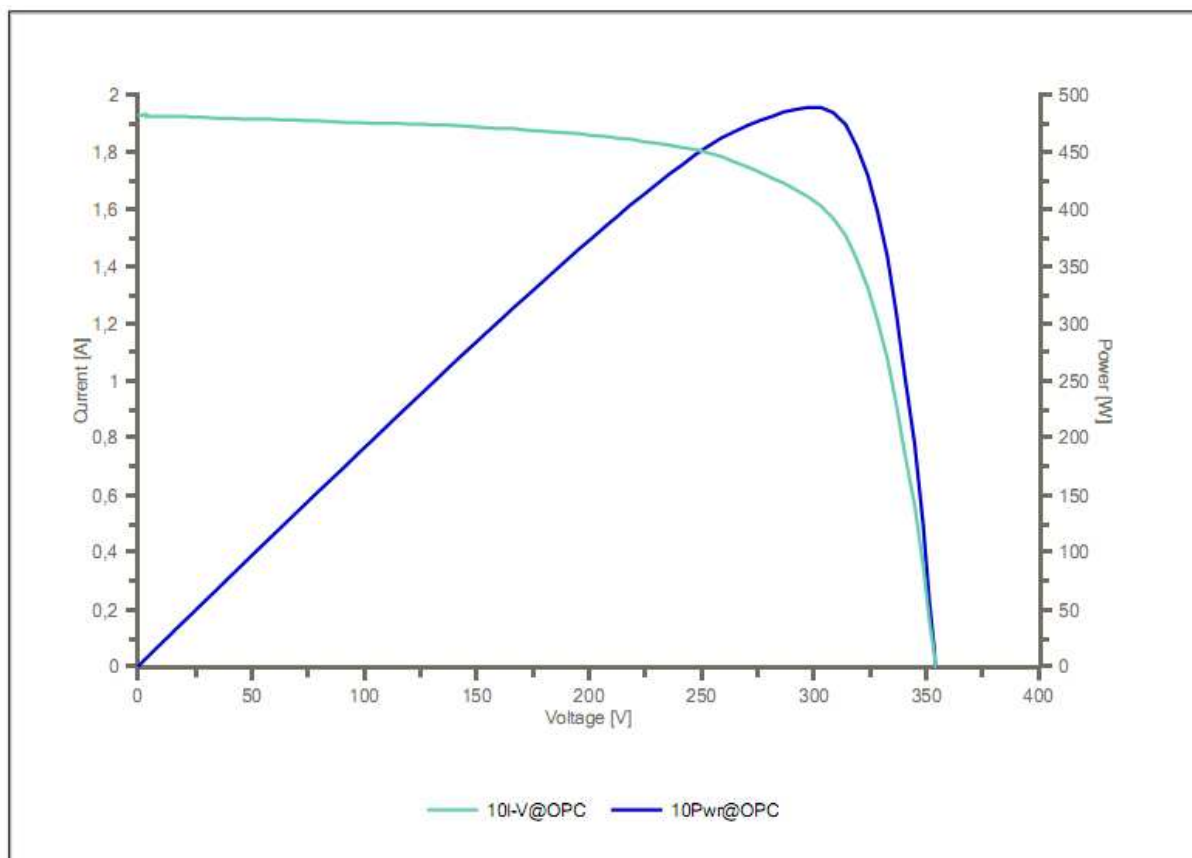
Příloha C – VA charakteristika měření č. 1



Příloha D – VA charakteristika měření č. 4



Příloha E – VA charakteristika měření č. 10



Příloha F – VA charakteristika měření č. 12

