

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Analýza VA charakteristik FVE**

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

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

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej NIKL**  
Osobní číslo: **E14N0052P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Technická ekologie**  
Název tématu: **Analýza VA charakteristik FVE**  
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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


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

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 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 2015**  
Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2016**

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



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

V Plzni dne 15. října 2015

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce je zaměřena na měření a následnou analýzu VA charakteristik solárního panelu. V teoretické části jsou popsány základní typy solárních článků a jejich vlastnosti. Dále jsou v práci uvedeny parametry solárních článků. Důraz je kladen především na vliv parametrů na průběh VA charakteristiky. Praktická část práce se zabývá návrhem metody měření a analýzy voltampérových charakteristik. Návrh je ověřen praktickým měřením zkoumaných solárních modulů, na kterých je simulováno poškození či znečištění. Závěr práce tvoří analýza naměřených výsledků a jejich vyhodnocení.

## **Klíčová slova**

Voltampérová charakteristika, analýza voltampérových charakteristik, fotovoltaický článek, fotovoltaický panel, parametry fotovoltaických článků, sluneční záření, bypass dioda, výkonová charakteristika, sluneční energie, zastínění fotovoltaického panelu

## **Abstract**

This diploma thesis is focused on measurement and consequential analysis of I-V characteristics of solar panel. In the theoretical part there are described elementary types of solar cells and its attributes. Furthermore in the thesis there are introduced parameters of solar cells. The attention is given to influence on parameters of I-V characteristics figures. The practical part deals with designing a method of measurement and analysis of current-voltage characteristics. The design is verified by practical measurement of examined solar modules on which is simulated a damage or pollution. The conclusion is formed by analysis of measured results and its evaluation.

## **Key words**

Current-voltage characteristic, analysis of current-voltage characteristics, photovoltaic cell, photovoltaic panel, parameters of photovoltaic cells, solar radiation, bypass diode, power characteristic, solar energy, shading of photovoltaic panel

## 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 11.5.2016

Ondřej Nikl

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Milanu Bělíkovi Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat Bc. Tomáši Bařkovi za pomoc při realizaci měření fotovoltaických panelů. V neposlední řadě děkuji své rodině a především přítelkyni za trpělivost a psychickou podporu při psaní této diplomové práce.

# Obsah

<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>9</b>
<b>1 ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>2 FOTOVOLTAICKÉ ČLÁNKY A PANELY</b> .....	<b>11</b>
2.1 PRINCIP FOTOVOLTAICKÉHO ČLÁNKU.....	11
2.2 NÁHRADNÍ SCHÉMA FOTOVOLTAICKÉHO ČLÁNKU.....	14
2.3 CHARAKTERISTIKY FOTOVOLTAICKÉHO ČLÁNKU.....	15
2.4 TYPY FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ.....	16
2.4.1 Monokrystalický článek.....	17
2.4.2 Polykrystalický článek.....	18
2.4.3 Amorfni článek.....	19
2.4.4 Mikromorfni článek.....	21
2.4.5 CIS (Copper-Indium-diSelenid) článek.....	21
2.4.6 CdTe (Cadmium Tellurid) článek.....	22
2.4.7 Srovnání jednotlivých typů fotovoltaických článků.....	22
2.5 FOTOVOLTAICKÉ PANELY.....	24
<b>3 VLASTNOSTI A PARAMETRY FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ</b> .....	<b>26</b>
3.1 ZÁKLADNÍ PARAMETRY FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ A JEJICH VLIV NA VA CHARAKTERISTIKU.....	26
3.1.1 Proud nakrátko - $I_{sc}$ [A].....	26
3.1.2 Napětí naprázdno - $U_{oc}$ [V].....	27
3.1.3 Proud při maximálním výkonu fotovoltaického článku - $I_m$ [A].....	27
3.1.4 Napětí při maximálním výkonu fotovoltaického článku - $U_m$ [V].....	28
3.1.5 Bod maximálního výkonu - MPP (Maximum Power Point).....	28
3.1.6 Pracovní bod - PB.....	29
3.1.7 Proud $I_{450}$ [A].....	29
3.1.8 Fill Factor - FF [-].....	29
3.1.9 Účinnost - $\eta$ [-].....	30
3.1.10 Sériový odpor - $R_{SO}$ [ $\Omega$ ].....	31
3.1.11 Paralelní odpor - $R_{SH}$ [ $\Omega$ ].....	32
3.2 DALŠÍ FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ PRŮBĚH VA CHARAKTERISTIKY.....	33
3.2.1 Teplota - $t$ [ $^{\circ}\text{C}$ ].....	33
3.2.2 Intenzita ozáření - $E$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ].....	34
3.2.3 Zastínění článků.....	36
<b>4 ANALÝZA VOLTAMPÉROVÝCH CHARAKTERISTIK</b> .....	<b>40</b>
4.1 MĚŘENÍ VOLTAMPÉROVÝCH CHARAKTERISTIK FOTOVOLTAICKÝCH PANELŮ.....	41
4.1.1 Měření voltmetrem a ampérmetrem.....	41
4.1.2 Měření solárním analyzátozem.....	42
4.1.3 Srovnání metod měření voltampérové charakteristiky.....	44
4.2 ANALÝZA NAMĚŘENÝCH HODNOT A GRAFŮ.....	46
4.2.1 Vliv teploty na průběh VA charakteristiky.....	47
4.2.2 Vliv intenzity ozáření na průběh VA charakteristiky.....	48
4.2.3 Vliv zastínění (poškození) článků na průběh VA charakteristiky.....	49
4.2.4 Vliv částečného zastínění (poškození) článků na průběh VA charakteristiky.....	52
4.2.5 Ověření funkce ochranné bypass diody ve fotovoltaickém panelu.....	58
4.2.6 Zhodnocení metody sledování FVE pomocí VA charakteristik.....	64
<b>5 ZÁVĚR</b> .....	<b>65</b>
<b>6 SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>66</b>
<b>7 PŘÍLOHY</b> .....	<b>1</b>



## Seznam symbolů a zkratk

FVČ	Fotovoltaický článek
FVP	Fotovoltaický panel
FVE	Fotovoltaická elektrárna
TCO	Transparent conductive oxide
EVA	Ethylene-vinyl acetate
STC	Standart test conditions
AM	Air mass
EPBT	Energy pay-back time
Mono-Si	Monokrystalický křemík
Poly-Si	Polykrystalický křemík
a-Si	Amorfní křemík
$\mu$ -Si	Mikrokrystalický křemík
MPP	Maximum power point
PB	Pracovní bod
NOCT [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Nominal operation cell temperature
FF [-]	Fill factor
$U_{oc}$ [V]	Napětí naprázdno
$I_{sc}$ [A]	Proud nakrátko
$U_m$ [V]	Napětí při maximálním výkonu
$I_m$ [A]	Proud při maximálním výkonu
$P_m$ [W]	Maximální výkon
$\mu$ [%]	Účinnost
$U_D$ [V]	Difuzní napětí
$I_{FV}$ [A]	Proud generovaný fotovoltaickým článkem
$R_{SO}$ [ $\Omega$ ]	Sériový odpor článku
$R_{SH}$ [ $\Omega$ ]	Paralelní odpor článku
$E$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]	Intenzita ozáření
$t$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Teplota
Z [-]	Součinitel znečištění atmosféry

# 1 Úvod

Pro zajištění bezporuchového provozu a optimalizace výkonu fotovoltaického systému je třeba provádět průběžné kontroly stavu solárních článků a modulů, jež jsou v tomto systému provozovány. K tomuto účelu lze využít několik metod diagnostiky solárních panelů. Mezi základní metody patří tzv. diagnostika pomocí elektroluminiscence (snímání světelné emise vyzářené solárním článkem), termovizní diagnostika, Flash test (měření VA charakteristiky v laboratoři na kalibrovaném testeru), test v klimatické komoře a v neposlední řadě také přímé (mobilní) měření voltampérových charakteristik. V této práci se zaměřuji právě na měření a analýzu VA charakteristik fotovoltaických panelů.

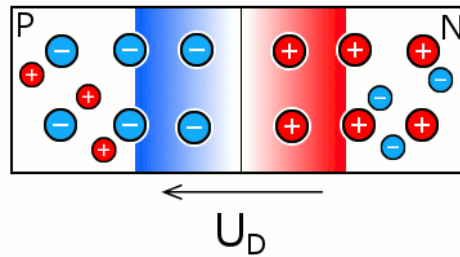
V první části práce je vysvětlen princip fotovoltaického článku, dále zde uvádím jednotlivé typy článků a jejich vlastnosti. V další části práce jsem se zaměřil na shrnutí a popis parametrů solárních článků a znázornění jejich vlivu na VA charakteristiku. Jsou zde také uvedeny další faktory ovlivňující průběh voltampérové charakteristiky. Poslední část práce je věnována praktickému měření na střeše budovy Fakulty elektrotechnické v Plzni. Cílem praktické části bylo navrhnout a následně měřením ověřit metodu sledování parametrů FVE pomocí VA charakteristik. První část praktické části byla věnována vlivu klimatických podmínek na parametry solárního panelu. Pro získání hodnot za zhoršených klimatických podmínek bylo tedy nutno provést několik měření již v zimních měsících. Další část měření byla soustředěna na ověření metody sledování parametrů FVE pomocí simulace poškození či znečištění solárního panelu a následné analýzy naměřených VA charakteristik. V závěru práce jsou výsledky těchto měření zhodnoceny.

## 2 Fotovoltaické články a panely

### 2.1 Princip fotovoltaického článku

V praxi realizujeme přeměnu slunečního záření na elektrickou energii pomocí fotovoltaického (neboli solárního či slunečního) článku, což je v podstatě velkoplošná polovodičová dioda, na jejíž PN přechod je umožněn dopad slunečních paprsků. Nejčastěji používaným materiálem pro výrobu fotovoltaických článků je křemík ( $Si$ ), který je druhým nejčastějším prvkem v zemské kůře (cca 27 %).

PN přechod je tvořen polovodičovou destičkou typu P. Nejčastěji se jedná o čtyřmocný (obsahuje čtyři valenční elektrony) křemík, do jehož krystalové mřížky jsou zabudovány atomy trojmocného prvku (např. bor ( $B$ )), jenž obsahují pouze tři valenční elektrony, pro zaplnění některých vazeb tedy chybí elektrony a v těchto místech vznikají prázdná místa tzv. díry, které se chovají jako částice s kladným nábojem. Pokud prázdné místo zaplní elektron z některé jiné vazby, díra se přestěhuje na jeho místo, a takto se může dále pohybovat. Atomy trojmocného prvku se tak stávají nepohyblivými záporně nabitými ionty a nazývají se tzv. akceptory (přijímají volné elektrony). Na polovodičové destičce typu P je vytvořen tenký film polovodiče typu N. Ten vznikne, nahradíme-li některé atomy krystalu křemíku atomy pětímocného prvku (např. fosfor ( $P$ )). Čtyři z pěti valenčních elektronů přiměsí se zúčastní vazeb s nejbližšími atomy křemíku, ale pátý elektron je již navíc a je vázán k atomu pětímocného prvku tak slabě, že při nízké (již při pokojové) teplotě dochází k jeho uvolnění a může se tak volně pohybovat krystalem. Takto uvolněné elektrony se nazývají volné a mají záporný náboj. Atomy přiměsí jsou tedy ionizovány a stávají se nepohyblivými kladně nabitými ionty, tyto pětímocné atomy se nazývají donory (dodávají volné elektrony). Na pomezí těchto dvou polovodičů (P a N) vzniká tzv. PN přechod, kde volné elektrony z polovodiče typu N, které se nacházejí poblíž, přejdou do polovodiče typu P a tam rekombinují s dírami (zaplní je). Tím se kolem přechodu vytvoří tzv. vyprázdněná (hradlová) oblast, v níž zůstanou nepohyblivé záporné ionty akceptorů a kladné ionty donorů, mezi kterými se generuje elektrické pole odpuzující další volné elektrony. Potenciálový rozdíl mezi opačně nabitými ionty se značí  $U_D$  a nazývá se difuzní napětí. [1] [3] [9]

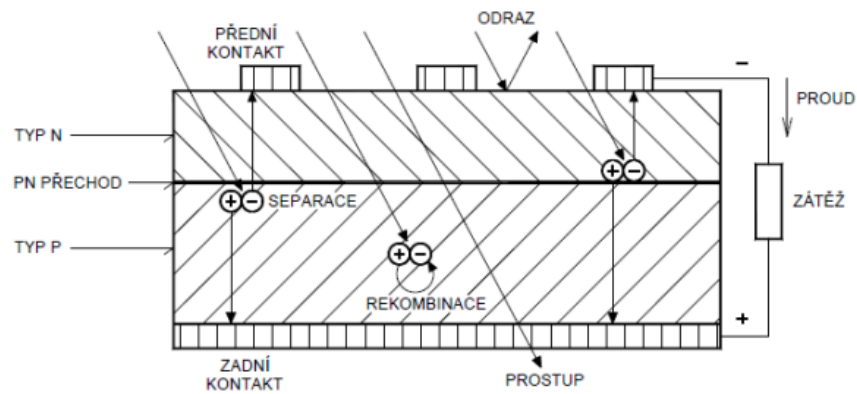


Obr. 1 Znárodnění PN přechodu [30]

Přeměna sluneční energie na elektrickou se uskutečňuje na základě takzvaného fotoelektrického jevu, dopadající fotony (částice elektromagnetického záření) na PN přechod odevzdávají svoji energii atomům v krystalu křemíku a uvolňují z ní elektrony, tím opět vznikají páry elektron-díra. Aby se tak stalo, fotony dopadající na PN přechod musejí mít energii  $1,1 \text{ eV}^1$  (šířka zakázaného pásu křemíku), čemuž odpovídá vlnová délka cca  $1105 \text{ nm}$  (infračervené záření). Přitom platí, že čím je vlnová délka záření delší, tím menší mají jeho fotony energii. Je-li energie fotonu menší než zmíněných  $1,1 \text{ eV}$  (např. mikrovlny), projde krystalem, aniž by došlo k jeho absorpci. Pokud je energie fotonu větší, a tedy vlnová délka kratší (např. viditelné světlo), vznikne po dopadu pár elektron-díra a foton je pohlcen, jeho přebytečná energie se přemění na teplo, což způsobuje ztráty. Elektron a díra jsou od sebe odtrženy díky elektrickému poli mezi nepohyblivými ionty. Volné elektrony jsou tak přitahovány kladně nabitými ionty a hromadí se v polovodiči typu N. To způsobí vznik napětí mezi opačnými póly fotovoltaického článku. Toto napětí může u křemíkových článků nabývat maximálních hodnot cca  $0,5\text{-}0,6 \text{ V}$  a ani další nárůst intenzity slunečního záření dopadající na článek již toto tzv. fotovoltaické napětí nemůže zvýšit. Jestliže mezi oba polovodiče připojíme nějaký spotřebič, vytvoříme tím uzavřený elektrický obvod. Nahromaděné elektrony z polovodiče typu N se tak mohou dostat skrze spotřebič ke druhému polovodiči a obvodem tedy začne procházet stejnosměrný elektrický proud. Jeho velikost závisí na intenzitě slunečního záření a na velikosti plochy článku (čím větší plocha, tím více fotonů dopadne na článek). [1] [3] [9]

---

<sup>1</sup>  $1 \text{ eV} = 1 \text{ eV}$  je energie, kterou získá částice s elementárním nábojem při průchodu potenciálovým rozdílem  $1 \text{ V}$

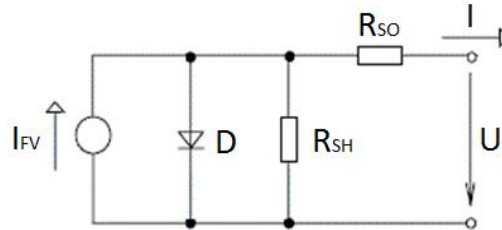


Obr. 2 Princip fotovoltaického článku [17]

Pro realizaci odběru proudu ze solárního článku jsou na jeho přední (na kterou dopadá sluneční záření) i zadní straně naneseny (nejčastěji sítotiskem) kontakty. Na zadní straně bývá tento kontakt vyhotoven po celé ploše článku. Ovšem na straně přední celoplošný být nemůže, protože by bránil přístupu slunečním paprskům. Z tohoto důvodu je kontakt proveden ve tvaru mřížky tak, aby zakrývala co nejmenší plochu. Pro zvýšení účinnosti je ještě po celé ploše přední strany (pod kontakty) článku aplikována tzv. antireflexní vrstva, jež slouží ke snížení odrazivosti povrchu proto, aby bylo možno využít co největší část dopadajícího záření a aby maximum fotonů mohlo proniknout až do oblasti PN přechodu. Vrstva také ochraňuje článek před mechanickým poškozením a je důvodem jeho barevného odstínu. [1] [3] [9]

## 2.2 Náhradní schéma fotovoltaického článku

Jak již bylo uvedeno, fotovoltaický článek je v podstatě polovodičová dioda, a proto je jej možno modelovat tímto zjednodušeným náhradním schématem.



Obr. 3 Náhradní schéma fotovoltaického článku

Při dopadu slunečního záření na PN přechod generuje článek proud  $I_{FV}$ , jehož malá část se díky polovodičovému charakteru článku vrací zpět přes diodu  $D$ . Technologické nedostatky samotného PN přechodu symbolizuje svodový paralelní odpor  $R_{SH}$ , ztráty v přívodech a kontaktech pak sériový odpor  $R_{SO}$ . Výstupní proud solárního článku je dán tímto vztahem:

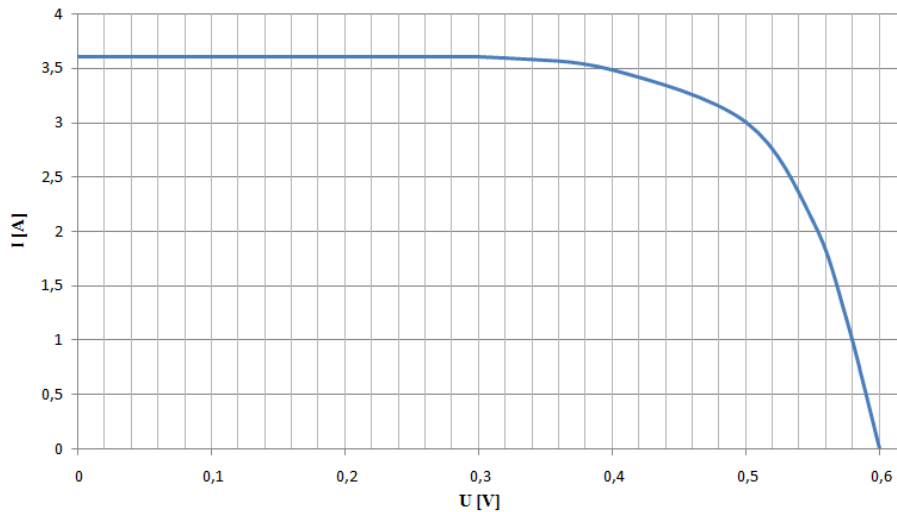
$$I = I_{FV} - I_s * \left[ \exp\left(\frac{q * (U + I * R_{SO})}{n * k * T}\right) - 1 \right] - \left(\frac{U + I * R_{SO}}{R_{SH}}\right) \quad (1)$$

kde	$I$	...	výstupní proud dodávaný solárním článkem [A]
	$I_{FV}$	...	proud generovaný článkem [A]
	$I_s$	...	proud článku v závěrném směru [A]
	$q$	...	náboj elektronu ( $1,602 * 10^{-19}$ ) [C]
	$n$	...	koeficient reprezentující materiál a technologii výroby článku [-]
	$k$	...	Boltzmannova konstanta (cca $1,38 * 10^{-23}$ ) [J/K]
	$T$	...	termodynamická teplota [K]
	$U$	...	napětí na svorkách článku [V]
	$R_{SO}$	...	sériový odpor článku [ $\Omega$ ]
	$R_{SH}$	...	paralelní odpor článku [ $\Omega$ ]

Z tohoto vztahu vyplývá, že pokud chceme dosáhnout co největší hodnoty výstupního proudu, musíme maximalizovat generovaný proud  $I_{FV}$ , minimalizovat sériový odpor článku a docílit co největší hodnoty svodového paralelního odporu. [2] [10] [11] [12]

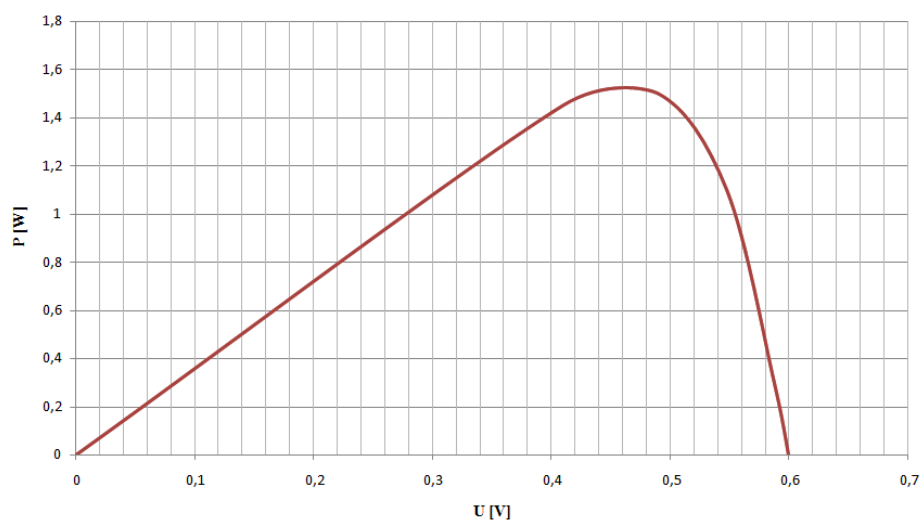
## 2.3 Charakteristiky fotovoltaického článku

Voltampérovou (VA) charakteristikou se popisují elektrické vlastnosti solárního článku. Jedná se o grafické znázornění závislosti proudu na napětí. Podle průběhu a změn VA charakteristiky lze posoudit správnou funkčnost článku či odhalit jeho případné vady.



Obr. 4 Voltampérová charakteristika fotovoltaického článku

Další hojně využívanou charakteristikou ve fotovoltaice je výkonová charakteristika, ta znázorňuje závislost výkonu článku na napětí.



Obr. 5 Výkonová charakteristika fotovoltaického článku

## 2.4 Typy fotovoltaických článků

Za dlouho dobu rozvoje fotovoltaických článků bylo vyvinuto nepřehledné množství jejich typů a koncepcí lišících se svou barvou, tvarem, vlastnostmi a výkonovými parametry. Pro lepší přehlednost se články rozdělují do jistých generací. Ovšem názory v tom, kolik generací rozlišovat, a jaké solární články do nich zařadit, se však u mnoha expertů a odborníků různí. V této diplomové práci jsem solární články rozčlenil do tří různých generací.

### První generace

V dnešní době jsou na světě nejrozšířenějším typem fotovoltaické články první generace. Jsou založeny na bázi krystalického křemíku a využívají velkoplošného PN přechodu. Jejich nevýhoda je náročnost výroby a také poměrně velká spotřeba velice čistého křemíku, což se negativně projevuje na ceně článku. Do této generace můžeme řadit monokrystalické a polykrystalické články. [14] [15]

### Druhá generace

Hlavním úkolem článků druhé generace je snaha o dosažení úspory vstupního materiálu s cílem zlevnit jejich výrobu. Tyto tzv. tenkovrstvé články, jejichž tloušťka se pohybuje v řádu mikrometrů, se však vyznačují menší účinností než články předchozí generace. Oproti tomu výhodou je jejich přizpůsobivost a ohebnost, což může být přínosné ve spoustě aplikací. Pro výrobu článků se v této generaci již využívá i jiných materiálů než křemíku. Jako zástupce používaných materiálů této generace lze označit amorfní křemík, mikromorfní křemík, měď-indium-diselenid (CIS) či kadmium-tellur (CdTe). [14] [15]



### Třetí generace

Fotovoltaické články této generace jsou povětšinou ještě ve fázi vývoje a výzkumu, jenž je zaměřen na překročení tzv. Shockley-Queisserovy hranice, která udává limit účinnosti fotovoltaických článků (pro články z krystalického křemíku s jedním PN přechodem je to cca 32 %). Pro překonání tohoto problému bylo navrženo několik variant solárních článků třetí generace:

- vícevrstvé solární články
- články s vícenásobnými pásy
- články využívající tzv. horké nosiče náboje pro generaci více párů elektronů a děr
- články pracující na základě kvantových jevů
- články, které využívají termofotonické či termofotovoltaické přeměny
- prostorově strukturované články
- organické články

#### **2.4.1 Monokrystalický článek**



*Obr. 6 Monokrystalický článek [26]*

Jedná se o nejstarší a zároveň nejrozšířenější typ solárních článků. Jak napovídá jejich název, jsou zhotoveny z jediného krystalu. Povrch článků se obvykle vyznačuje homogenním tmavomodrým až černým zbarvením. K výrobě monokrystalických článků se užívá tzv. Czokralského metoda, kdy se nejprve velice čistý (až 99,99998 %) křemík roztaví při teplotě až 1500 °C na taveninu, do které je vložen zárodek krystalu, jenž je za pomalého otáčení z taveniny vytahován. Tento proces je poměrně energeticky náročný. Vzniká kulatý monokrystalický „ingot“ o průměru cca 30 cm a délce až několik metrů. Nevýhoda je právě v kulatém tvaru „ingotu“, při jeho úpravě na požadovaný tvar článku (většinou čtvercový

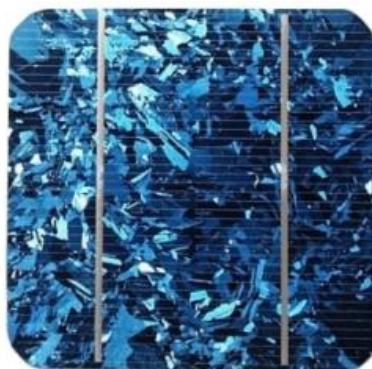
se zkosenými hranami) a jeho řezání na jednotlivé destičky dochází k velkým ztrátám materiálu. Po nařezání destiček na tloušťku 0,3 mm (v dnešní době se již začaly vyrábět i destičky tenké 0,1 mm) se jejich povrch leští, aby se odstranily drsnosti a nečistoty vzniklé při řezání.



Obr. 7 „Ingot“ monokrystalického křemíku [26]

Dalším krokem je leptání, kdy se vytvoří na povrchu destičky drobné křemíkové pyramidy, díky kterým je dopadající sluneční záření lépe pohlcováno. Po procesu výroby je již destička dotována příměsí typu P. Pro vznik PN přechodu je třeba vytvořit difuzí fosforu tenkou vrstvu polovodiče s příměsí typu N. Pro kompletizaci solárního článku už jen tedy zbývá aplikovat antireflexní vrstvu a umístit na obě strany článku kontakty. Tyto články dosahují laboratorní účinnosti okolo 24 %, v praxi však jen 14-17 %. [5] [20]

## 2.4.2 Polykrystalický článek



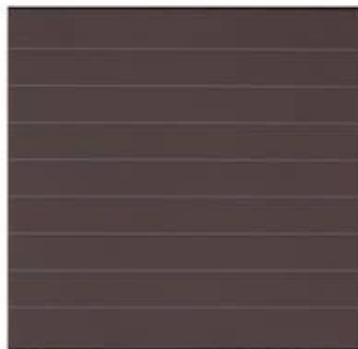
Obr. 8 Polykrystalický článek [26]

Od monokrystalických článků jsou snadno na pohled rozeznatelné díky různorodě se lesknoucím krystalickým strukturám. Jejich účinnost je také nižší a pohybuje mezi 13 – 15 % (v laboratorních podmínkách až 18 %), jelikož v místech kontaktů jednotlivých krystalů je větší odpor. Velká výhoda je, že výroba polykrystalického křemíku je levnější a méně náročná než u křemíku monokrystalického. Nejčastěji se využívá metody tzv. blokového lití.

Ta spočívá v rozehrání křemíku na teplotu 1500 °C a jeho následného odlití do formy, kde je ochlazován až do blízkosti bodu tání. Takto vyrobené polykrystalické křemíkové bloky mají obdélníkový či čtvercový tvar nejčastěji o rozměrech 40 x 40 x 30 cm, které jsou nejdříve rozřezány na tyče a ty pak již na tenké destičky, zbývá tak daleko méně odpadního materiálu. Další kroky ve výrobním postupu až do fáze finálního produktu jsou shodné jako u monokrystalických článků.

Ve snaze po ještě větší úspoře materiálu a snížení nákladů byly vyvinuty další technologie výroby polykrystalických článků. Jedná se o různé metody tažení křemíku, kdy se z křemíkové taveniny vytahují pásy již o tloušťce cca 0,1 mm (sníží se tedy obvyklé materiálové ztráty vznikající řezáním na požadovanou tloušťku), které tedy stačí už jen nařezat (většinou pomocí laseru) na určitou velikost destičky. Takto vyrobené články mají účinnost cca 14,5 %. [5] [20]

### 2.4.3 Amorfni článek



Obr. 9 Amorfni článek [32]

Jedná se o tenkovrstvý článek z amorfního křemíku (a-Si). Ten nemá pravidelnou krystalickou strukturu, ale je tvořen neuspořádanou sítí. Výroba amorfního křemíku se provádí ve vodíkové atmosféře, kde při teplotách okolo 200 °C (na rozdíl od monokrystalického a polykrystalického článku) dochází k jeho chemickému odlučování z plynného silanu ( $SiH_4$ ). Následně se tenká vrstva (několik  $\mu m$ ) křemíku nanáší na nosný materiál, to může být např. sklo, umělá hmota či kovová fólie. Z čehož plynou dvě výhody, za prvé je to další ušetření materiálu (je nanášena vrstva pouze o několika  $\mu m$ ) a také velká variabilita nosného materiálu, díky které mohou mít amorfni články možnost široké škály využití. Kvůli velmi tenké vrstvě amorfního křemíku by při dopadu slunečního záření vzniklé

páry volných elektronů a děr opět okamžitě rekombinovali (elektrony by opět zaplnily díry), to je vyřešeno tím, že mezi vrstvou s příměsí typu P a N je vložena intrinsická vrstva (bez příměsí), ve které se dopadající záření absorbuje a generuje páry děr a volných elektronů. Vrstvy typu P a N pak vytvářejí elektrické pole, jež elektrony s dírami od sebe odděluje. Čímž vzniká struktura PIN. Přední kontakty těchto článků představuje průhledná tzv. TCO (Transparent Conductive Oxide) vrstva vysoce vodivého oxidu kovu (nejčastěji oxid zinečnatý, oxid cínčitý či oxid indium-cínčitý).

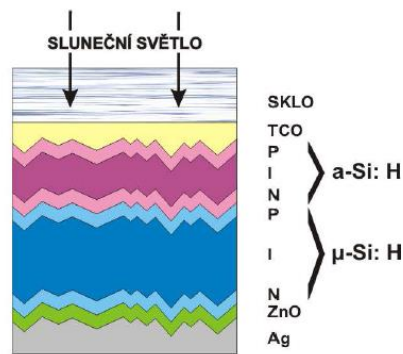


Obr. 10 Struktura amorfního článku [31]

Nevýhodou těchto článků je počáteční snižování výkonu vyvolané nepříznivým působením světla tzv. Steablerův-Wronského jev, které se ale po pár měsících zastaví na stabilní hodnotě. Účinnost amorfních článků je poměrně malá v laboratořích dosahuje hodnoty cca 13 %, běžně však jen 5-7 %. Cesta ke zvýšení účinnosti vede přes vývoj vícevrstevných článků, kde jsou nad sebou umístěny dvě či více struktur PIN. [5] [20]

## 2.4.4 Mikromorfní článek

Tyto články v sobě ukrývají kombinaci amorfního a mikrokrytalického křemíku ( $\mu$ -Si), jde tedy o tzv. tandemové články. První krok výroby je stejně jako u amorfních článků chemické odloučení amorfního křemíku ze silanu, jehož vrstva (cca 0,3  $\mu$ m) se nanese na nosný materiál. Dalším krokem je přeměna části amorfního křemíku na mikrokrytalickou strukturu o tloušťce cca 0,25  $\mu$ m, toho je docíleno změnou odlučovacích parametrů (teplota, tlak a frekvence). Při tomto procesu dochází k vytvoření pyramidových struktur na povrchu těchto vrstev, které mají lepší elektrické a optické vlastnosti než struktury hladké. Díky těmto dvěma vrstvám může tedy mikromorfní článek využívat širší spektrum slunečního záření a dosahuje tak vyšší účinnosti (kolem 8-10 %) než samotný amorfní článek, další jeho výhodou oproti tomuto článku je daleko menší počáteční degradace. [5] [20]



Obr. 11 Struktura mikromorfního článku [5]

## 2.4.5 CIS (Copper-Indium-diSelenid) článek

Na rozdíl od předchozích článků nejsou vyrobeny na bázi křemíku. Na nosný materiál (např. sklo) se ve vakuové komoře při teplotách okolo 500 °C nanese tenká kontaktní vrstva molybdenu (*Mo*), na níž je usazena vrstva polovodičového materiálu CIS složená z mědi (*Cu*), india (*In*) a selenu (*Se*), která slouží jako absorpční. Ta zastupuje vodivost typu P. Vodivost typu N představuje další vrstva sulfidu kadmnatého (*CdS*). Výhodou těchto článků je, že oproti amorfním článkům nedochází k degradaci vyvolané světlem. Ovšem je třeba brát důraz na dobré zapouzdření článků, jelikož jsou méně stabilní v prostředí s velkou vlhkostí a teplotou. Povrch těchto článků je nejčastěji zbarven tmavošedě až černě a jejich účinnost je cca 11-12 %. [5] [20] [24]

## 2.4.6 CdTe (Cadmium Tellurid) článěk

Podobně jako články CIS, také tyto CdTe články se vyrábí vakuovou metodou při teplotě asi 700 °C, kdy se na nosný materiál nanáší vrstvy teluridu kademnatého (*CdTe*) a sulfidu kademnatého (*CdS*). Články CdTe dosahují účinnosti okolo 10-11 %. Jejich výhodou je nízká citlivost na zastínění a odolnost vůči vysokým teplotám, negativem ovšem je poměrně velký obsah nebezpečného kadmia (*Cd*) v článcích, a proto s nimi musí být po ukončení životnosti zacházeno jako s nebezpečným odpadem. Obvykle jsou zbarveny tmavozeleně až černě. [5] [20]

## 2.4.7 Srovnání jednotlivých typů fotovoltaických článků

Fotovoltaické články bychom mohli porovnávat podle mnoha hledisek a kritérií, z nichž asi nejběžnější je srovnávání článků na základě jejich účinnosti. Tedy poměru výstupního elektrického výkonu solárního článku a vstupní energie slunečního záření. Abychom mohli různé typy článků mezi sebou účelně porovnávat, byly zavedeny tzv. standardní testovací podmínky (STC - Standart Test Conditions), za kterých se parametry (např. účinnost) solárních článků uvádějí. Tyto podmínky jsou definovány intenzitou záření 1000 W·m<sup>-2</sup>, teplotou článků 25 °C a AM<sup>II</sup> 1,5. S účinností fotovoltaických článků souvisí jejich potřebná plocha pro generování výkonu 1 kWp<sup>III</sup>. Zajímavý je i pohled z hlediska výtěžnosti. Ta nám udává, kolik elektrické energie udávané ve Wh vyrobí fotovoltaická elektrárna s instalovaným výkonem 1 kWp za rok při konkrétním sklonu panelů a klimatických podmínkách (v tomto případě 35° a natočení k jihu). Jak je vidět v uvedené tabulce, jako referenční byla vybrána technologie polykrystalického křemíku (je tedy brána jako 100 %), vůči které je provedeno srovnání ostatních solárních článků. Je ale třeba si uvědomit to, že v případě odlišných podmínek, při kterých jsou panely posuzovány (sklon panelů či klimatické podmínky), se mohou s ohledem na výtěžnost projevit jako výhodnější jiné typy panelů. V neposlední řadě je také důležitá cena výrobní technologie článku, tu reprezentuje poměr ceny uváděné v eurech za vyrobený watt-peak elektrického výkonu. Všechna tyto kritéria byla shrnuta v přiložené tabulce. [5] [23]

---

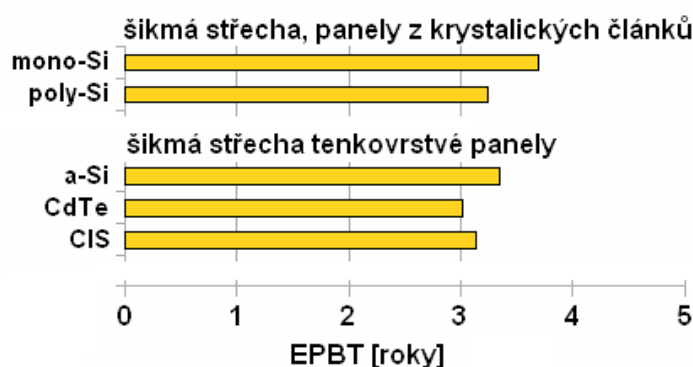
<sup>II</sup>AM = Air Mass, nebo-li vzduchová hmota. Koeficient AM je roven jedné, pokud je Slunce situováno kolmo k povrchu Země a sluneční záření tedy putuje skrz atmosféru nejkratší možnou drahou. Není-li Slunce přímo nad obzorem, dráha se prodlužuje a koeficient AM je větší než 1.

<sup>III</sup> kWp = (kilowatt-peak) jednotka špičkového výkonu solárního článku za standardních testovacích podmínek (STC).

Tab. 1 Srovnání jednotlivých typů fotovoltaických článků

Technologie výroby článků	Monokrystalické	Polykrystalické	Amorfní	Mikromorfní	CIS	CdTe
Účinnost [%]	14-17	13-15	5-7	8-10	11-12	10-11
Potřebná plocha pro 1kWp [m <sup>2</sup> ]	7-8	8-9	15-20	12-14	10-11	11-12
Výtěžnost článku [%]	101	100	105	108	108	113
Cena za vyrobený Wp [€/Wp]	1,50-1,90	1,35-1,70	0,85-1,10	1,10-1,35	1,25-1,40	1,25-1,40

Další metodou pro dobré porovnání různých technologií fotovoltaických článků může být metoda EPBT (Energy Pay-Back Time), neboli energetická návratnost. Definuje nám čas, za který se nám (díky generaci elektrické energie fotovoltaickým panelem) navrátí energie vložená do výroby a provozu panelu. Ta zahrnuje energii nezbytnou k výrobě článku a panelu, k jeho instalaci, provozu a také energii nutnou ke konečné likvidaci panelu. [25]



Obr. 12 Energetická návratnost fotovoltaických systémů [25]

Existuje tedy spousta možností, jak lze fotovoltaické články a panely srovnávat, ovšem nelze jednoznačně říci, že jedna určitá technologie solárních článků ční nad všemi ostatními. Volba typu panelu závisí na mnoha aspektech (jako jsou meteorologické podmínky oblasti, samotný účel instalace panelů, finanční a prostorové možnosti a mnohé další) a na konkrétní aplikaci.

## 2.5 Fotovoltaické panely

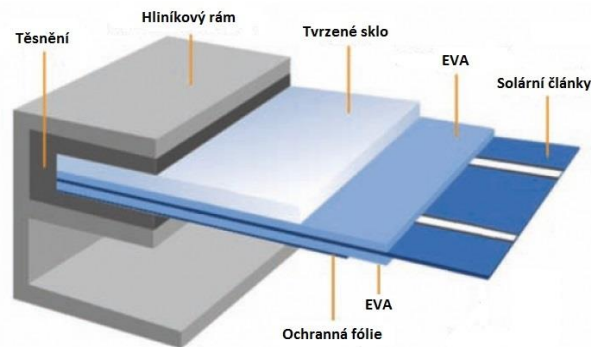
Jelikož běžné fotovoltaické články z krystalického křemíku dosahují pouze malých hodnot napětí a výkonu (obvykle 0,5-0,6 V a 1,5-3W), jsou samy o sobě pro většinu aplikací nepoužitelné. Pro dosažení potřebného napětí a proudu se několik článků spojuje do tzv. solárních panelů (modulů).



Obr. 13 Fotovoltaický panel [28]

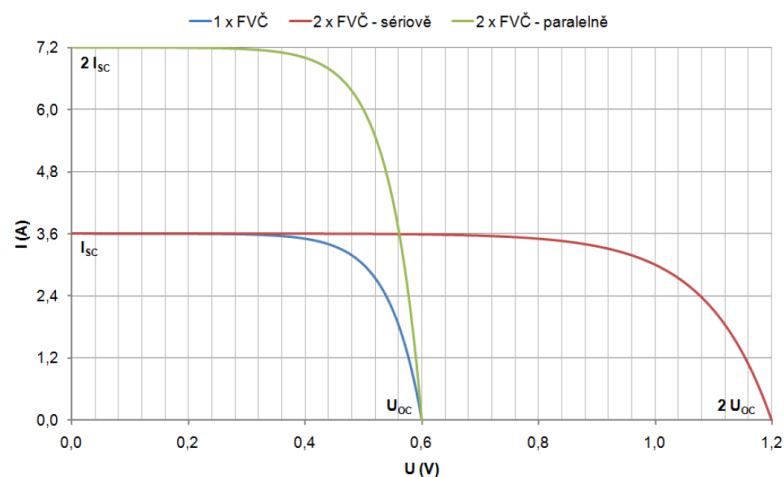
Dnes nejběžnější solární panely jsou tvořeny 36, 48, 54, 60 či 72 články, které jsou nejčastěji zapojeny sériově. Toho se docílí tím, že se vždy přední kontakty (záporný pól) jednoho článku připájejí na zadní kontakty (kladný pól) dalšího článku. Pospojované články jsou obvykle seřazeny do několika řad vedle sebe, čímž se dosáhne standardního obdélníkového tvaru panelu. Takto uspořádané články se ze zadní i přední strany zapustí do speciálního materiálu vysoce průhledného nazývaného EVA (Ethylene-Vinyl Acetate), jenž chrání velmi křehké články proti vlhkosti a mechanickému namáhání. Pro docílení co nejdelší životnosti je třeba články chránit před negativními vlivy okolního prostředí (např. prach, sníh, déšť, krupobití), proto je navíc na přední stranu panelu umístěno tvrzené sklo, které musí vykazovat vysokou propustnost a zároveň nízkou odrazivost dopadajících slunečních paprsků. Druhá strana panelu je uzavřena ochrannou vysoce pevnou fólií (např. tedlar) nebo skleněnou destičkou. Pro lepší manipulaci a montáž se většinou solární panel po celém svém obvodu vybavuje hliníkovým rámem. Na zadní straně modulu je dále instalována připojovací krabice z odolného plastu, která obsahuje připojovací svorky a obtokové (bypass) diody sloužící k ochraně jednotlivých článků. V dnešní době je již většina modulů vybavena připojovacími vodiči se speciálními konektory zaručující jednoduché, uživatelsky bezpečné a funkční propojení (není nutné otevírat připojovací krabici panelu). U takovýchto panelů se udávaná životnost pohybuje v rozmezí 20-30 let. [2] [4]





Obr. 14 Konstrukce fotovoltaického panelu [29]

Běžně dostupné monokrystalické panely dosahují výkonů od jednotek wattů až 300 W. Větších výkonů můžeme dosáhnout propojením několika solárních panelů, tím vznikne tzv. fotovoltaické pole též nazývané solární generátor. Jednou z možností jak propojovat moduly je sériové zapojení. Několik takto propojených panelů se nazývá řetězec nebo také string. Tímto zapojením docílíme zvýšení napětí systému (celkové napětí je dáno součtem napětí jednotlivých modulů), celkový proud však dosahuje pouze hodnoty výstupního proudu jednoho panelu v systému. Toto zapojení se používá převážně u systémů dodávající elektrickou energii do rozvodné sítě, kde se běžně napětí pohybuje až do hodnot několika set voltů. Druhou možností propojení panelů je jejich paralelní zapojení, toho se využívá zejména u menších izolovaných systémů. Celkový proud takto zapojeného systému je dán součtem dílčích proudů z jednotlivých panelů a celkové napětí je rovno napětí jednoho modulu v zapojení. Další možností je tzv. sérioparalelní zapojení, což je kombinace obou předchozích zapojení. Je třeba dbát na to, aby všechny panely v systému byly pokud možno stejného typu a od jednoho výrobce, jinak by mohlo dojít k přetěžování některého z modulů a tím i k jeho destrukci. Principy spojování solárních panelů platí analogicky i u solárních článků. [2] [4]



Obr. 15 VA charakteristiky dvou sériově a paralelně zapojených solárních panelů (článků) [10]

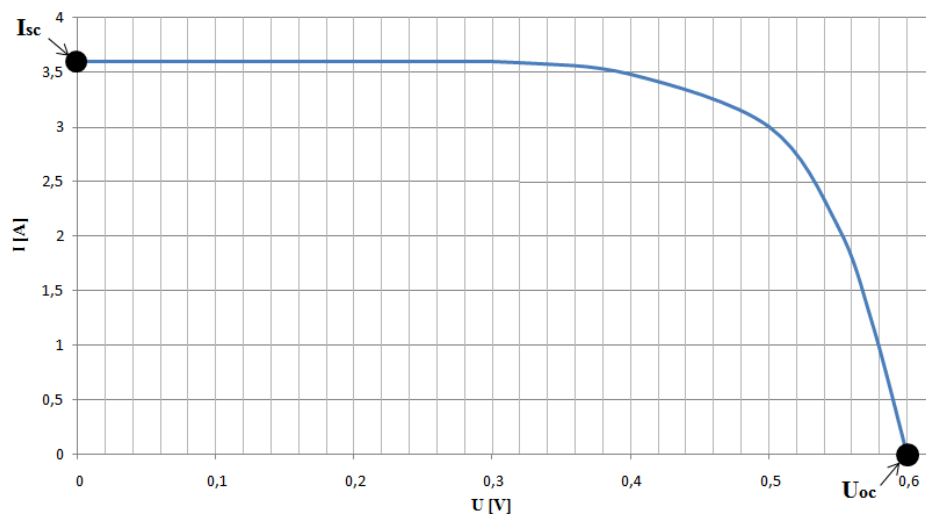
### 3 Vlastnosti a parametry fotovoltaických článků

#### 3.1 Základní parametry fotovoltaických článků a jejich vliv na VA charakteristiku

Znalost parametrů fotovoltaických článků využíváme k posouzení kvality daného článku (či k odhalení případných defektů) a při návrhu fotovoltaického systému. Většina základních parametrů je udávána v katalogových listech výrobců nebo je lze snadno odečíst z VA charakteristiky. Jiné je však třeba dopočítat. Na průběh voltampérové charakteristiky mají některé parametry poměrně výrazný vliv. Pro možnost lepšího srovnání jednotlivých článků či panelů udávají výrobci hodnoty těchto parametrů za STC (intenzita záření  $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , teplota článků  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , AM 1,5).

##### 3.1.1 Proud nakrátko - $I_{sc}$ [A]

Proud nakrátko či také zkratový proud je běžně uváděn v katalogových listech, či ho lze snadno odečíst z voltampérové charakteristiky. Značí se  $I_{sc}$  a jedná se o maximální možný proud, který je schopen solární článek při určitém osvětlení a nulovém napětí dodávat. Pokud by byl sériový odpor článku  $R_{SO}$  nulový, zkratový proud  $I_{sc}$  by byl roven proudu generovaným solárním článkem  $I_{FV}$ . U článků se hodnota proudu nakrátko řádově pohybuje od desítek mA až po jednotky A a je ovlivňována intenzitou záření, spektrální citlivostí článku, teplotou a velikostí plochy článku. Tvar VA charakteristiky jako takové proud nakrátko téměř neovlivňuje, udává pouze počáteční bod křivky na proudové ose. [10] [11]



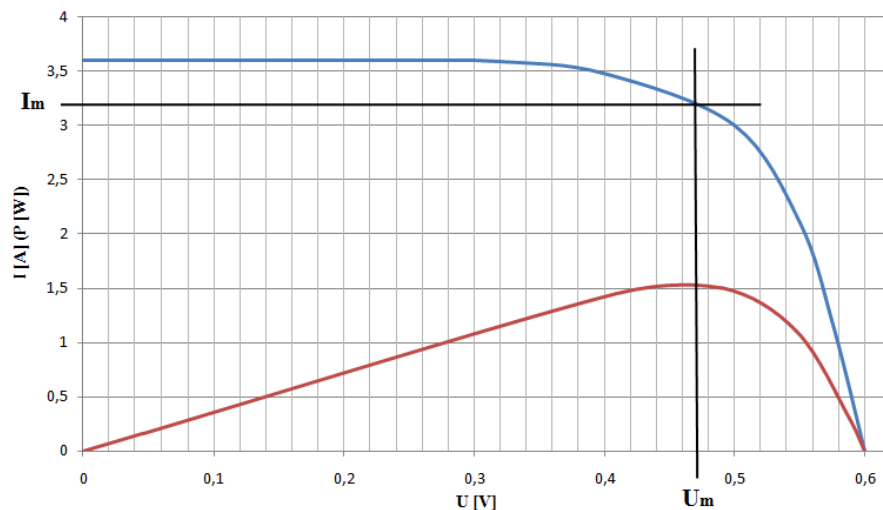
Obr. 16 Znáznornění parametrů  $U_{oc}$  a  $I_{sc}$  na voltampérové charakteristice

### 3.1.2 Napětí naprázdno - $U_{oc}$ [V]

Jedná se o maximální napětí fotovoltaického článku při dané teplotě a intenzitě záření, lze jej naměřit na svorkách solárního článku, pokud jsou rozpojeny a není na něj připojena žádná zátěž. V takovémto případě neprochází článkem žádný elektrický proud. Z toho vyplývá, že při napětí naprázdno, ani při proudu nakrátko článek negeneruje žádný elektrický výkon. Podobně jako u proudu nakrátko lze i hodnotu napětí naprázdno lehce najít na VA charakteristice, kde označuje jen výchozí bod na napěťové ose. V případě monokrystalických článků se hodnota  $U_{oc}$  pohybuje kolem 0,6 V. [10] [11]

### 3.1.3 Proud při maximálním výkonu fotovoltaického článku – $I_m$ [A]

Je to proud, při kterém solární článek dodává svůj maximální výkon. Hodnota tohoto proudu je udávána v katalogových listech a je vždy menší než hodnota zkratového proudu  $I_{sc}$ . S pomocí hodnoty  $I_m$  lze matematicky dopočítat maximální elektrický výkon článku. Profil VA charakteristiky velikost proudu  $I_m$  nijak nemění, naopak důsledkem změn jiných parametrů ovlivňujících VA charakteristiku může růst či klesat hodnota proudu  $I_m$ . [10] [11] [18]



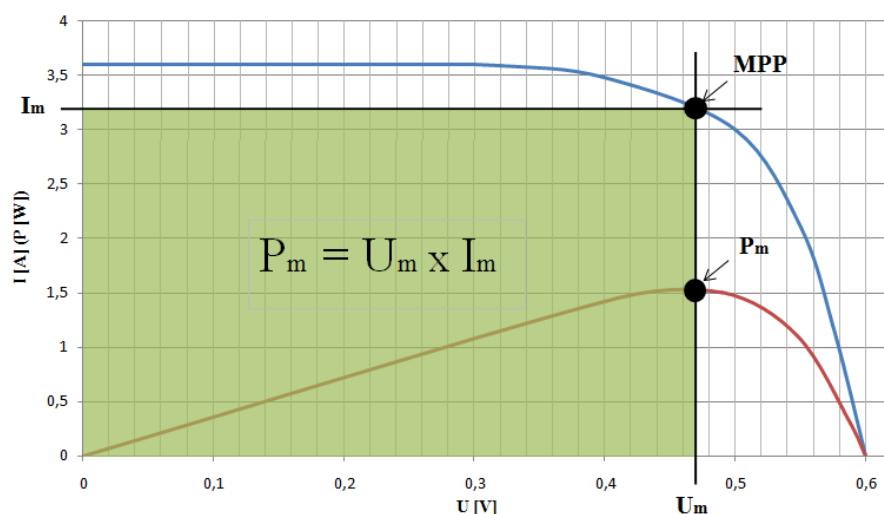
Obr. 17 Znárodnění parametrů  $U_m$  a  $I_m$  na voltampérové charakteristice

### 3.1.4 Napětí při maximálním výkonu fotovoltaického článku - $U_m$ [V]

Toto napětí je druhým parametrem potřebným k matematickému výpočtu maximálního výkonu solárního článku. Obdobně jako proud při maximálním výkonu můžeme najít v katalogovém listu také hodnotu  $U_m$ , ta bude také nižší v porovnání s hodnotou napětí naprázdno  $U_{oc}$ . Stejně jako v případě  $I_m$  ani hodnota  $U_m$  na tvar VA charakteristiky nemá vliv. [10] [11] [18]

### 3.1.5 Bod maximálního výkonu - MPP (Maximum Power Point)

Na průsečíku souřadnic napětí  $U_m$  a proudu  $I_m$  (přibližně ve středu ohybu křivky) se na voltampérové charakteristice nachází tzv. bod maximálního výkonu MPP tedy bod, ve kterém solární článek vykazuje maximální elektrický výkon. Ten se značí  $P_m$  (také  $P_{MPP}$  či  $P_{max}$ ) a lze jej spočítat jako  $P_m = U_m * I_m$ . Lze jej obvykle také dohledat v katalogovém listu či typovém štítku solárního panelu. Výkon  $P_m$  můžeme také znázornit jako co největší možnou obdélníkovou plochu pod křivkou VA charakteristiky, přičemž pravý horní roh obdélníku tvoří právě bod MPP. Běžné monokrystalické články o velikosti 10 x 10 cm vykazují maximální výkon přibližně 1,5 až 3 W. Výkon solárního článku závisí na jeho teplotě, intenzitě záření a spektru světla. Přímý vliv na průběh voltampérové charakteristiky výkon  $P_m$  nemá, ovšem sám je některými jinými parametry ovlivňován. [10] [11] [13] [18]



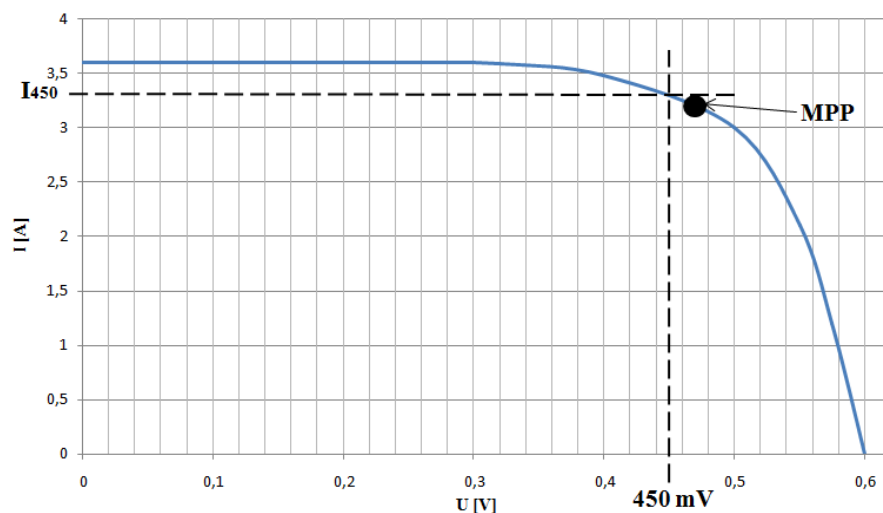
Obr. 18 Znáornění parametrů MPP a  $P_m$  na voltampérové a výkonové charakteristice

### 3.1.6 Pracovní bod - PB

Bod na křivce VA charakteristiky, v němž fotovoltaický článek momentálně pracuje, je nazýván pracovním bodem článku. Z logiky věci je obecná snaha o to, aby poloha tohoto bodu byla shodná s polohou MPP a článek tak generoval svůj maximální možný výkon. Poloha pracovního bodu je závislá na vlastnostech připojené zátěže (spotřebiče). [10] [11]

### 3.1.7 Proud $I_{450}$ [A]

Pro lepší určení polohy bodu MPP na voltampérové charakteristice byl zaveden tzv. proud  $I_{450}$ . Ten udává hodnotu proudu protékajícího solárním článkem při napětí 450 mV. Na průsečíku souřadnic proudu  $I_{450}$  a napětí 450 mV získáme na VA charakteristice bod velmi blízký bodu MPP. [10] [11] [18]



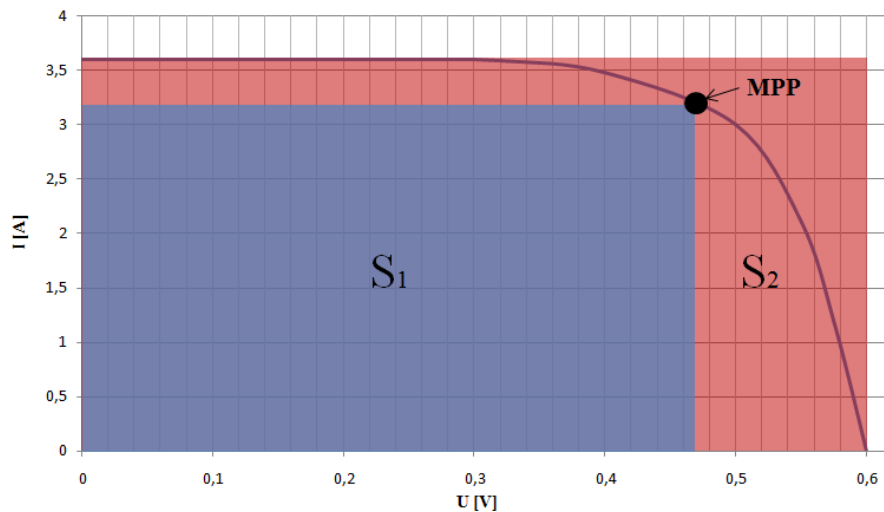
Obr. 19 Znáznornění parametru  $I_{450}$  na voltampérové charakteristice

### 3.1.8 Fill Factor - FF [-]

Fill Factor neboli činitel plnění je poměr mezi maximálním elektrickým výkonem článku v bodě MPP a jeho výkonem daným napětím naprázdno a proudem nakrátko. Tyto výkony lze také v grafu VA charakteristiky vyjádřit obdélníkovými plochami, v grafu (Obr. 20) jsou tyto plochy označeny jako  $S_1$  a  $S_2$ . Dle tohoto parametru, který je závislý na kvalitě kontaktů, materiálu a odporu aktivní polovodivé vrstvy, lze posuzovat celkovou kvalitu solárního článku. V ideálním případě je hodnota činitele plnění rovna jedné (teoretická maximální hodnota), avšak v praxi je vždy menší. Čím větší tato hodnota je, tím větší

je i výkon, jenž je článek schopen dodávat do spotřebiče. U monokrystalických a polykrystalických článků se hodnota parametru FF pohybuje přibližně od 0,7 do 0,85, u amorfních článků pak obvykle 0,6. Jedná se o výpočtový parametr, tudíž jako takový nemá na samotný průběh voltampérové charakteristiky vliv. [10] [11] [18]

$$FF = \frac{S_1}{S_2} = \frac{P_m}{U_{oc} * I_{sc}} = \frac{U_m * I_m}{U_{oc} * I_{sc}} \quad (2)$$



Obr. 20 Znáornění ploch  $S_1$  a  $S_2$  na voltampérové charakteristice

### 3.1.9 Účinnost - $\eta$ [-]

Jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole, účinnost je důležitý parametr využívaný ke srovnávání fotovoltaických článků a panelů. Jedná se o účinnost článku přeměny sluneční energie na energii elektrickou. Lze ji tedy definovat jako poměr elektrického výkonu článku v bodě MPP a výkonu dopadajícího slunečního záření  $P_{rad}$ , který je dán intenzitou ozáření  $E$  [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ] a plochou solárního článku (panelu)  $A$  [ $\text{m}^2$ ]. Účinnost solárních článků je značně ovlivňována vlastnostmi materiálu, ze kterého je článek vyroben, každý materiál je totiž schopen různé vlnové délky dopadajícího slunečního záření využívat s různou účinností (spektrální citlivost článku). Maximální teoreticky dosažitelná účinnost solárních článků z krystalického křemíku s jedním PN přechodem je přibližně 32 %, tato hranice se však díky rozvoji nových materiálů a technologií krok za krokem zvyšuje. [10] [11] [18]

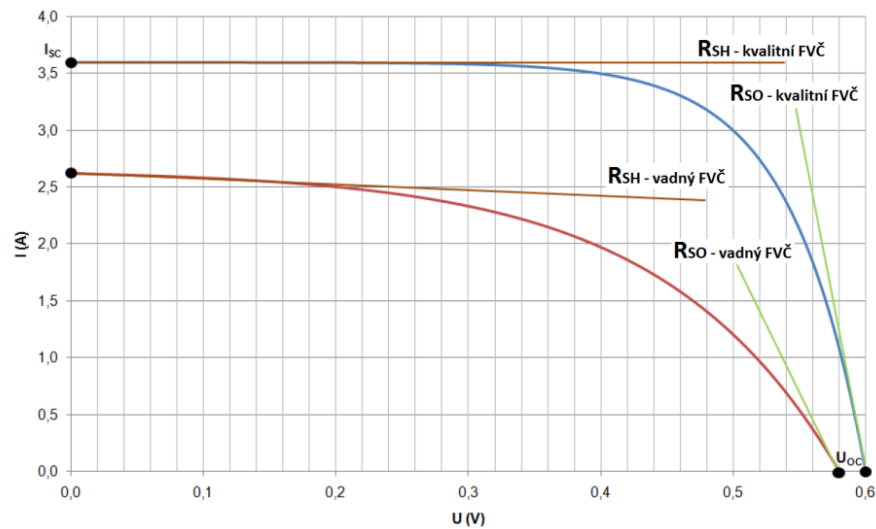
$$\eta = \frac{P_m}{P_{rad}} = \frac{U_m * I_m}{E * A} \quad (3)$$

### 3.1.10 Sériový odpor - $R_{SO}$ [ $\Omega$ ]

Tento odpor reprezentuje odpor v kontaktech, přívodech a celkově odpor polovodičového materiálu, ze kterého je solární článek vyroben. Jak plyne z náhradního schématu článku, v ideálním případě je hodnota  $R_{SO}$  rovna nule, toho však ve skutečnosti nelze dosáhnout. Čím větších hodnot bude sériový odpor dosahovat, tím větší bude i úbytek napětí na tomto odporu (zmenšení svorkového napětí článku). Na křivce VA charakteristiky se změna hodnoty odporu  $R_{SO}$  projevuje velmi výrazně, a to sklonem části charakteristiky (tečny v bodě  $U_{oc}$ ). Velikost sériového odporu lze vypočítat následujícím vztahem:

$$R_{SO} = \frac{\Delta U_{SO}}{\Delta I_{SO}} \quad (4)$$

kde  $\Delta U_{SO}$  ... rozdíl dvou hodnot napětí naměřených v lineární oblasti za ohybem VA charakteristiky (blíže bodu  $U_{oc}$ )  
 $\Delta I_{SO}$  ... rozdíl dvou hodnot proudu naměřených v lineární oblasti za ohybem VA charakteristiky (blíže bodu  $U_{oc}$ )



Obr. 21 Znáornění parametrů  $R_{SO}$  a  $R_{SH}$  na voltampérové charakteristice [10]

### 3.1.11 Paralelní odpor - $R_{SH}$ [ $\Omega$ ]

Pokud bychom měli k dispozici ideální fotovoltaický článek, hodnota jeho paralelního (svodového) odporu by se blížila nekonečnu. V reálném článku je však jeho hodnota nižší. Příliš nízká hodnota  $R_{SH}$  naznačuje to, že je pravděpodobně článek vadný, v takovém případě se chová, jako by byl vnitřně zkratován. Tato situace může být způsobena nedokonalostí krystalové mřížky či svodovým proudem na okrajích článku. Podobně jako sériový odpor má i hodnota paralelního odporu  $R_{SH}$  značný vliv na VA charakteristiku, konkrétně na sklon její části (tečny v bodě  $I_{sc}$ ). K výpočtu svodového odporu můžeme užít následujícího vzorce:

$$R_{SH} = \frac{\Delta U_{SH}}{\Delta I_{SH}} \quad (5)$$

kde  $\Delta U_{SH}$  ... rozdíl dvou hodnot napětí naměřených v lineární oblasti  
pře ohybem VA charakteristiky (blíže bodu  $I_{sc}$ )  
 $\Delta I_{SH}$  ... rozdíl dvou hodnot proudu naměřených v lineární oblasti  
před ohybem VA charakteristiky (blíže bodu  $I_{sc}$ )

Hodnoty odporů  $R_{SO}$  a  $R_{SH}$  jsou tedy velmi úzce spojeny s technologickou kvalitou solárního článku a mohou poměrně negativně ovlivňovat také jeho účinnost. Jak je znázorněno výše (Obr. 21), při přílišném odchýlení hodnot od ideálních se voltampérová charakteristika stává více lineární. Pro snížení vlivu těchto parametrů je třeba, aby byl kladen důraz na jejich omezení již při samotné výrobě fotovoltaických článků a panelů (vhodné výrobní postupy, dostatečná kvalita používaných materiálů, atd.). [10] [11] [18]



## 3.2 Další faktory ovlivňující průběh VA charakteristiky

Nejedná se přímo o elektrické parametry fotovoltaických článků, ovšem na jejich výkon a průběh voltampérové charakteristiky mají tyto faktory značný vliv.

### 3.2.1 Teplota - $t$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]

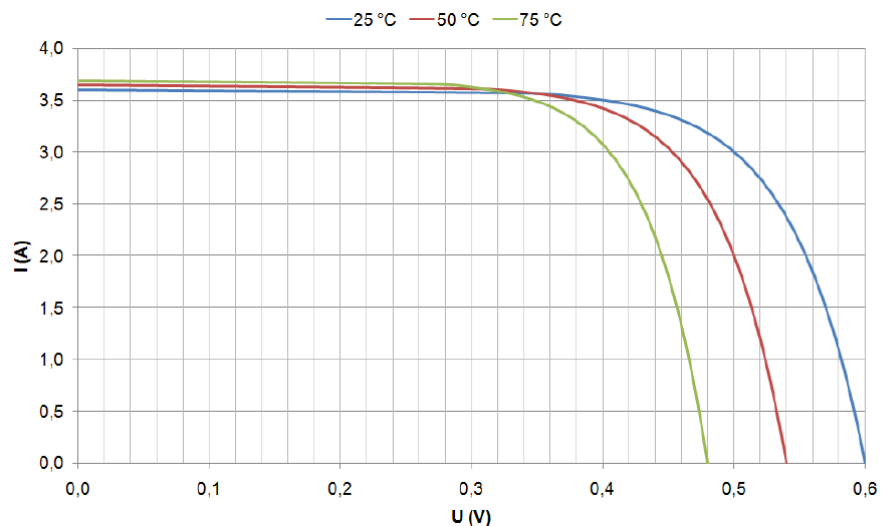
Teplota poměrně výrazně ovlivňuje elektrické parametry a VA charakteristiku solárního článku. S rostoucí teplotou panelu proud  $I_{sc}$  mírně roste, tento pokles je však téměř zanedbatelný. Mnohem větší měrou teplota ovlivňuje napětí  $U_{oc}$ , které s jejím přírůstkem klesá (stejně jako napětí  $U_m$ ). To vede k posunutí polohy pracovního bodu, snížení maximálního výkonu a tím i účinnosti článku.

Tab. 2 Reakce parametrů na změnu teploty o  $1^{\circ}\text{C}$

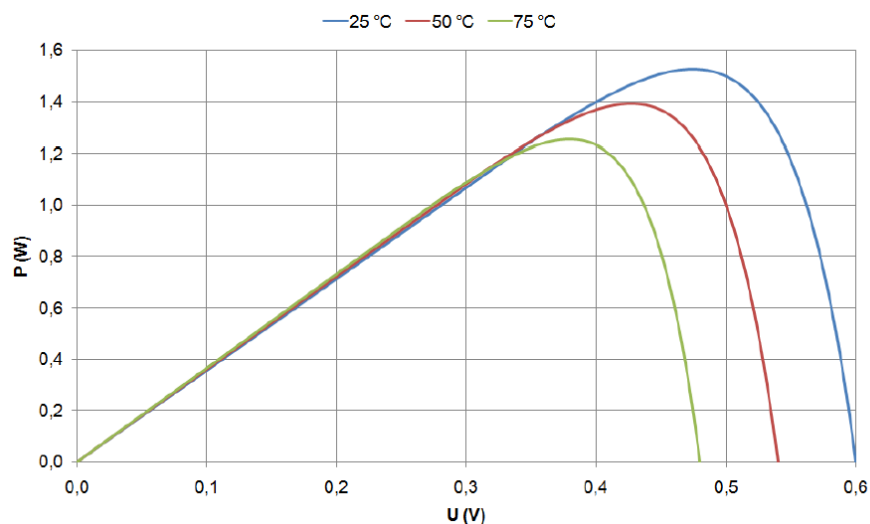
Parametr	Reakce parametrů na změnu teploty o $1^{\circ}\text{C}$ [%]
$I_{sc}$	+0,05
$U_{oc}$	-0,35
$P_m$	-0,45
FF	-0,20
$R_{SO}$	+0,32
$R_{SH}$	-0,70

Jak je uvedeno v tabulce, při nárůstu teploty o  $1^{\circ}\text{C}$  se zmenší výkon článku přibližně o 0,45 % (v případě monokrystalických článků). Při zvýšení teploty o  $20^{\circ}\text{C}$  může být pokles výkonu až 9 %. Přitom v letních měsících v oblastech s vysokou denní teplotou a bezvětřím (zhoršené chlazení panelů) může povrchová teplota solárních panelů dosáhnout hodnot až přes  $70^{\circ}\text{C}$ . Je tedy zřejmé, že pokud se fotovoltaický panel nachází v chladném prostředí, je schopen dodávat větší výkon nežli panel vystavený vyšším teplotám. Přesto generují solární panely v létě, díky výrazně větší intenzitě záření, až o 80 % více elektrické energie než v zimě. Chlazení panelů je nejčastěji řešeno za pomoci okolního vzduchu.

V katalogových listech bývá udáván parametr NOCT (Nominal Operation Cell Temperature), jenž udává nominální operační teplotu solárního článku při teplotě okolí  $20^{\circ}\text{C}$ , intenzitě záření  $800\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  a rychlosti větru  $1\text{ m/s}$ . Hodnota tohoto parametru se obvykle pohybuje mezi  $40\text{-}50^{\circ}\text{C}$ . [5] [10] [17]



Obr. 22 Vliv teploty na průběh voltampérové charakteristiky [10]



Obr. 23 Vliv teploty na průběh výkonové charakteristiky [10]

### 3.2.2 Intenzita ozáření - $E$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]

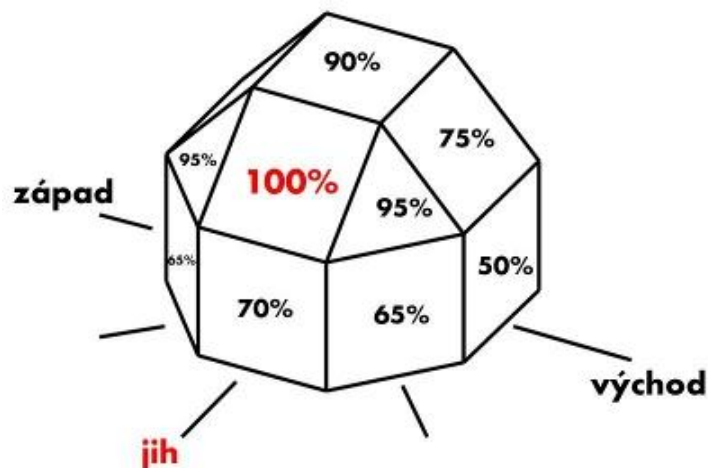
Nejvíce zásadní vliv na výkon (účinnost) fotovoltaického článku má intenzita dopadajícího záření. Proud  $I_{SC}$  je přímo úměrný intenzitě ozáření  $E$  (intenzita záření dopadající na povrch solárního panelu). V případě poklesu intenzity ozáření na polovinu, bude tedy i článek dodávat pouze poloviční proud. To je dáno fyzikální podstatou fotoelektrického jevu (dopadajícím světlem se uvolňují z krystalu křemíku elektrony, které poté mohou vést elektrický proud). Také hodnota napětí  $U_{oc}$  se s nárůstem dopadající intenzity mírně zvyšuje. Z těchto poznatků plyne, že vlivem  $E$  se mění poloha pracovního bodu článku a tím je značně ovlivněn i průběh VA charakteristiky. Kolmo na povrch zemské atmosféry dopadají sluneční paprsky s intenzitou záření, která průměrně dosahuje hodnoty

$1367 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , tato hodnota se označuje  $I_0$  a nazývá se solární či sluneční konstanta. Na území České republiky je průměrná intenzita slunečního záření okolo  $650 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , za mimořádných ideálních podmínek může tato hodnota dosahovat až hodnoty  $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . Sluneční záření, které poté dopadá přímo na zemský povrch, můžeme rozdělit na dvě složky (přímé a difuzní záření). Intenzita přímého záření je v atmosféře z části redukována absorpcí víceatomovými plyny (např.  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ) a rozptylem po odrazu o molekuly plynů, prachu a mraků. Takto rozptýlené záření se nazývá difuzní a vyznačuje se stejnou intenzitou ve všech směrech na rozdíl od přímého záření, které vykazuje v jednom směru intenzitu záření vyšší než v ostatních. Měřítkem těchto faktorů omezujících přímé záření je tzv. součinitel znečištění atmosféry označovaný jako  $Z$ . Čím větších hodnot součinitel  $Z$  nabývá, tím větší je i intenzita difuzního (rozptýleného) záření. Celková intenzita slunečního záření je dána součtem intenzit přímého a difuzního záření. S rostoucím  $Z$  se celková intenzita záření snižuje.

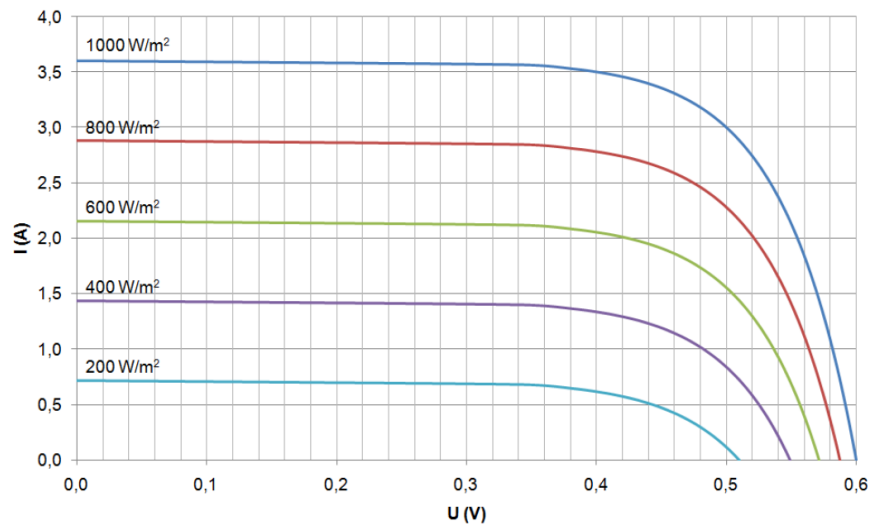
Tab. 3 Průměrné hodnoty součinitele znečištění  $Z$  pro různé lokality

Z [-]	Lokalita
2,0	místa nad 2 000 m
2,5	místa nad 1 000 m
3,0	venkov bez průmyslových exhalací
4,0	města a průmyslová střediska
5,0-8,0	silně znečištěné prostředí

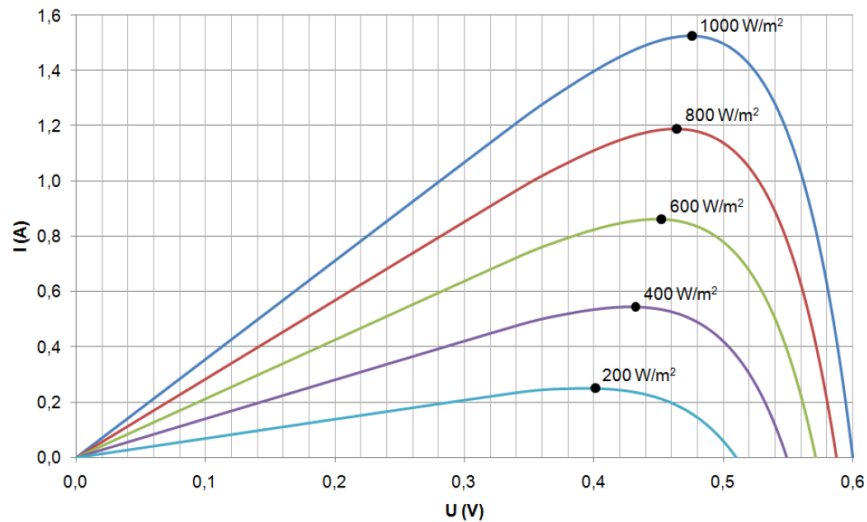
Velikost intenzity ozáření dopadající přímo na solární panel pak závisí na zeměpisné šířce, kalendářní době, součiniteli znečištění atmosféry, sklonu a orientaci panelu. Jak se velikost této hodnoty projeví na průběhu voltampérové charakteristiky je znázorněno v následujícím grafu. [5] [10]



Obr. 24 Vliv orientace a sklonu na účinnost fotovoltaického panelu [27]



Obr. 25 Vliv intenzity ozáření na průběh voltampérové charakteristiky [10]



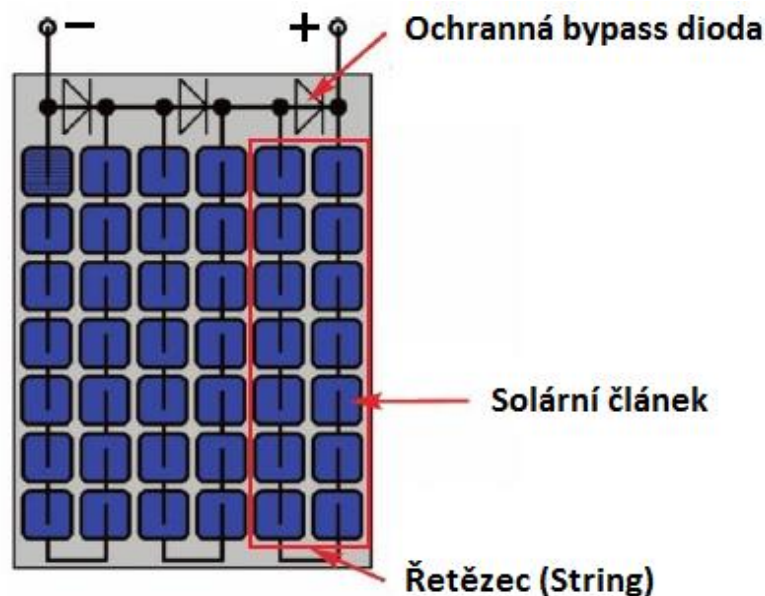
Obr. 26 Vliv intenzity ozáření na průběh výkonové charakteristiky [10]

### 3.2.3 Zastínění článků

Fotovoltaické panely jsou velice citlivé na nesouměrné ozáření slunečním zářením či na zastínění článků, ze kterých je modul tvořen. To je způsobeno faktem, že většina běžných modulů je tvořena solárními články propojenými do série, pokud jsou takto zapojené články nerovnoměrně ozářeny sluncem (či zastíněny), generují rozdílné elektrické proudy. Celý panel je pak schopen dodávat jen takový proud, jaký je vyráběn nejméně ozářeným článkem modulu. Důsledkem toho dochází ke snížení celkového výkonu dodávaného panelem. Velikost ztrátového výkonu je přímo úměrná rozsahu zastínění. U toho „nejslabšího“ článku se změní polarita a stává se z něj spotřebič. Ostatní články solárního

panelu tak předávají část své energie tomuto „nejslabšímu“ článku a tím dochází k jeho zahřívání (teplota takto zahříváných článků může dosahovat až 100 °C). To má negativní vliv na životnost tohoto článku a v krajních případech může nastat i jeho úplné zničení. Dojde-li k úplnému zastínění jednoho z článků, nevyrábí tento článek žádný proud a solární panel nebude dodávat žádný výkon, ani pokud budou ostatní články v sériovém zapojení plně osvětleny. K zabránění tepelné destrukci článků a zároveň omezení výkonových ztrát při zastínění panelu se využívá tzv. ochranných (obtokových) bypass diod.

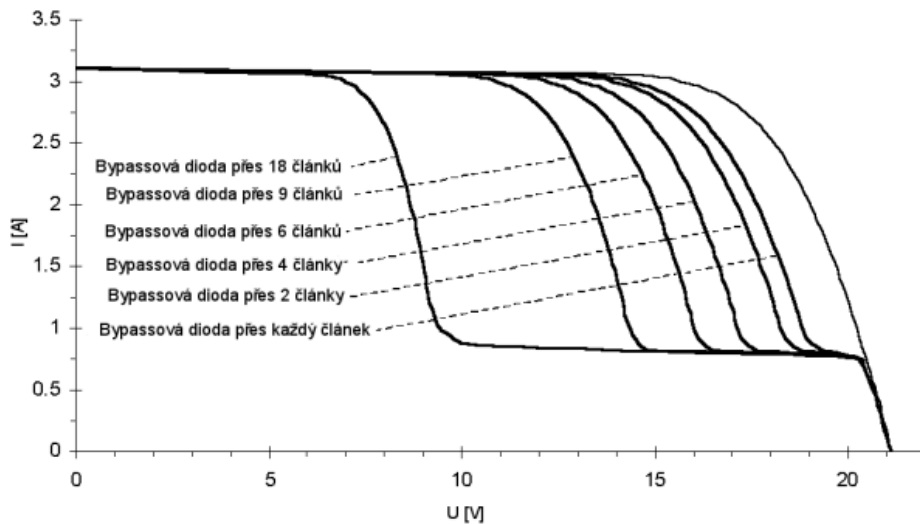
Tyto bypass diody slouží k odvedení elektrického proudu mimo zastíněný článek a jsou obvykle umístěny v přípojovací krabici solárního panelu. Zpravidla jedna obtoková dioda přemostňuje řetězec 18 až 20 článků. V případě fotovoltaických modulů složených z 36 článků je využíváno dvou bypass diod, panely s 54 až 60 solárními články jsou pak vybaveny třemi diodami.



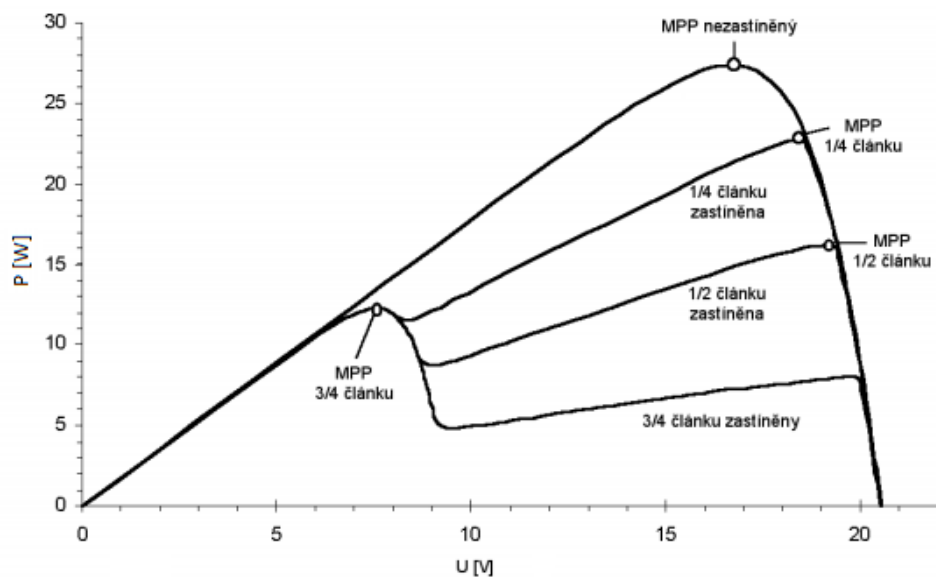
Obr. 27 Zapojení ochranných bypass diod ve fotovoltaickém panelu [16]

Pro dokonalou ochranu a minimalizaci ztrát při zastínění by musely být ochranné bypass diody instalovány přes každý článek v solárním modulu, díky tomu se při zastínění odstaví pouze konkrétní článek, nikoliv celý řetězec. To je však v praxi z ekonomických důvodů nevýhodné. Použití ochranných bypass diod přes různý počet solárních článků v modulu se samozřejmě výrazně projeví na průběhu VA charakteristiky (Obr. 28). Z grafu je jasné, že čím méně bypass dioda článků překlenuje, tím méně je voltampérová charakteristika deformována. S rostoucím poměrem zastínění výrazně klesá celkový proud panelu

(mírně se snižuje také hodnota napětí). V důsledku toho se podstatně mění poloha bodu MPP (Obr. 29) a tím také jeho výkon (solární panel s článkem z jedné čtvrtiny zastíněným dosahuje přibližně 80 % svého výkonu). Kromě zastínění může být toto chování solárního článku způsobené také jeho poškozením. [5] [16] [19]



Obr. 28 Vliv použití bypass diod přes různý počet článků na VA charakteristiku [19]



Obr. 29 Vliv zastínění solárního článku na polohu bodu MPP [19]

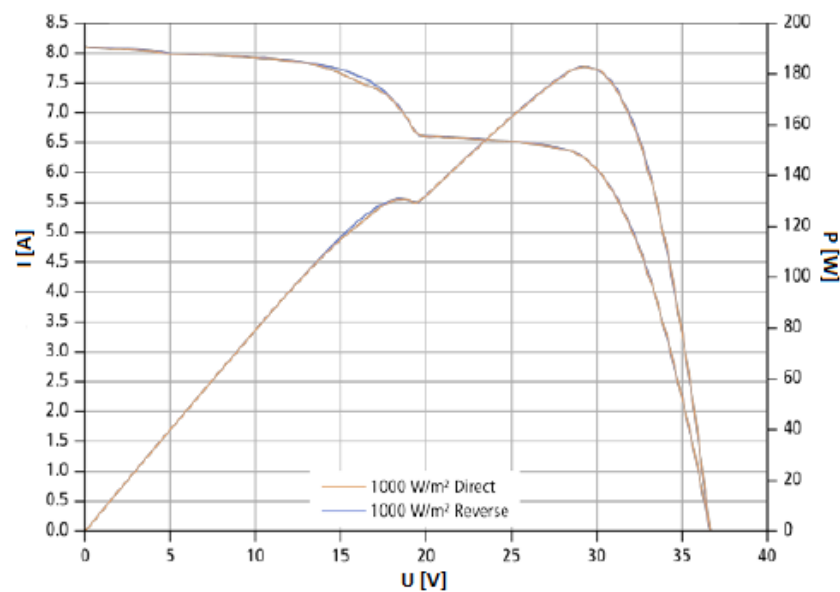
K zastínění fotovoltaického panelu může dojít z mnoha příčin. V první řadě jsou to stíny objektů situovaných v okolí panelu (např. komíny, satelitní antény, vikýře, vegetace), dále to mohou být přírodní vlivy jako pokrytí solárního panelu sněhem či listy stromů. Problémem je také znečištěný či zaprášený povrch panelu. V neposlední řadě je třeba dát pozor na možné stíny vznikající od samotné nosné konstrukce solárních panelů a jejích prvků. Zdrojů zastínění tedy může být nepřehledné množství, je tedy velmi obtížné (někdy i nemožné) všechny tyto zdroje eliminovat. Ovšem je třeba se těmto stínům v co největší míře vyvarovat a předpokládat je již při samotném návrhu.



*Obr. 30 Fotovoltaický panel zastíněný prvkem nosné konstrukce [8]*

## 4 Analýza voltampérových charakteristik

Diagnostika solárních panelů přímým (mobilní) měřením VA charakteristik se provádí přímo v místě provozu fotovoltaického systému, to však vyžaduje snadný přístup ke konektorům solárních panelů. Další nutností je odpojení měřeného panelu ze systému, z čehož plyne jistá ztráta výroby elektrické energie při měření. Velký vliv (jak již bylo uvedeno v kapitole 3.2.) na naměřené výsledky mají klimatické podmínky (teplota a intenzita záření), které mohou být během měření značně nestálé a proměnlivé. Touto metodou však můžeme získat přesné informace o jednotlivých panelech či odhalit případné defekty. Při analýze VA charakteristik se určují parametry solárního panelu jako např. napětí naprázdno ( $U_{oc}$ ), proud nakrátko ( $I_{sc}$ ), napětí při maximálním výkonu ( $U_m$ ), proud při maximálním výkonu ( $I_m$ ), maximální výkon ( $P_m$ ), účinnost ( $\mu$ ) či Fill Factor. Měření voltampérové charakteristiky lze provádět klasicky za užití voltmetru a ampérmetru nebo pomocí speciálního solárního analyzátoru. [21] [22]



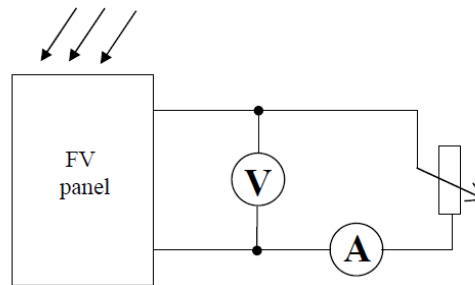
Obr. 31 Voltampérová a výkonová charakteristika vadného fotovoltaického panelu [33]



## 4.1 Měření voltampérových charakteristik fotovoltaických panelů

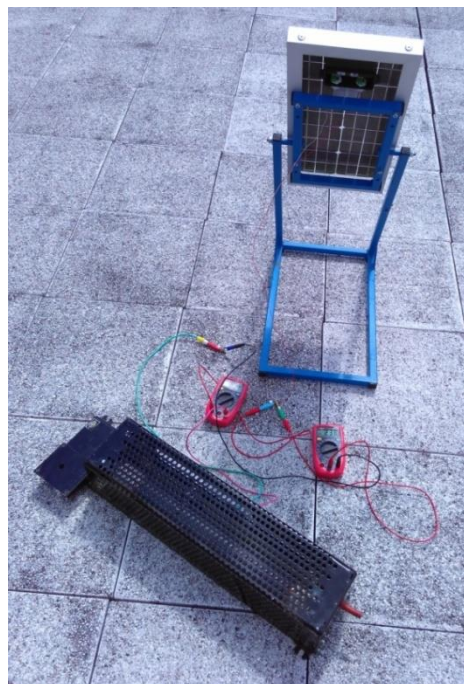
### 4.1.1 Měření voltmetrem a ampérmetrem

Jednou z možností jak lze měřit VA charakteristiku je za pomoci voltmetru a ampérmetru. Dva digitální multimetry (UNI-T UT33B) a regulovatelný odpor (zátěž) jsem k měřenému solárnímu panelu zapojil dle schématu (Obr. 32).



Obr. 32 Schéma pro měření voltampérové charakteristiky

Poté již mohlo započít samotné měření. Plynulou změnou připojené zátěže jsem postupně proměřil body VA charakteristiky daného solárního panelu. Naměřené hodnoty jsem zanesl do připravené tabulky. Je velmi důležité navolit si správné kroky měření a u ohybu VA charakteristiky zvolit menší krok, aby výsledná charakteristika byla co možná nejpřesnější.



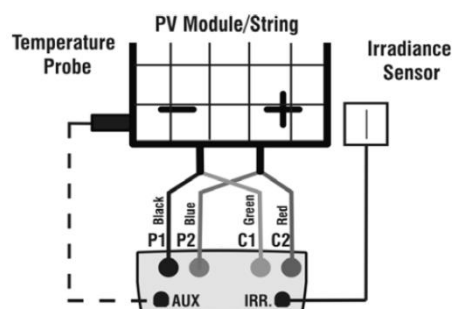
Obr. 33 Měření voltmetrem a ampérmetrem

### 4.1.2 Měření solárním analyzátozem



Obr. 34 Analyzátor I-V 400 [34]

Další variantou měření VA charakteristiky je za užití speciálního solárního analyzátoru. Pro své měření jsem měl k dispozici analyzátor I-V 400 od italského výrobce HT Instruments. Práce s tímto analyzátozem je snadná, rychlá a i bez předchozích zkušeností poměrně jednoduše zvládnutelná. Lze měřit pouze jednotlivé fotovoltaické panely či celé řetězce panelů. Součástí vybavení analyzátoru je referenční článok (HT304N) pro měření intenzity dopadajícího slunečního záření a teplotní čidlo (PT300). Před samotným měřením je třeba do analyzátoru zadat štítkové (katalogové) parametry nominálního (měřeného) panelu. Dalším krokem je připojení přístroje k měřenému panelu, to je realizováno pomocí čtyř rozdílně barevných vodičů. Pak už jen stačí připojit vhodně zvolený typ konektorů (podle typu měřeného panelu) a ty pak propojit s konektory panelu. Díky barevnému rozlišení vodičů a charakteristickému tvaru konektorů je připojení analyzátoru banální a prakticky nezaměnitelné.



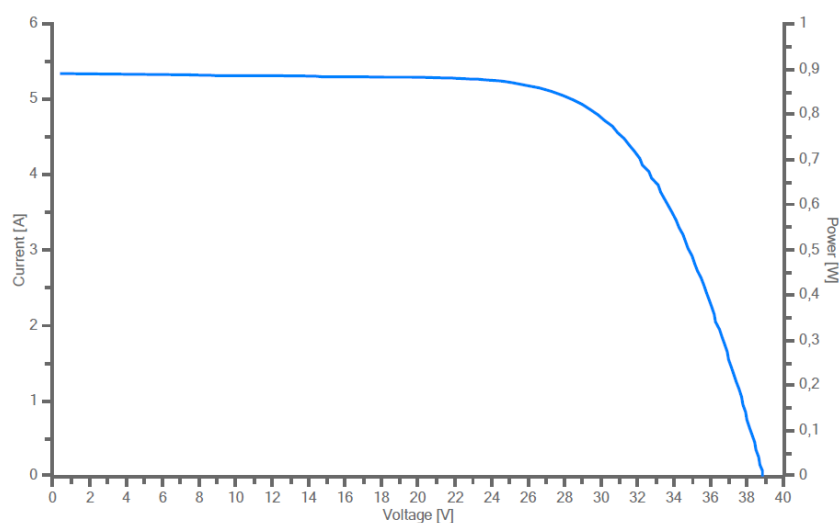
Obr. 35 Schéma zapojení analyzátoru I-V 400 [35]

Pro správné měření intenzity záření a teploty je nutno referenční článok HT304N spolu s teplotním čidlem umístit co nejbližší měřeného panelu a především u referenčního článku zabezpečit jeho shodný sklon a orientaci s modulem. V mém případě pro tyto účely posloužila nosná konstrukce solárního panelu. Samotné měření pak již proběhne pouhým stisknutím

příslušného tlačítka. Jednou z užitečných funkcí I-V 400 je i možnost automatického přepočtu hodnot naměřených za určitých podmínek na hodnoty odpovídající STC, ty lze pak lépe porovnávat s údaji udávanými v katalogových listech zadaných do analyzátoru před měřením, jestli toleranci vyhovují je sám přístroj schopen vyhodnotit (OK/NOT OK). Výsledné hodnoty a grafy lze přímo zobrazit na displeji nebo je pomocí opticky izolovaného rozhraní převést do PC, kde mohou být vyhodnocovány a porovnávány prostřednictvím softwaru Topview dodávaného výrobcem analyzátoru I-V 400. Tento software je uživatelsky poměrně přívětivý a obsahuje několik základních funkcí sloužících k úpravě grafů VA charakteristik.

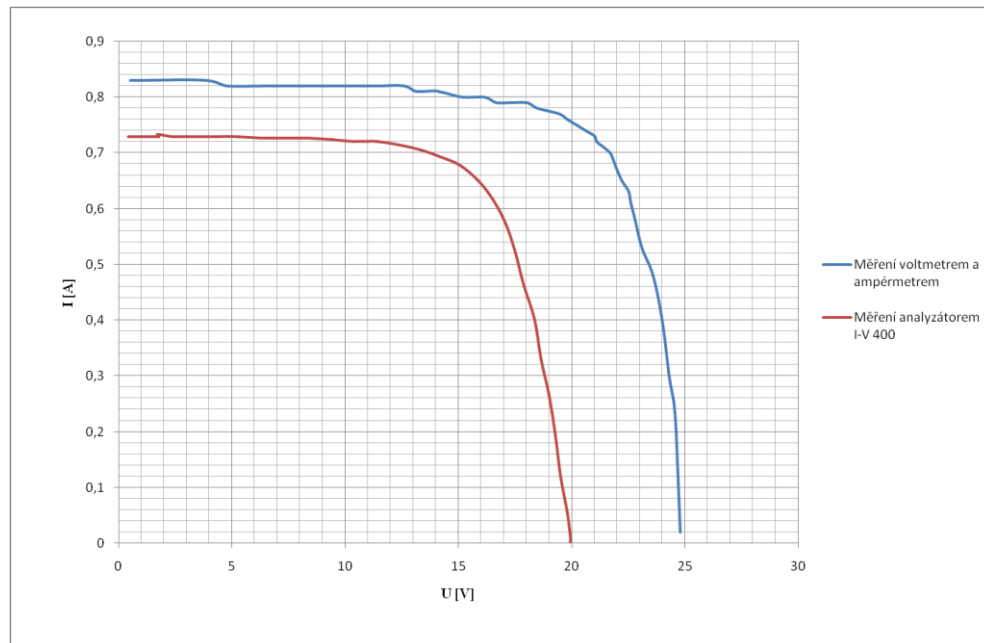


Obr. 36 Měření analyzátozem I-V 400



Obr. 37 Ukázka zobrazení voltampérové charakteristiky v softwaru Topview

### 4.1.3 Srovnání metod měření voltampérové charakteristiky



Obr. 38 Srovnání metod měření voltampérové charakteristiky

Pro srovnání metod měření voltampérové charakteristiky jsem provedl měření totožného solárního panelu oběma metodami (Obr. 38). Konkrétně se jednalo o modul STR 36-13 od společnosti Solartec, jehož technické parametry uvádím v kapitole (4.2.5). Měření pomocí voltmetru a ampérmetru se ukázalo jako velmi zdlouhavé. Z toho plyne potřeba co nejstabilnějších klimatických podmínek (intenzita záření, teplota) po celou dobu měření, což je v reálných podmínkách velice obtížné. I při mém měření se podmínky postupem času měnily, to vyžadovalo (např. při zakrytí slunce mrakem) pozdržení měření a vyčkání na vhodnější podmínky tak, aby všechny hodnoty byly naměřeny za stejných či podobných podmínek. Tím se čas měření ještě prodlužoval. U solárního analyzátoru tento problém odpadá, jelikož je schopen měření provést v řádu sekund. Dle katalogového listu měřeného panelu by měl parametr  $U_{oc}$  při STC dosahovat hodnoty 21,5 V. Měření probíhalo za teploty cca 22 °C a intenzity záření pohybující se v intervalu 700-800 W·m<sup>-2</sup> (kolísání bylo způsobeno délkou měření). Tyto podmínky lze považovat za blízké podmínkám STC. Proto se jako přesnější jeví metoda měření analyzátořem, pomocí kterého jsme naměřili hodnotu napětí naprázdno 19,94 V, jenž se více přibližuje katalogovým hodnotám. Oproti metodě voltmetrem a ampérmetrem, kterými jsme naměřili hodnotu 24,8 V, která dokonce překračuje hodnotu udávanou výrobcem za STC. Toto měření by se dalo zpřesnit použitím přístrojů s vyšší úrovní (třídou) přesnosti. Měření analyzátořem jsem provedl jako druhé

v pořadí, proto mohou být výsledky ovlivněny teplotou panelu, která v průběhu měření roste. Další značnou výhodou I-V 400 je také jeho mobilita, jednoduché připojení k modulům a schopnost přepočtu na podmínky STC. Naměřené hodnoty a grafy lze v elektronické podobě ukládat přímo do paměti přístroje (až 250 měření) a poté je kdykoliv prostřednictvím softwaru vyhodnocovat. Jeden nedostatek analyzátoru I-V 400 jsem objevil přímo při mém měření. Pokud není před samotným měřením v přístroji nastaven jako nominální přímo měřený modul, mohou být naměřené hodnoty nepřesné, v některých případech to může znamenat změření pouze určité části VA charakteristiky. Z toho vyplývá nutnost znalosti katalogových parametrů měřeného panelu. Celkově se jako výhodnější metoda měření voltampérových charakteristik ukázala metoda měření solárním analyzátozem, která je oproti metodě měření voltmetrem a ampérmetrem efektivnější, přesnější a rychlejší. Proto jsem tuto metodu zvolil pro další měření v rámci této diplomové práce.

## 4.2 Analýza naměřených hodnot a grafů

V praktické části této diplomové práce jsem se zaměřil především na ověření vlivu vlastností a parametrů fotovoltaických článků na průběh voltampérové charakteristiky uvedených ve třetí kapitole této práce. Veškerá měření byla provedena na střeše budovy Fakulty elektrotechnické v Plzni. Část mých měření probíhala již v zimních měsících roku 2015, z důvodu získání dat při zhoršených podmínkách pro ověření vlivu klimatických podmínek na průběh voltampérové charakteristiky. Celkově jsem v době od 21.10.2015 do 3.5.2016 realizoval sedm měřících dní.

Pro účely měření byl k dispozici fotovoltaický panel Volther PowerVolt 190/500 od výrobce Solimpeks (Obr. 39). Jedná se o tzv. hybridní kolektor, který umožňuje současnou výrobu elektrické a tepelné energie. Pod vrchní fotovoltaickou částí kolektoru se nachází absorbér, jenž získané teplo dále předává teplotnosné kapalině. V mém případě jsem pro měření využil pouze fotovoltaickou část kolektoru, která je tvořena 72 solárními články monokrystalické technologie. Měřený panel byl orientován na jih se sklonem 45°. Jeho technické údaje jsou uvedeny v následující tabulce (Tab. 4).



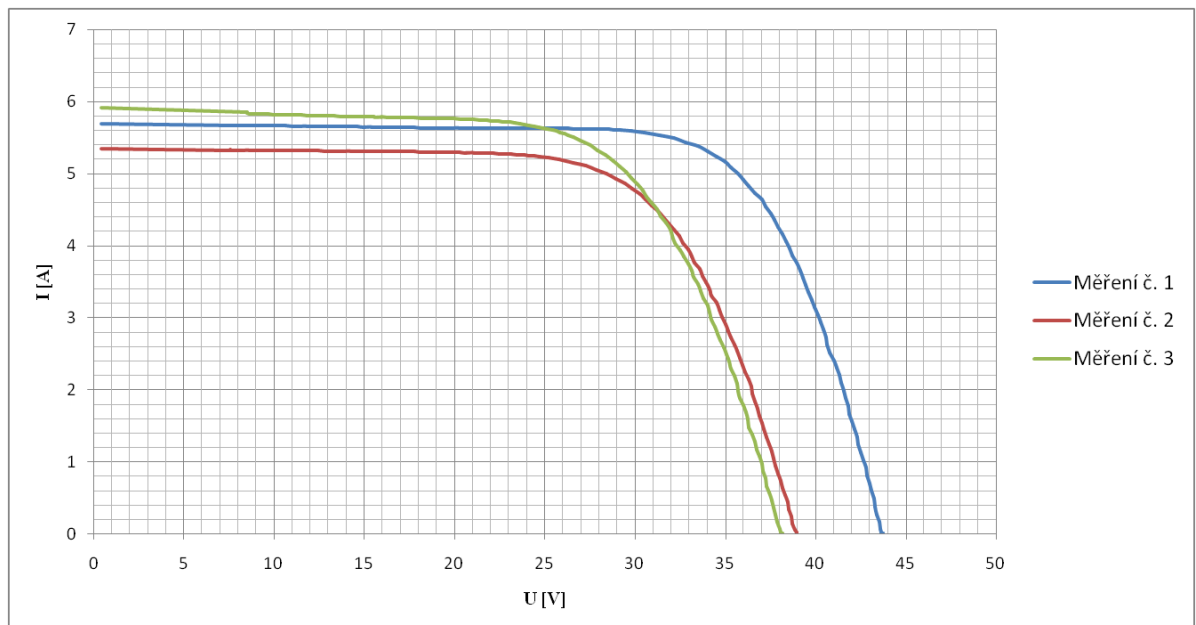
Obr. 39 Měřený fotovoltaický panel Volther PowerVolt 190/500

Tab. 4 Technické parametry fotovoltaického panelu Volther PowerVolt 190/500

Rozměry panelu [mm]	1655x828x90
Hmotnost [kg]	24
Typ článků [-]	Monokrystalické
Počet článků [ks]	72
$P_m$ [W]	190
$I_m$ [A]	5,2
$I_{sc}$ [A]	5,6
$U_m$ [V]	36,5
$U_{oc}$ [V]	45,2

#### 4.2.1 Vliv teploty na průběh VA charakteristiky

Jak již bylo uvedeno, klimatické podmínky mají značný vliv na průběh VA charakteristiky. První měření bylo zaměřeno na ověření vlivu teploty na elektrické parametry panelu. Proto bylo třeba získat hodnoty za co nejvíce odlišných teplot, zároveň však se stejnou či alespoň podobnou intenzitou dopadajícího slunečního záření.



Obr. 40 Vliv teploty na průběh voltampérové charakteristiky

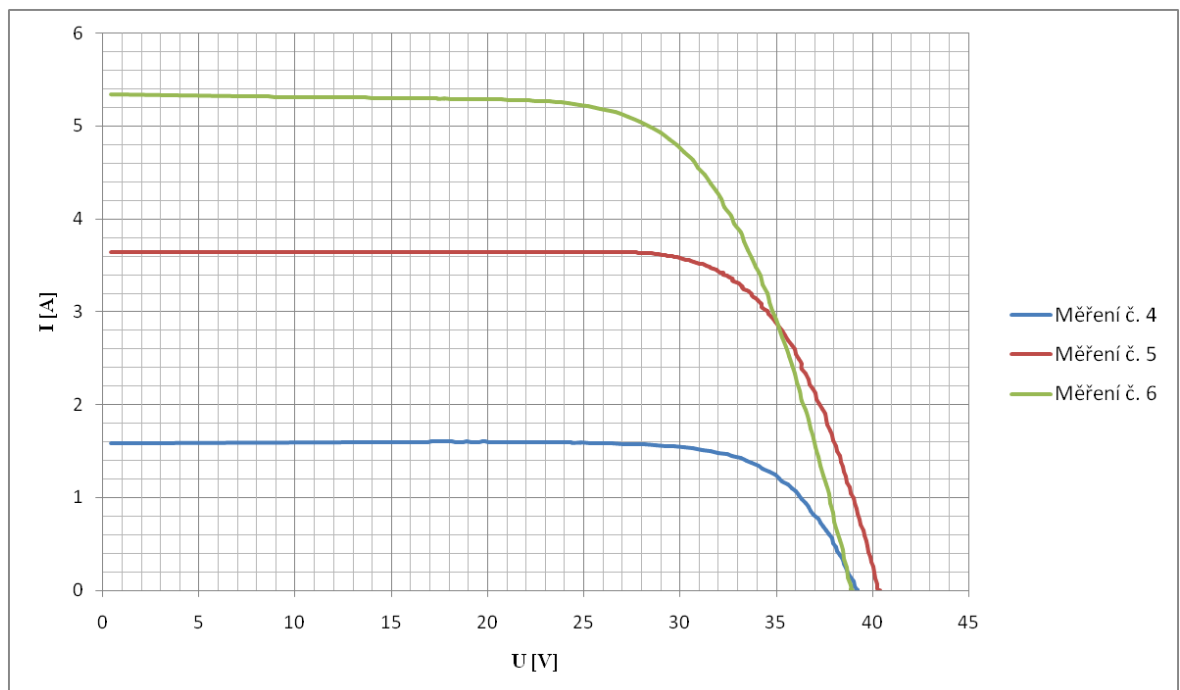
Tab. 5 Měření vlivu teploty na průběh voltampérové charakteristiky

Číslo měření	$P_m$ [W]	$U_{oc}$ [V]	$U_m$ [V]	$I_m$ [A]	$I_{sc}$ [A]	Intenzita ozáření [ $W \cdot m^{-2}$ ]	Teplota [ $^{\circ}C$ ]	Fill Factor [%]
1	180,86	43,70	35,01	5,17	5,70	742,00	7,70	73,00
2	143,15	38,94	29,44	4,86	5,34	732,00	18,10	69,00
3	149,12	38,11	28,80	5,18	5,92	758,00	31,90	66,00

Měřením jsem si tedy ověřil, že s rostoucí teplotou klesá napětí naprázdno  $U_{oc}$ . Dalším teoretickým předpokladem byl mírný nárůst proudu  $I_{sc}$ , ten se ovšem u měření č. 2 neprojevil. To může být zapříčiněno menší intenzitou ozáření než u ostatních měření.

#### 4.2.2 Vliv intenzity ozáření na průběh VA charakteristiky

Druhý klimatický faktor výrazně ovlivňující průběh voltampérové charakteristiky solárního článku je intenzita ozáření. Podobně jako u předchozího měření jsem i v tomto případě byl nucen naměřit několik VA charakteristik, ovšem při různých úrovních intenzity ozáření dopadajících slunečních paprsků a podobné teplotě.



Obr. 41 Vliv intenzity ozáření na průběh voltampérové charakteristiky

Tab. 6 Měření vlivu intenzity ozáření na průběh voltampérové charakteristiky

Číslo měření	$P_m$ [W]	$U_{oc}$ [V]	$U_m$ [V]	$I_m$ [A]	$I_{sc}$ [A]	Intenzita ozáření [ $W \cdot m^{-2}$ ]	Teplota [ $^{\circ}C$ ]	Fill Factor [%]
4	47,51	39,20	32,44	1,46	1,58	217,00	16,80	77,00
5	110,07	40,31	32,23	3,42	3,64	495,00	18,60	75,00
6	143,06	38,91	29,44	4,86	5,34	732,00	16,80	69,00

V grafu (Obr. 41) je jasně viditelná změna proudu  $I_{sc}$  a také výkonu měřeného panelu. Tento přírůstek je přímo úměrný zvětšující se intenzitě ozáření. Nárůst by mělo vykazovat také napětí  $U_{oc}$ , u měření č. 4 a č. 5 se tento předpoklad potvrdil. Avšak u měření č. 6 toto napětí dosahuje jen 38,91 V, to může být způsobeno následkem mírně odlišné teploty panelu.



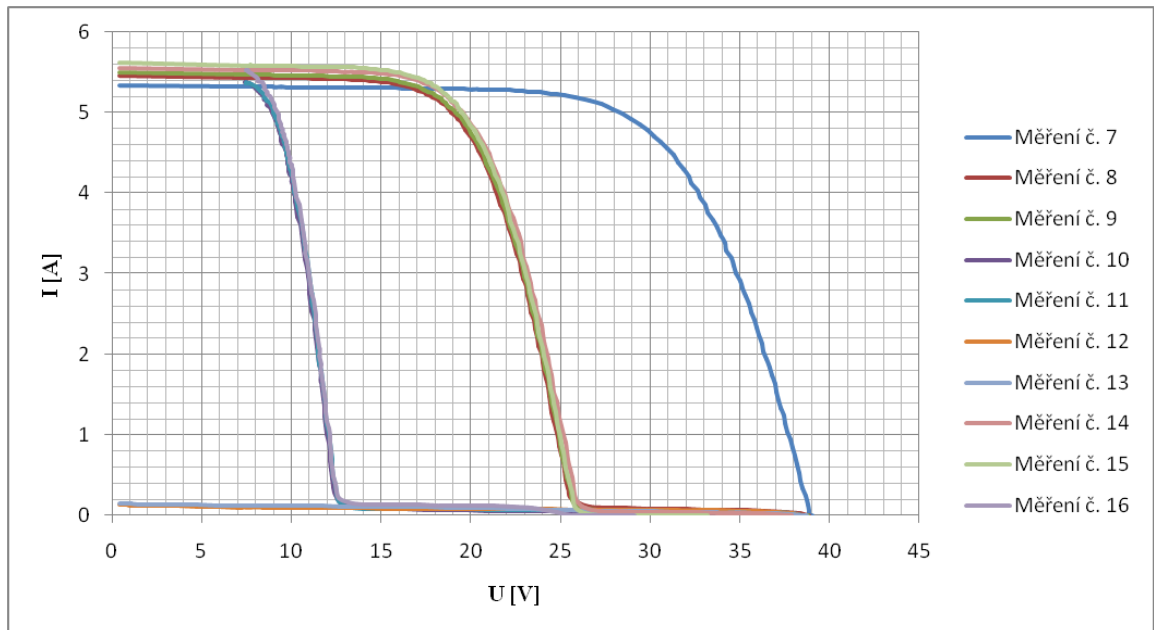
### 4.2.3 Vliv zastínění (poškození) článků na průběh VA charakteristiky

Účelem tohoto měření bylo dokázání vlivu vadných či poškozených článků na průběh voltampérové charakteristiky solárního panelu. Poškození jednoho, poté i více článků, jsem simuloval zakrytím článku neprůhlednou destičkou. Měřený fotovoltaický panel Volther PowerVolt 190/500 je tvořen sériově zapojenými 72 články a je vybaven třemi ochrannými bypass diodami. Každá z diod překlenuje 24 článků. Pro demonstraci chování solárního panelu s poškozeným (zastíněným) jedním či více články jsem postupně provedl následující měření:

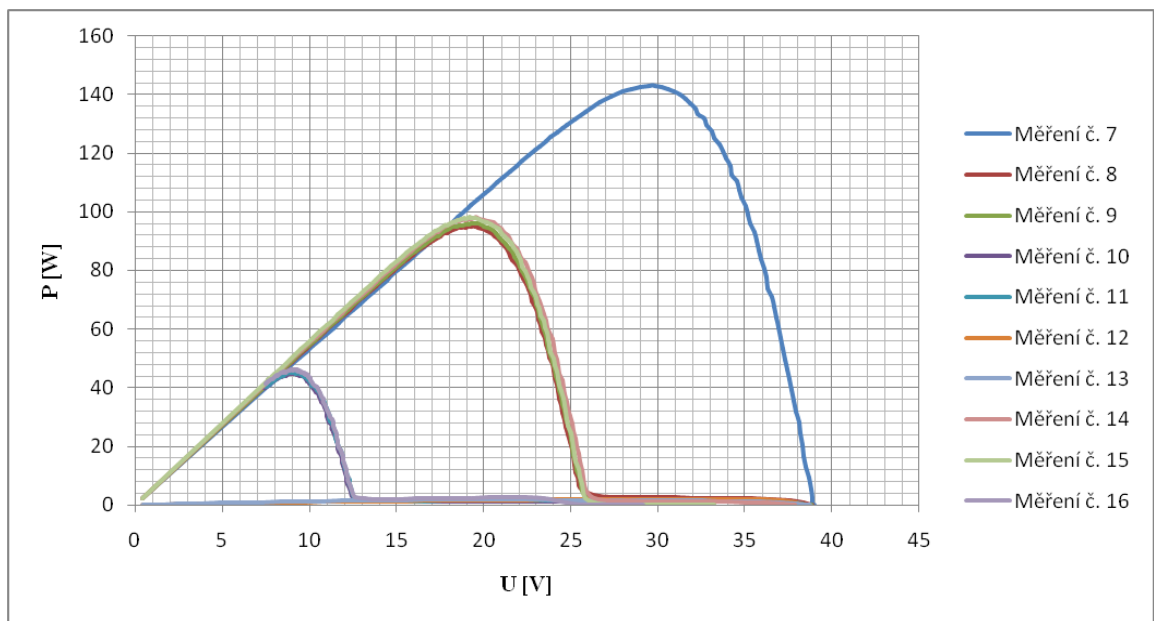
- Měření č. 7 - bez zastínění (zakryto 0 % z celkové plochy článků)
- Měření č. 8 - zastíněn jeden článek (1,39 %)
- Měření č. 9 - zastíněny dva články vedle sebe (2,78 %)
- Měření č. 10 - zastíněny tři články vedle sebe (4,17 %)
- Měření č. 11 - zastíněny čtyři články vedle sebe (5,56 %)
- Měření č. 12 - zastíněno pět článků vedle sebe (6,94 %)
- Měření č. 13 - zastíněna celá vodorovná řada článků (8,33 %)
- Měření č. 14 - zastíněna celá svislá řada článků (16,67 %)
- Měření č. 15 - zastíněny dvě celé svislé řady článků (33,33 %)
- Měření č. 16 - zastíněny tři celé svislé řady článků (50 %)



Obr. 42 Ukázka zastínění měřeného panelu (zastíněn jeden článek)



Obr. 43 Vliv rozdílného zastínění na průběh voltampérové charakteristiky

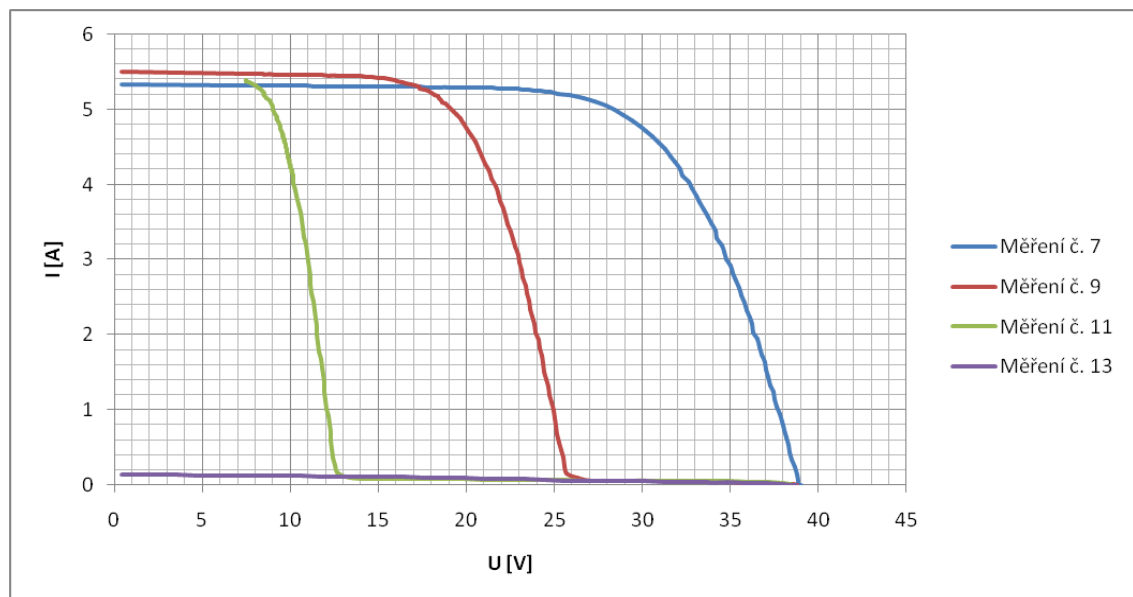


Obr. 44 Vliv rozdílného zastínění na průběh výkonové charakteristiky

Tab. 7 Měření vlivu zastínění na průběh voltampérové charakteristiky

Číslo měření	$P_m$ [W]	$U_{oc}$ [V]	$U_m$ [V]	$I_m$ [A]	$I_{sc}$ [A]	Intenzita ozáření [ $W \cdot m^{-2}$ ]	Teplota [ $^{\circ}C$ ]	Fill Factor [%]
7	142,98	38,96	29,44	4,86	5,34	731,00	17,40	69,00
8	95,15	38,87	19,22	4,95	5,46	749,00	21,10	45,00
9	96,10	38,77	19,44	4,94	5,50	754,00	18,40	45,00
10	44,93	38,53	9,22	4,87	5,39	755,00	18,90	22,00
11	45,31	38,59	9,00	5,03	5,37	759,00	19,80	22,00
12	2,03	38,41	33,80	0,06	0,14	757,00	17,20	39,00
13	1,89	38,73	22,23	0,09	0,15	777,00	14,90	34,00
14	98,00	37,86	19,58	5,01	5,55	771,00	16,20	47,00
15	98,08	33,21	19,22	5,10	5,62	770,00	16,80	53,00
16	46,22	29,16	9,08	5,09	5,52	771,00	17,60	29,00

Již při zastínění jednoho článku (Měření č. 8) měřeného solárního panelu klesl jeho výkon na cca 67 % z původního výkonu nezakrytého panelu. To je způsobeno reakcí bypass diody na zakrytí článku, která přemostí všech 24 článků svého řetězce (dvě celé svislé řady). Proto má stejný efekt zakrytí dalšího článku v řadě (Měření č. 9), podobně jako zastínění celé svislé řady (Měření č. 14) či dokonce dvou celých svislých řad (měření č. 15). Při vyřazení tří článků (Měření č. 10) dojde k aktivaci dvou obtokových diod zároveň, z toho plyne další pokles výkonu, a to přibližně na 32 %. Totožné chování se logicky projevilo jak při zakrytí čtyř článků (Měření č. 11), tak u tří celých svislých řad (Měření č. 16). Nejmenšího výkonu (cca 1,4 %) pak solární panel pochopitelně dosahoval při zastínění pěti článků vedle sebe (Měření č. 12) a celé vodorovné řady (Měření č. 13). Z tohoto měření plyne, že zastínění či poškození, byť jen jednoho článku solárního panelu (1,39 % z celkové plochy článků) má obrovský vliv na jeho výkon a průběh VA charakteristiky. Pro lepší přehlednost jsou v následujícím grafu (Obr. 45) zobrazeny charakteristiky z měření č. 7, 9, 11 a 13.



Obr. 45 Voltampérové charakteristiky vybraných měření

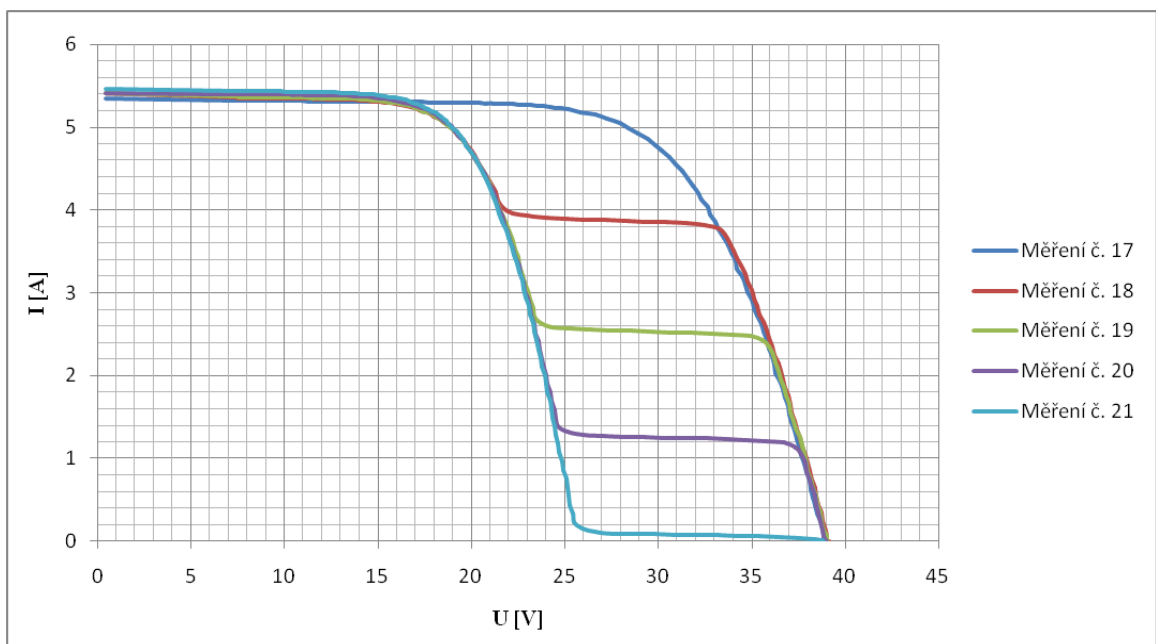
Tab. 8 Pokles výkonu při rozdílném zastínění

Číslo měření	$P_m$ [W]	Úroveň výkonu [%]
7	142,98	100,00
8	95,15	66,55
9	96,10	67,21
10	44,93	31,42
11	45,31	31,69
12	2,03	1,42
13	1,89	1,32
14	98,00	68,54
15	98,08	68,60
16	46,22	32,33

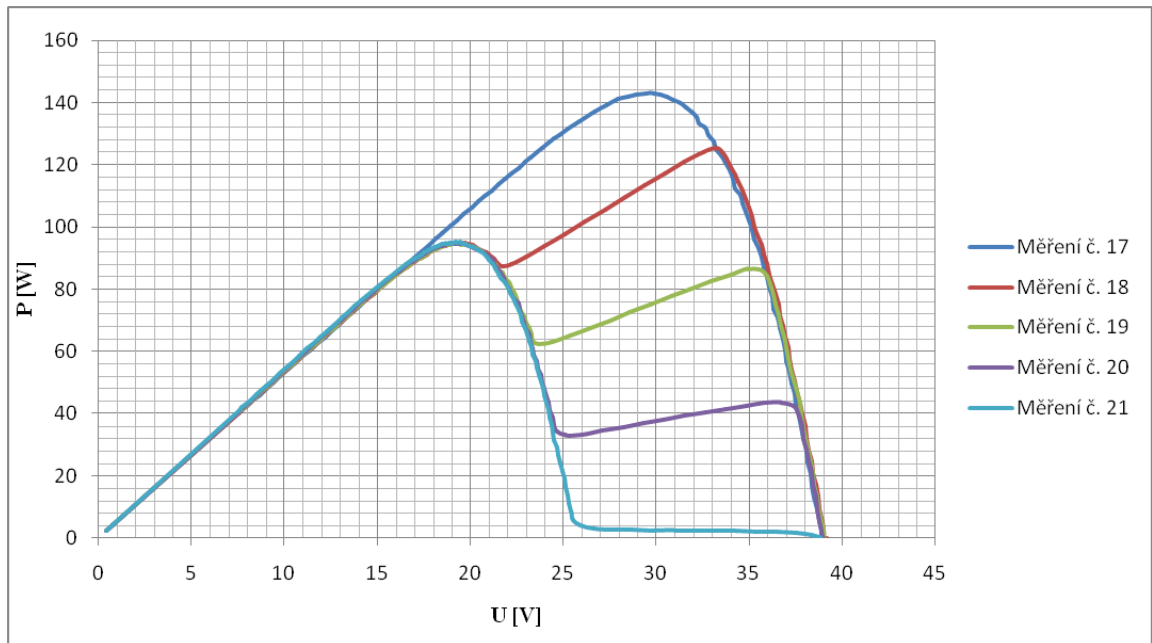
#### 4.2.4 Vliv částečného zastínění (poškození) článků na průběh VA charakteristiky

Toto měření si kladlo za cíl zjištění vlivu částečného zastínění či poškození solárního článku. Simulace částečného zastínění byla provedena zakrytím příslušné části článku neprůhlednou destičkou. Toto měření demonstruje např. zašpinění panelu od prachu, jiných nečistot, popřípadě ptačím trusem či pokrytí panelu listy. Měření probíhalo následujícími kroky:

- Měření č. 17 - bez zastínění (zakryto 0 % z celkové plochy článků)
- Měření č. 18 - zastíněna  $\frac{1}{4}$  článku (0,35 %)
- Měření č. 19 - zastíněna  $\frac{1}{2}$  článku (0,69 %)
- Měření č. 20 - zastíněny  $\frac{3}{4}$  článku (1,04 %)
- Měření č. 21 - zastíněn celý článek (1,39 %)



Obr. 46 Vliv částečného zastínění na průběh voltampérové charakteristiky



Obr. 47 Vliv částečného zastínění na průběh výkonové charakteristiky

Tab. 9 Měření vlivu částečného zastínění na průběh voltampérové charakteristiky

Číslo měření	$P_m$ [W]	$U_{oc}$ [V]	$U_m$ [V]	$I_m$ [A]	$I_{sc}$ [A]	Intenzita ozáření [ $W \cdot m^{-2}$ ]	Teplota [ $^{\circ}C$ ]	Fill Factor [%]
17	142,98	38,96	29,44	4,86	5,34	731,00	17,40	69,00
18	125,31	39,10	33,23	3,77	5,41	739,00	17,90	59,00
19	94,99	39,09	19,30	4,92	5,41	740,00	18,50	45,00
20	94,86	39,01	19,15	4,95	5,42	745,00	19,40	45,00
21	95,15	38,87	19,22	4,95	5,46	749,00	21,10	45,00

Z grafu VA charakteristiky (Obr. 46) je zřejmé, že i velmi malé zastínění článku má na průběh této charakteristiky značný vliv. Při zastínění pouze  $\frac{1}{4}$  solárního článku (Měření č. 18) není pokles výkonu zásadní a zůstává na hodnotě cca 88 % z původního výkonu celého nezakrytého modulu. Ovšem již při zakrytí poloviny článku (Měření č. 19) se tato hodnota výkonu sníží na 67 %. Stejných hodnot měřený panel dosahoval při překrytí  $\frac{3}{4}$  (Měření č. 20) i celého článku (Měření č. 21). Dle teoretických předpokladů uvedených v kapitole 3.2.3. (Obr. 34) by mělo dojít k výraznému posunu bodu MPP (a tím ke snížení výkonu) až při zastínění článku ze  $\frac{3}{4}$ . To se však při mém měření nepotvrdilo a k posunu MPP došlo již při zastínění poloviny článku. Celkově se však potvrdilo, že i takto velice malé zastínění ovlivňuje výkon celého fotovoltaického panelu velkou měrou.

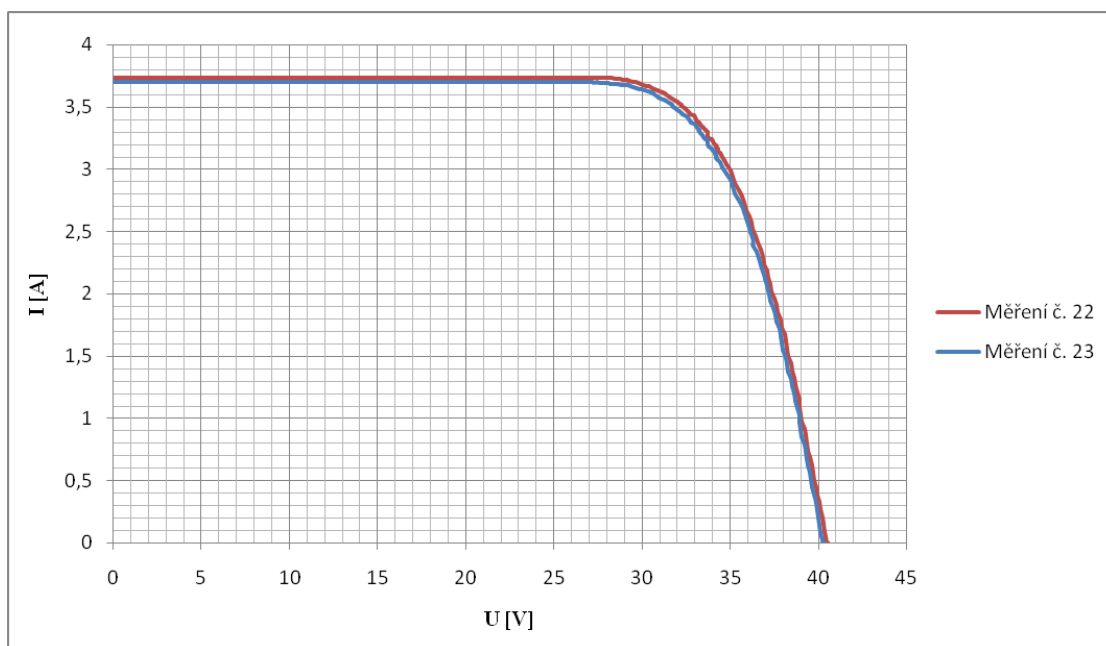
Tab. 10 Pokles výkonu při rozdílném zastínění

Číslo měření	$P_m$ [W]	Úroveň výkonu [%]
17	142,98	100,00
18	125,31	87,64
19	94,99	66,44
20	94,86	66,34
21	95,15	66,55

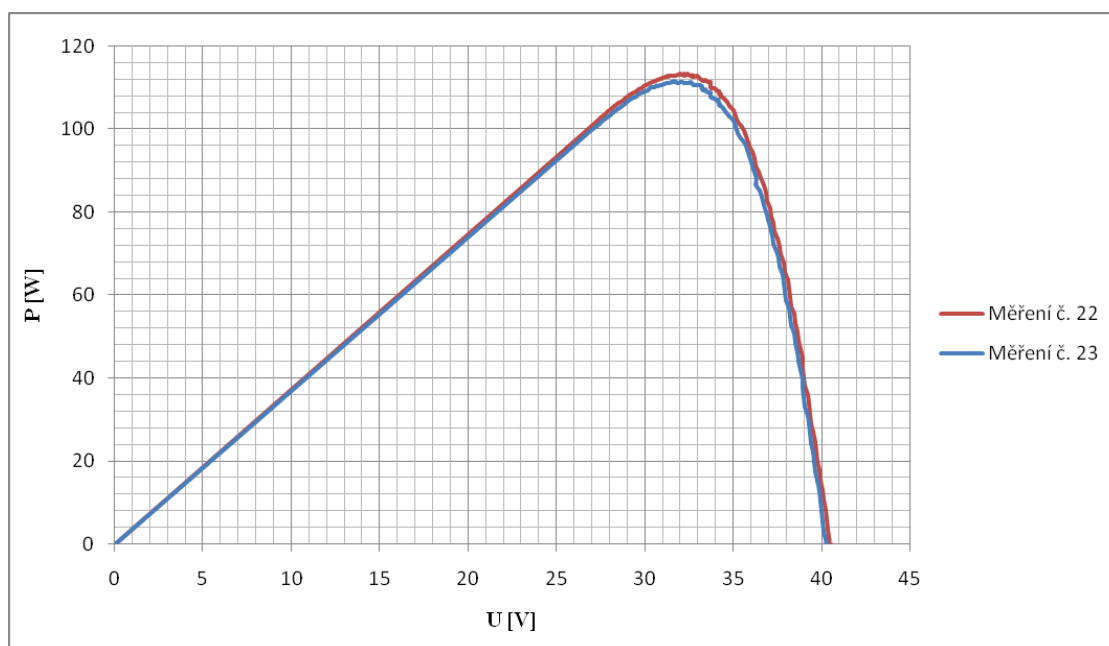
Jedním z případů částečného zakrytí panelů může být pokrytí solárního modulu ptačím trusem. Před jedním z mých měření se mi podařilo takovou situaci zachytit.



Obr. 48 Měřený fotovoltaický panel pokrytý ptačím trusem



Obr. 49 Vliv pokrytí panelu ptačím trusem na průběh voltampérové charakteristiky



Obr. 50 Vliv pokrytí panelu ptačím trusem na průběh výkonové charakteristiky

Tab. 11 Měření Vlivu pokrytí panelu ptačím trusem na průběh voltampérové charakteristiky

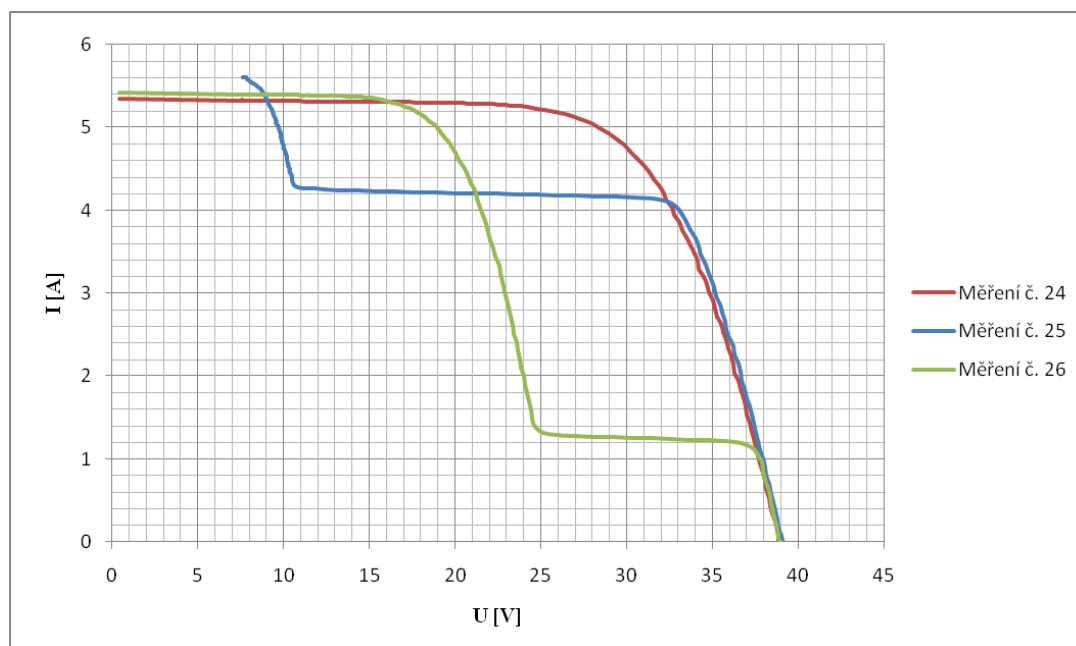
Číslo měření	$P_m$ [W]	$U_{oc}$ [V]	$U_m$ [V]	$I_m$ [A]	$I_{sc}$ [A]	Intenzita ozáření [ $W \cdot m^{-2}$ ]	Teplota [ $^{\circ}C$ ]	Fill Factor [%]
22	113,32	40,47	32,01	3,54	3,73	554,00	18,80	75,00
23	111,59	40,29	31,66	3,53	3,70	549,00	17,90	75,00

Pro účely porovnání je v grafech (Obr. 49 a 50) srovnána charakteristika čistého panelu (Měření č. 22) s charakteristikou modulu pokrytého ptačím trusem (Měření č. 23). Zajímavým výsledkem tohoto měření je fakt, že i tak malé znečištění modulu, jako v tomto případě, zapříčiní nepatrný (1,53 %) pokles výkonu. Na to, aby toto znečištění panelu ptačím trusem způsobilo deformaci průběhu VA charakteristiky je jeho úroveň příliš nízká.

Tab. 12 Pokles výkonu při pokrytí panelu ptačím trusem

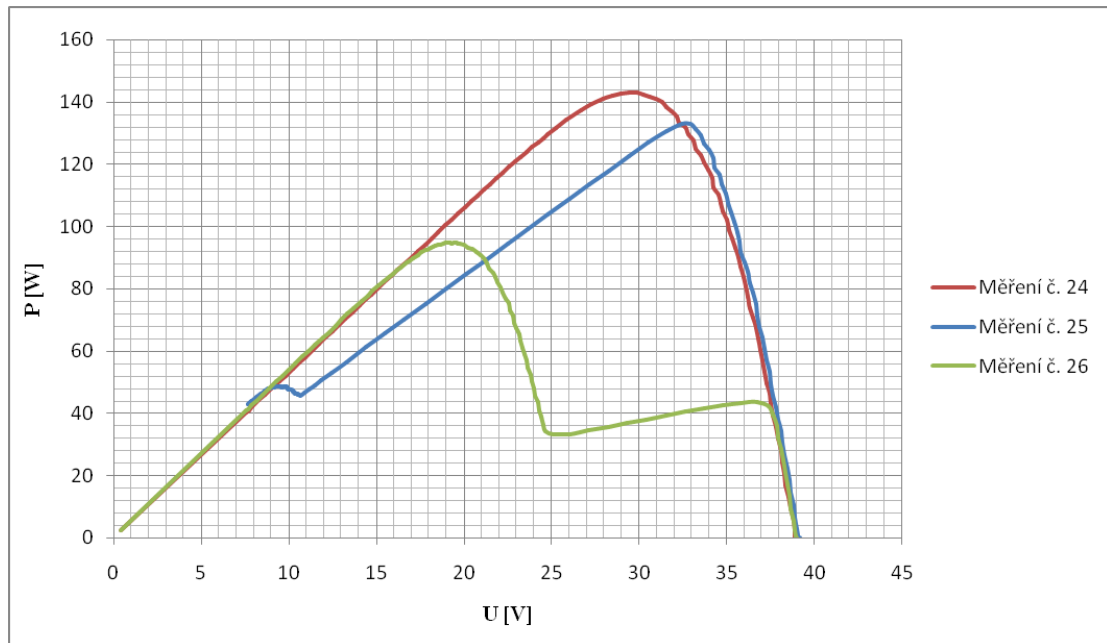
Číslo měření	$P_m$ [W]	Úroveň výkonu [%]
22	113,32	100,00
23	111,59	98,47

Inspirací dalšího měření byla teorie, podle které je z hlediska výkonu solárního panelu nižší ztrátou zastínění několika článků z menší části nežli jednoho z větší části. Pro ověření tohoto tvrzení jsem provedl následující měření.



Obr. 51 Vliv rozdílného rozložení zastínění na průběh voltampérové charakteristiky





Obr. 52 Vliv rozdílného rozložení zastínění na průběh výkonové charakteristiky

Tab. 13 Měření vlivu rozdílného rozložení zastínění na průběh voltampérové charakteristiky

Číslo měření	$P_m$ [W]	$U_{oc}$ [V]	$U_m$ [V]	$I_m$ [A]	$I_{sc}$ [A]	Intenzita ozáření [ $W \cdot m^{-2}$ ]	Teplota [ $^{\circ}C$ ]	Fill Factor [%]
24	142,98	38,96	29,44	4,86	5,34	731,00	17,40	69,00
25	132,97	39,10	32,44	4,10	5,61	786,00	19,00	61,00
26	94,86	39,01	19,15	4,95	5,42	745,00	19,40	45,00

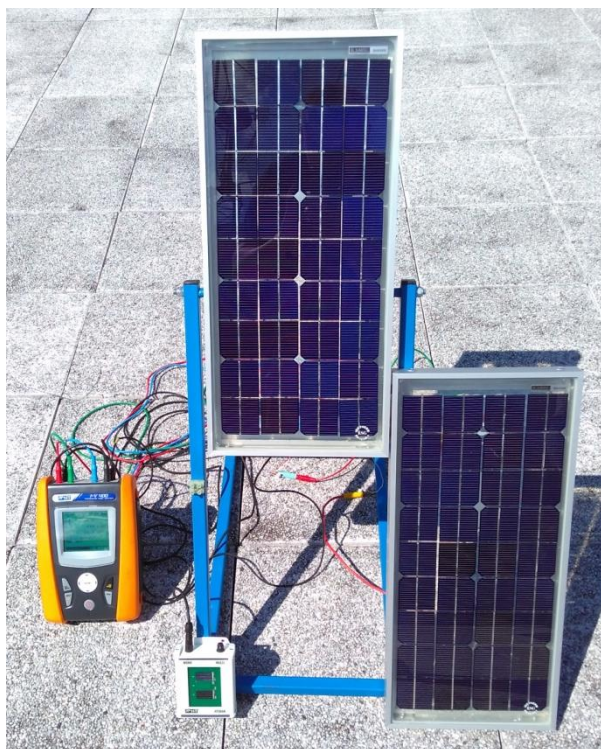
Měření č. 24 znázorňuje měřený solární modul bez zastínění. Abych mohl ověřit zmíněnou teorii, nejprve jsem provedl měření panelu při zakrytí  $\frac{1}{4}$  plochy na každém ze tří článků umístěných vedle sebe (Měření č. 25). Poté jsem měření opakoval, ovšem při zakrytí  $\frac{3}{4}$  jednoho článku (Měření č. 26). Při obou měřeních byla tedy zakryta stejně velká plocha (1,04 % z celkové plochy všech článků). Přesto se u měření č. 25 projevil mnohem menší pokles výkonu, než u měření č. 26 (Tab. 14). To dokazuje pravdivost ověřované teorie.

Tab. 14 Pokles výkonu při rozdílném rozložení zastínění

Číslo měření	$P_m$ [W]	Úroveň výkonu [%]
24	142,98	100,00
25	132,97	93,00
26	94,86	66,34

#### 4.2.5 Ověření funkce ochranné bypass diody ve fotovoltaickém panelu

Důvodem tohoto měření bylo otestování funkce ochranné bypass diody v solárním panelu. Tento úkon jsem provedl na dvou totožných solárních modulech STR 36-13 od výrobce Solartec. S tím rozdílem, že na jednom z panelů byla demontována bypass dioda. Tento modul je tvořen 36 monokrystalickými články zapojenými do série. Bypass dioda je v tomto případě instalována tak, aby překlenovala všech 36 fotovoltaických článků v panelu. Pro účely měření jsem oba panely spojil do série a umístil je pod úhlem 45°.



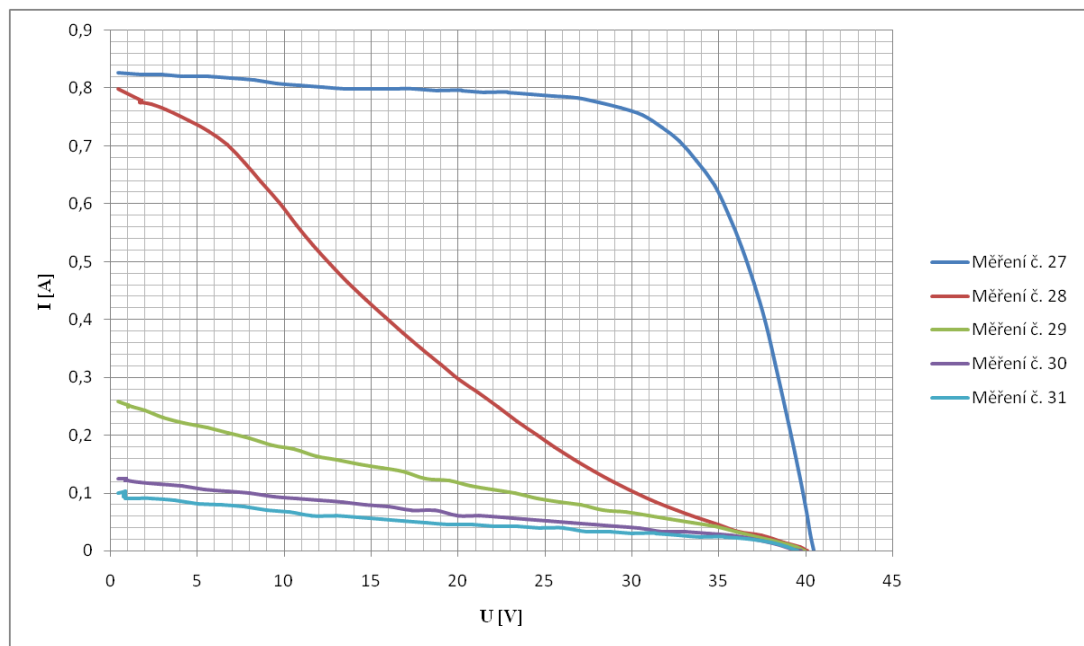
Obr. 53 Měřený systém tvořený sériově propojenými panely STR 36-13

Tab. 15 Technické parametry fotovoltaického panelu STR 36-13

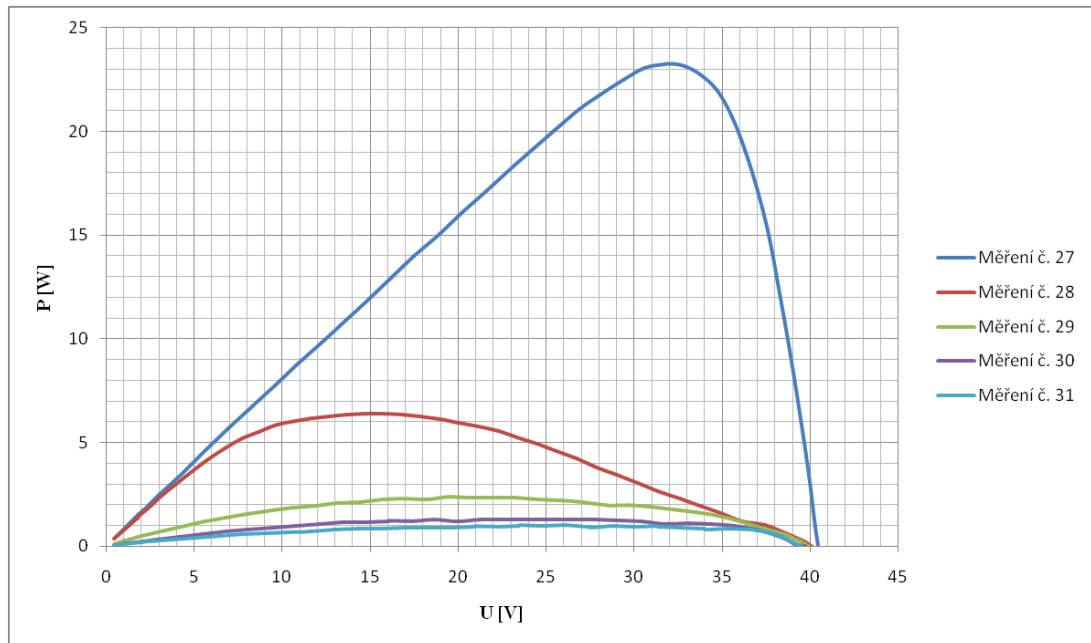
Rozměry panelu [mm]	527x243x40
Hmotnost [kg]	1,9
Typ článků [-]	Monokrystalické
Počet článků [ks]	36
$P_m$ [W]	13
$I_m$ [A]	0,75
$I_{sc}$ [A]	0,82
$U_m$ [V]	17,4
$U_{oc}$ [V]	21,5

Nejprve jsem, podobně jako u předchozích měření, simuloval zastínění či poškození článků neprůhlednou destičkou na solárním panelu s demontovanou obtokovou diodou:

- Měření č. 27 - bez zastínění (zakryto 0 % z celkové plochy článků)
- Měření č. 28 - zastíněn jeden článek (2,78 %)
- Měření č. 29 - zastíněny dva články vedle sebe (5,56 %)
- Měření č. 30 - zastíněny tři články vedle sebe (8,33 %)
- Měření č. 31 - zastíněny čtyři články vedle sebe (11,11 %)



Obr. 54 Vliv zastínění fotovoltaického panelu bez bypass diody na průběh voltampérové charakteristiky



Obr. 55 Vliv zastínění fotovoltaického panelu bez bypass diody na průběh výkonové charakteristiky

Tab. 16 Měření vlivu zastínění fotovoltaického panelu bez bypass diody na průběh výkonové charakteristiky

Číslo měření	$P_m$ [W]	$U_{oc}$ [V]	$U_m$ [V]	$I_m$ [A]	$I_{sc}$ [A]	Intenzita ozáření [ $W \cdot m^{-2}$ ]	Teplota [ $^{\circ}C$ ]	Fill Factor [%]
27	23,23	40,44	31,73	0,73	0,83	802,00	25,40	69,00
28	6,39	40,04	14,72	0,43	0,80	806,00	25,20	20,00
29	2,36	39,89	19,51	0,12	0,26	805,00	25,20	23,00
30	1,29	39,73	23,87	0,05	0,13	812,00	25,40	26,00
31	1,02	39,47	26,08	0,04	0,10	809,00	25,90	26,00

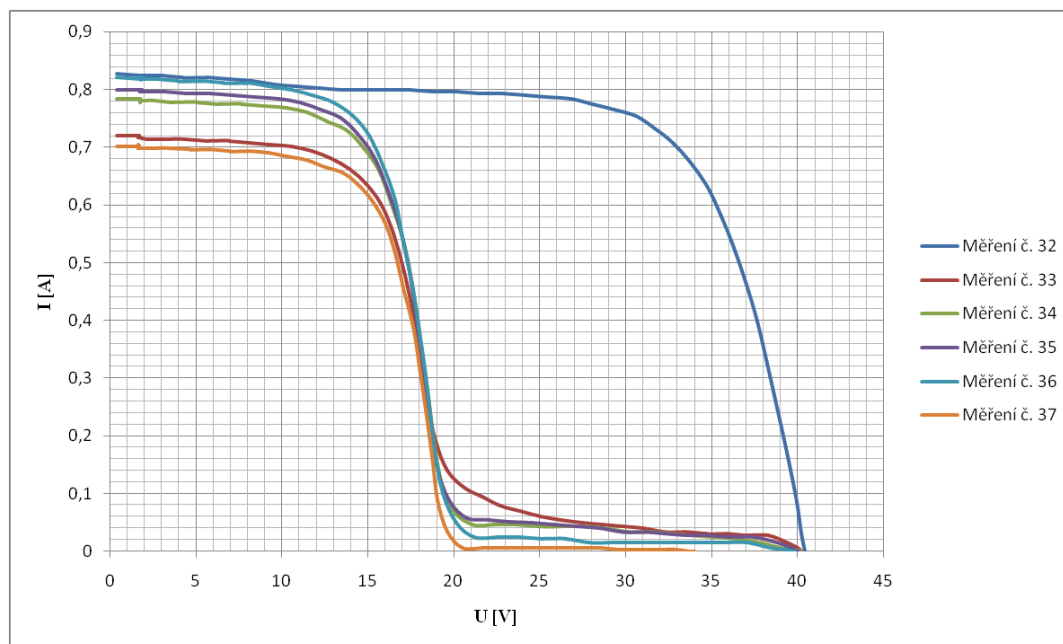
Z naměřených hodnot je patrné, že při zastínění solárního panelu bez ochranné bypass diody zapojeného do série s dalším panelem vybaveným bypass diodou dochází k významnému poklesu výkonu celého systému. To je způsobeno značným omezením průchodu proudu zastíněným článkem. Při zakrytí pouze jednoho článku (Měření č. 28) se úroveň výkonu ještě pohybovala na hodnotě 28 % z původního výkonu, ovšem při odstavení čtyř článků vedle sebe (Měření č. 31) klesla hodnota až na pouhé 4 %. Po zakrytí dalšího článku již analyzátor I-V 400 nereagoval, z důvodu příliš nízké hodnoty proudu. Projevilo se tedy, že při zastínění více než jednoho článku solárního panelu bez bypass diody je prakticky vyřazen celý systém dvou sériově spojených modulů.

Tab. 17 Pokles výkonu při zastínění fotovoltaického panelu bez bypass diody

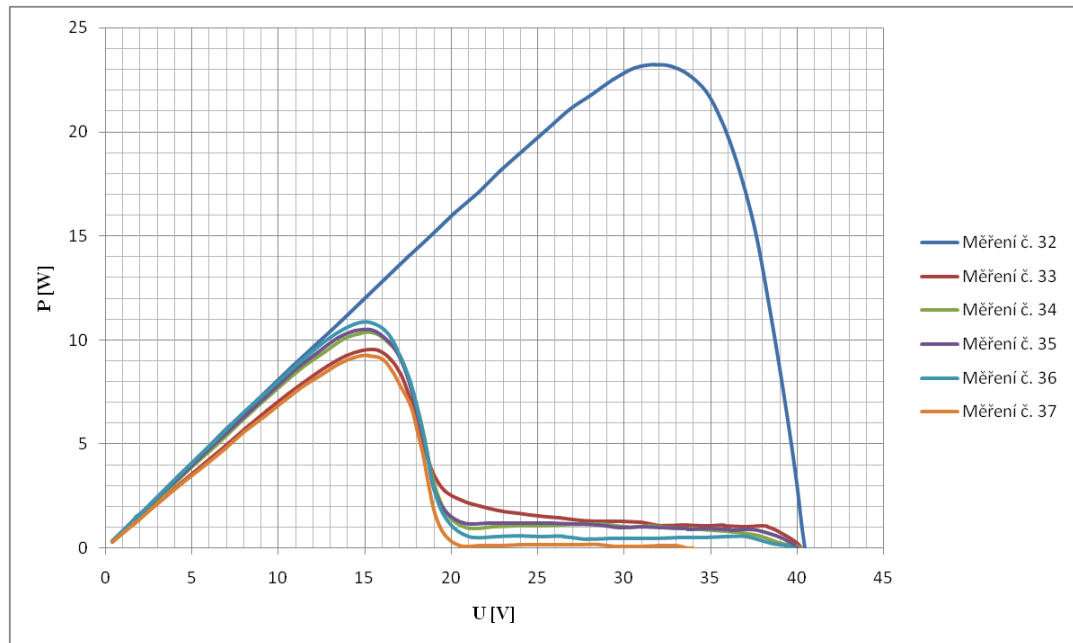
Číslo měření	$P_m$ [W]	Úroveň výkonu [%]
27	23,23	100,00
28	6,39	27,51
29	2,36	10,16
30	1,29	5,55
31	1,02	4,39

Poté jsem měření opakovl, ovšem nyní jsem test zakrýváním provedl u solárního panelu s osazenou ochranou bypass diodou. Postupoval jsem podobně jako při předešlé variantě:

- Měření č. 32 - bez zastínění (zakryto 0 % z celkové plochy článků)
- Měření č. 33 - zastíněn jeden článek (2,78 %)
- Měření č. 34 - zastíněny dva články vedle sebe (5,56 %)
- Měření č. 35 - zastíněny tři články vedle sebe (8,33 %)
- Měření č. 36 - zastíněny čtyři články vedle sebe (11,11 %)
- Měření č. 37 - zastíněn celý panel (100 %)



Obr. 56 Vliv zastínění fotovoltaického panelu s bypass diodou na průběh voltampérové charakteristiky



Obr. 57 Vliv zastínění fotovoltaického panelu s bypass diodou na průběh výkonové charakteristiky

Tab. 18 Měření vlivu zastínění fotovoltaického panelu s bypass diodou na průběh výkonové charakteristiky

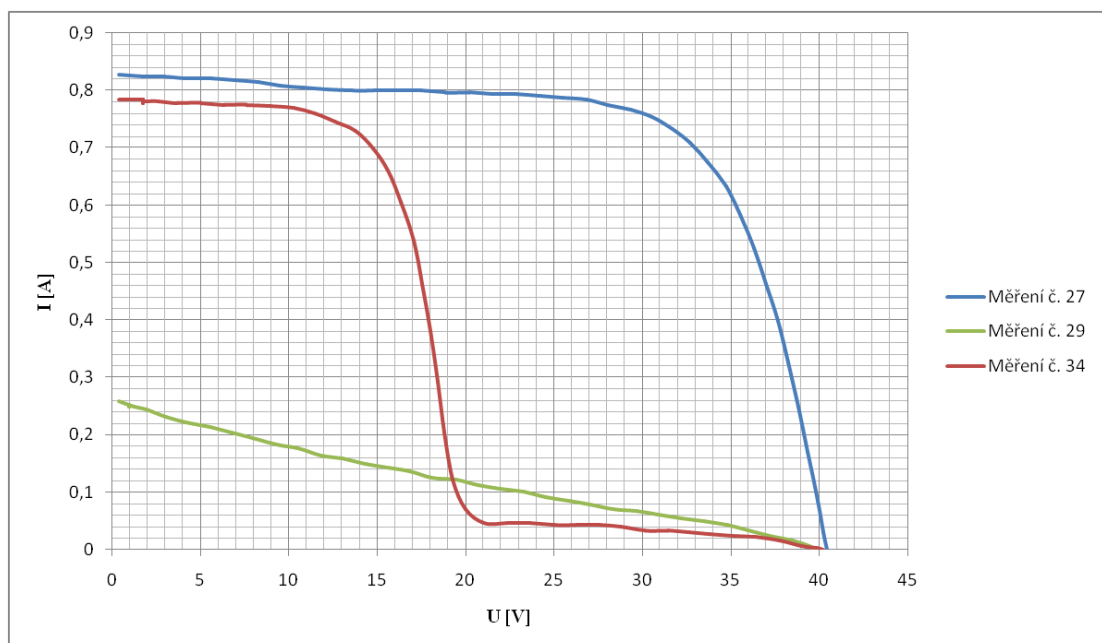
Číslo měření	$P_m$ [W]	$U_{oc}$ [V]	$U_m$ [V]	$I_m$ [A]	$I_{sc}$ [A]	Intenzita ozáření [ $W \cdot m^{-2}$ ]	Teplota [ $^{\circ}C$ ]	Fill Factor [%]
32	23,23	40,44	31,73	0,73	0,83	802,00	25,40	69,00
33	9,49	40,24	15,79	0,60	0,72	698,00	24,50	33,00
34	10,33	40,23	14,79	0,70	0,78	764,00	24,60	33,00
35	10,49	40,03	15,36	0,68	0,80	779,00	24,70	33,00
36	10,86	39,83	15,08	0,72	0,82	797,00	24,90	33,00
37	9,24	34,01	15,22	0,61	0,70	684,00	27,40	39,00

U všech změřených variant zakrytí solárního panelu s bypass diodou se snížila hodnota výkonu celého systému přibližně o 50 %. U měření č. 33 a 37 se objevily jisté odchylky. To je způsobeno mírně nižší úrovní intenzity dopadajícího slunečního záření na daný systém než při ostatních měřeních. Je ovšem zřejmé, že již při vyřazení jednoho článku (Měření č. 33) zkoumaného panelu se projeví funkce bypass diody, která přemostí celý tento panel (36 článků). Stejný efekt má pak i úplné zastínění zmíněného solárního panelu (Měření č. 37). Toto měření jasně ukázalo, jak důležitou funkci ochranná bypass dioda plní, díky její reakci je v tomto případě celý systém schopen dodávat alespoň poloviční výkon, na rozdíl od předchozí situace bez bypass diody, kde celkový výkon při zakrytí markantně klesl.

Tab. 19 Pokles výkonu při zastínění fotovoltaického panelu s bypass diodou

Číslo měření	$P_m$ [W]	Úroveň výkonu [%]
32	23,23	100,00
33	9,49	40,85
34	10,33	44,47
35	10,49	45,16
36	10,86	46,75
37	9,24	39,78

Pro lepší srovnání, jsou v následujícím grafu (Obr. 58) porovnány VA charakteristiky při zastínění dvou článků na solárním panelu bez bypass diody (Měření č. 29), oproti modulu s osazenou diodou (Měření č. 34). Měření č. 27 představuje charakteristiku měřeného systému bez zastínění.



Obr. 58 Srovnání voltampérových charakteristik při zastínění dvou článků

#### 4.2.6 Zhodnocení metody sledování FVE pomocí VA charakteristik

Měřením se prokázalo, že díky deformaci tvaru VA charakteristiky lze snadno objevit vadný článek v měřeném fotovoltaickém panelu (Obr. 43). Z naměřené charakteristiky lze také poměrně snadno vyčíst pravděpodobný rozsah poškození. Odstavení celé vodorovné řady článků solárního modulu (situovaného na výšku) má za následek pokles výkonu o 98,68 %, to prakticky znamená vyřazení celého fotovoltaického panelu

Dokonce i jen z části zastíněný či poškozený článek se na změně průběhu této charakteristiky projevil (Obr. 46). Zastínění pouhých 0,35 % z celkové plochy solárních článků v panelu zapříčinilo pokles výkonu modulu na 88 %, vůči původnímu výkonu bez zastínění. Což nelze považovat za zanedbatelné. Ovšem lehké znečištění měřeného panelu ptačím trusem (Obr. 49) se ukázalo jako nedostatečné pro to, aby bylo touto metodou analýzy VA charakteristik zjištělné. Situace, jako je pokrytí panelu ptačím trusem, prachem, listy stromů či jiným znečištěním, mohou při provozních podmínkách nastat poměrně často, proto je třeba myslet na to, že i takto nepatrná zastínění mohou mít na výkon fotovoltaického systému značný vliv.

Dalším zjištěním byl jasně čitelný rozdíl průběhu voltampérové charakteristiky při zastínění solárního panelu vybaveného bypass diodou, oproti modulu bez ochranné bypass diody (Obr. 58). Měření těchto sériově spojených modulů dokázalo, jak velmi důležitou funkci bypass dioda v solárním modulu plní.

Celkově se metoda měření a následné analýzy voltampérových charakteristik projevila jako velice užitečná a platná k odhalení vadných či poškozených článků ve zkoumaném solárním panelu. Jednou z výhod metody je to, že je prováděna přímo na místě instalace solárního panelu bez nutnosti jeho demontování z nosné konstrukce. Touto metodou lze efektivně odhalit odchylky od běžného stavu a s velkou pravděpodobností i určit rozsah zastínění či poškození. Analýzou VA charakteristik ovšem nelze detekovat přesnou polohu případného vadného článku, ani příčinu jeho poškození. Proto doporučuji tuto metodu kombinovat například s termovizní diagnostikou.



## 5 Závěr

Hlavním tématem teoretické části této práce jsou vlastnosti a parametry fotovoltaických článků a panelů. V první řadě je zde popsán princip samotného solárního článku, včetně náhradního schématu. Dále jsou uvedeny různé generace článků. Práce obsahuje přehled nejpoužívanějších technologií fotovoltaických článků a jejich vlastností. Nejběžnější typy článků jsou porovnány v přehledné tabulce. Hlavním bodem teoretické části je shrnutí parametrů fotovoltaických článků. Především je uveden vliv těchto parametrů na průběh voltampérové charakteristiky. Zmíněny jsou také další faktory ovlivňující tuto charakteristiku (teplota, intenzita ozáření, zastínění).

Cílem praktické části této diplomové práce bylo navrhnout a ověřit měřením metodu sledování parametrů solárního panelu pomocí VA charakteristik. Prvním krokem k návrhu bylo porovnání metody měření charakteristik pomocí voltmetru a ampérmetru s měřením solárním analyzátozem I-V 400. Z tohoto srovnání vyplynulo, že vhodnější metodou je měření analyzátozem, které se jeví jako efektivnější, přesnější a rychlejší. Dalším krokem bylo ověření metody měřením a následná analýza VA charakteristik. Pro účely ověření byly postupně simulovány na měřených panelech Volther PowerVolt 190/500 a STR 36-13 různé situace, jako např. poškození článku a znečištění panelu. Výsledky měření jsou uvedeny a vyhodnoceny v kapitole 4.2. Veškeré naměřené hodnoty a charakteristiky jsou uloženy na přiloženém CD.

Měření dokázalo, že zmíněné situace se na průběhu voltampérové charakteristiky projeví a lze tak dle rozsahu deformace tvaru charakteristiky odhalit případnou vadu solárního článku, ale zároveň i pravděpodobný rozsah poškození. Měřením se tedy potvrdilo, že metoda měření a analýzy VA charakteristik je velice platná k odhalení vadných článků ve zkoumaném solárním modulu a také k přesnějšímu určení rozsahu poškození.

## 6 Seznam literatury a informačních zdrojů

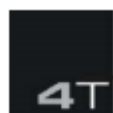
- [1] LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. *Fotovoltaika: teorie i praxe využití solární energie*. Praha: Ilsa, 2009, 160 s. ISBN 978-80-904311-0-2.
- [2] BROŽ, Karel a Bořivoj ŠOUREK. *České vysoké učení technické. Fakulta strojní. Alternativní zdroje energie*. Praha: ČVUT, 2003, 213 s. ISBN 80-010-2802-X.
- [3] MURTINGER, Karel a Jan TRUXA. *Solární energie pro váš dům*. Brno: Computer Press, 2010, 107 s. ISBN 978-80-251-3241-8.
- [4] HENZE, Andreas. *Elektrický proud ze slunce: Fotovoltaika v praxi : technika, přehled trhu, návody ke stavbě*. Ostrava: HEL, 2000, 129 s. ISBN 80-861-6712-7.
- [5] HASELHUHN, Ralf. *Fotovoltaika: Budovy jako zdroj proudu*. Ostrava: HEL, 2010, 176 s. ISBN 978-80-86167-33-6.
- [6] KAMINSKÝ, Jaroslav a Mojmír VRTEK. *Obnovitelné zdroje energie*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 1999, 96 s. ISBN 80-707-8445-8.
- [7] CIHELKA, Jaromír a Wagnerová DENISA. *Solární tepelná technika*. Praha: T. Malina, 1994, 203 s. ISBN 80-900-7595-9.
- [8] BĚLÍK, Milan. *Přednášky z předmětu KEE/SOES* [online]. [cit. 2016-05-08]. FEL ZČU Plzeň. Dostupné z: <http://home.pilsfree.net/fantom/FEL/SOES/>
- [9] KUSALA, Jaroslav. *ČEZ. Miniencyklopedie Solární energie* [online]. Simopt, 2013 [cit. 2016-05-09]. ISBN 978-80-87851-16-6. Dostupné z: [https://www.cez.cz/edee/content/miniencyklopedie/7\\_miniencyklopedie\\_solarni\\_energie/cs/index.html#aueb200b0](https://www.cez.cz/edee/content/miniencyklopedie/7_miniencyklopedie_solarni_energie/cs/index.html#aueb200b0)
- [10] BANNERT, Petr. *VOŠ a SPŠE Varnsdorf. Praktika z fotovoltaiky* [online]. 2012 [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: [http://is.muni.cz/el/1441/jaro2012/FY2BP\\_EkO/um/praktika\\_z\\_fotovoltaiky.pdf](http://is.muni.cz/el/1441/jaro2012/FY2BP_EkO/um/praktika_z_fotovoltaiky.pdf)
- [11] MASTNÝ, Petr. *Obnovitelné zdroje elektrické energie* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 257 s. [cit. 2016-05-09]. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [12] BENDA, Vítězslav, Kamil STANĚK a Petr WOLF. *Ústav automatizace a měřicí techniky VUT v Brně. Fotovoltaické systémy* [online]. Brno, 2011, 60 s. [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: [http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura\\_04\\_1104.pdf](http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_04_1104.pdf)
- [13] DOLEŽAL, Martin. *Solární energie* [online]. Tábor: Střední průmyslová škola strojní a stavební Tábor, 2013, 106 s. [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: [http://zelenymost.cz/files/solarni\\_energie.pdf](http://zelenymost.cz/files/solarni_energie.pdf)

- [14] CHMEL, Ladislav a Ivo HAMERNÍK. Střední průmyslová škola elektrotechnická a informačních technologií Brno. *Fotovoltaika, fototermika* [online]. 2015 [cit. 2016-05-09]. ISBN 978-80-88058-02-1. Dostupné z: <https://publi.cz/books/91/Cover.html>
- [15] BOUŠEK, Jaroslav. *Fotovoltaické články ve 21. století: Výzva pro rozvoj elektrotechnologie* [online]. Brno: VUTIUM, 2009, 38 s. [cit. 2016-05-09]. ISBN 978-80-214-3904-7. Dostupné z: <http://www.vutium.vutbr.cz/titul/pdf/obsah/978-80-214-3904-7.pdf>
- [16] KOSTKA, Tomáš. *Fotovoltaické systémy: Úvod do problematiky* [online]. 2015, 20 s. [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: [http://www.outechhavirov.cz/skola/files/knihovna\\_eltech/ee/fvs\\_uvod.pdf](http://www.outechhavirov.cz/skola/files/knihovna_eltech/ee/fvs_uvod.pdf)
- [17] TICHÝ, Jaroslav. *Využití fotovoltaických článků k přímému napájení železničních vozidel* [online]. Pardubice, 2011 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: [https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/38892/TichyJ\\_VyuzitiFotovoltaickych\\_RD\\_2011.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/38892/TichyJ_VyuzitiFotovoltaickych_RD_2011.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Diplomová práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera. Vedoucí práce Radovan Doleček.
- [18] KLADIVA, Roman. *Dlouhodobé sledování parametrů fotovoltaických panelů* [online]. Brno, 2013 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=68659](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=68659). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Roman Gvritshvili.
- [19] CHOCHOLÁČ, Jan. *Využití bypassových diod ve fotovoltaických panelech* [online]. Brno, 2011 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=39536](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=39536). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Petr Křivík.
- [20] KOUDELOVÁ, Marta. *Prvkové složení fotovoltaických panelů* [online]. Praha, 2015 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: [file:///C:/Users/Ondra/Downloads/BPTX\\_2014\\_1\\_11310\\_0\\_387502\\_0\\_159313.pdf](file:///C:/Users/Ondra/Downloads/BPTX_2014_1_11310_0_387502_0_159313.pdf). Bakalářská práce. Univerzita Karlova v Praze. Vedoucí práce Ondřej Šebek.
- [21] Diagnostika fotovoltaických panelů. *AIOLOS S.R.O.* [online]. [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <http://www.vaseenergie.cz/termovizni-mereni/termovizni-diagnostika-fotovoltaiky/>
- [22] PV test - diagnostická laboratoř. *Solartec* [online]. [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <http://www.solartec.eu/rozsahle-instalace/provozovani-fve-elektren/pv-test-diagnosticka-laborator>

- [23] Jakou fotovoltaickou elektrárnu zvolit na dům? *TechPark* [online]. [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <http://www.solartechnika.sk/solartechnika-12011/jakou-fotovoltaickou-elektrarnu-zvolit-na-dum.html>
- [24] Nové technologie pro levné i výkonné solární články. *AutomatizaceHW* [online]. [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/nove-technologie-pro-levne-i-vykonne-solarni-clanky>
- [25] Historie a perspektivy OZE - fotovoltaika, méně rozšířené technologie. *Tyzbinfo* [online]. [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/5517-historie-a-perspektivy-oze-fotovoltaika-mene-rozsirene-technologie>
- [26] FVE Panel. *General Energy a.s.* [online]. [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <http://www.stresniinstalace.cz/fotovoltaika/fve-panel/>
- [27] Umístění fotovoltaických systémů. *VZT.Art* [online]. [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <http://www.vzart.cz/umisteni-fotovoltaickych-systemu/>
- [28] Monocrystalline solar panels. *RemonSolar* [online]. [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <http://www.remonsolar.com/56-243-thickbox/130w-150w-monocrystalline-solar-panels.jpg>
- [29] Module technologies for highefficiency solar cells: The move away from powerful engines in old-fashioned car bodies. *PVTech* [online]. [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <http://www.pv-tech.org/technical-papers/module-technologies-for-highefficiency-solar-cells-the-move-away-from-power>
- [30] PN přechod. *Elektronika* [online]. [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <http://www.spsemoh.cz/vyuka/zel/>
- [31] Fotovoltaický jev, fotovoltaické články a jejich charakteristiky. *SlidePlayer* [online]. [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/3370736/>
- [32] Thin film solar panels. *BlueSolaria* [online]. [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <http://www.bluesolaria.com/3.8V-30%CE%BCA-Amorphous-Silicon-Solar-Cell.html>
- [33] Diagnostika FV Modulů a FVE. *Abot* [online]. [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <http://www.abot.cz/cs/sluzby/diagnostika-fv-modulu-a-fve#va-charakteristika>
- [34] HT I-V 400 Photovoltaic installation testers. *RFE* [online]. [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <http://rfe.ie/product/ht-i-v-400-photovoltaic-installation-testers/>
- [35] HT INSTRUMENTS. *Uživatelský manuál analyzátoru I-V400*. 2010, 80 s. Dostupné také z: <http://www.ht-instruments.com/>

## 7 Přílohy

### Příloha A – Katalogový list fotovoltaického panelu Volther PowerVolt 190/500



**4T, a.s. - Průmyslová 566/5, 108 00 Praha 10, Česká republika**

DIČ: CZ27135641, spisová značka: B 9233 vedená u rejstříkového soudu v Praze

provozovna : 4T, a.s. - Vančurova 113, 277 13 Kostelec nad Labem

T: +420.326.734.964, F: 326.734.965, E: info@4T.cz, www.4T.cz

ISO 9001: 2000

NÁZEV ZBOŽÍ : Hybridní kolektor

ČÍSLO ZBOŽÍ : SO190500

TYP : Powervolt 190/500

**POPIS :** Deskový hybridní kolektor pro současnou výrobu tepelné i elektrické energie, plášť z Al, trubky a absorber z Cu, povrch absorberu Monokrystalický, vhodný pro celoroční provoz.  
Powervolt výkon – FVE 190 Wp, Termika 500 W / 1 kolektor

	Volther kolektor hybridní	Volther kolektor hybridní
Typ	Powervolt 190/500	Powertherm 170/750
Rozměry	828x1655x90 mm	860x1660x105 mm
Váha	24 kg	34,4 kg
Obsah kapaliny	1,2 l	1,2 l
Absorber	Monokrystalický	Monokrystalický
Počet článků	72	72
Rozměry článků	125x125 mm	125x125 mm
Nominální výkon	190 W	170
Nominální proud	5,2 A	5,2 A
Zkratový proud	5,6 A	5,6 A
Optimální provozní napětí	36,5V	36,5V
Napětí na prázdko	45,2V	45,2V
Teplotní výměník	Měď	Měď
Vnitřní potrubí	Měď	Měď
Průtok	65 l/h	65 l/h
Zkušební tlak (bar)	20	20
Provozní tlak (bar)	10	10
Vreční sklo	PV sklo	Extra Solar sklo
Těsnění	EPDM&Silicon	EPDM & Silisyum
Maximální teplota	<110 °C	<110 °C
Rám	Hliník	Hliník
Zadní strana	Hliník	Hliník
Záruka	10 let	10 let
Záruka výkonu	90% < 10 let	90% < 10 let
Záruka účinnosti	80% < 20 let	90% < 20 let



Radiace	1000	W/m2	$\eta$
$\Delta T \leq 10^\circ\text{C}$	$Q=55 \text{ l/h/m}^2$		
T out	Wh/m2	Wh/m2	Wh/m2
10°C	>680	146,00	>82,0%
20°C	680	138	81%
40°C	557	123	68%
60°C	475	108	58%
80°C	370	96	46%

- PRVNÍ SOLÁRNÍ VELKOOBCHOD V ČECHÁCH -

solární ohřev vody a bazénů - akumulace tepla z více zdrojů - inteligentní řízení spotřeby vody - bezztrátová úprava teplé vody

## Příloha B – Katalogový list fotovoltaického panelu STR 36-13

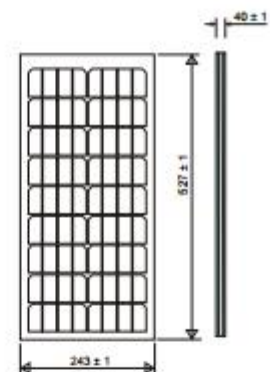
## Fotovoltaické panely

## STR 36 - 1x



## KONSTRUKČNÍ ÚDAJE

FV články	Mono krystalický křemík (Si), strukturovaný a antireflexně vrstvený (51,2 x 51,2)
Čelní strana	Jednovrstvě bezpečnostní, tvrzené sklo se zdokonalenou světelnou propustností
Laminace	EVA fólie (etylen-vinyl-acetát)
Zadní strana	teďar
Rám	eloxovaný hliník
Teplota prostředí	od - 40°C do + 85°C
Konektorová krabice	IP s vestavěnou diodou
Spojovací svorka	s příslušným šroubem
Doporučený průřez vodiče	4 - 10 mm <sup>2</sup>



ELEKTRICKÉ PARAMETRY (1000W/m <sup>2</sup> , 25°C, AM 1,5)	STR 36 - 14	STR 36 - 13	STR 36 - 12
Nominální napětí (V <sub>n</sub> )	12 V	12 V	12 V
Max. výkon (P <sub>max</sub> )	14 Wp ± 5%	13 Wp ± 5%	12 Wp ± 5%
Proud nakrátko (I <sub>sc</sub> )	0,83 A	0,82 A	0,81 A
Napětí naprázdno (V <sub>oc</sub> )	21,5 V	21,5 V	21,5 V
Proud v P <sub>mp</sub> (I <sub>max</sub> )	0,76 A	0,75 A	0,73 A
Napětí v P <sub>mp</sub> (V <sub>max</sub> )	17,8 V	17,4 V	17,1 V

## MECHANICKÉ PARAMETRY

Rozměry ( v x š x tl )	527 x 243 x 40 mm
Hmotnost	1,9 kg
Počet článků v seri	36 x 1 / 4 FV článku
Počet článků paralelně	1

## POSKYTNUTÉ ZÁRUKY

Elektrický výkon	20 let
Mechanické vlastnosti	2 roky



## Příloha C – Katalogový list solárního analyzátoru I-V 400

**I-V 400**

Rel 1.06 – 09/07/10

**Multifunctional meter for I-V curve test on PV panels**

Pag 3 of 4

**2. ELECTRICAL SPECIFICATIONS (\*)**Accuracy is calculated as  $\pm$  [% reading + (number of dgts) x resolution] at 23°C  $\pm$  5°C, <80%HR**VDC VOLTAGE**

Range (V)	Resolution (V)	Accuracy
5.0 ÷ 999.9	0.1	$\pm(1.0\%rdg+2dgt)$

(\*) The I-V curve and Rs measurements start for VDC &gt; 15V and the accuracy is defined for VDC &gt; 20V

**IDC CURRENT (by internal sensor) – Detection of I-V Curve**

Range (A)	Resolution (A)	Accuracy
0.10 ÷ 10.00	0.01	$\pm(1.0\%rdg+2dgt)$

**MAX POWER (@ Vmpp >30V, Impp >2A)**

Range (W)	Resolution (W)	Accuracy
50 ÷ 9999	1	$\pm(1.0\%rdg+6dgt)$

Vmpp = voltage on point of maximum power ; Impp = current on point of maximum power

**IRRADIANCE (with reference cell HT304)**

Range (mV)	Resolution (mV)	Accuracy
1.0 ÷ 100.0	0.1	$\pm(1.0\%rdg+5dgt)$

**TEMPERATURE OF CELL (with PT300N probe)**

Range (°C)	Resolution (°C)	Accuracy
-20.0 ÷ 100.0	0.1	$\pm(1.0\%rdg+1^{\circ}C)$

(\*) Technical specifications can be modified without advise

## Příloha D – Výchozí naměřené hodnoty (Tab. 5, 6)

	Nmod	Pmax	Voc	Vmpp	Impp	Isc Irradiance	Module Temp.	FF	Temp	alpha	beta	tol+	tol-
Meas. 1 - POWERVOLT													
23. 5. 2000 21:45													
1 Measures@OPC	1	OK* (0,86%)	38,91	29,44	4,86	5,34	732	16,8	AUX	0	-0,33	5	5
1 STC	1	191,63	38,55	29,27	6,55	7,30	1000	25,0	AUX	0	-0,33	5	5
1 Nominal	1	190,00	45,20	36,50	5,19	5,59	1000	25,0	AUX	0	-0,33	5	5
Meas. 3 - POWERVOLT													
23. 5. 2000 21:46													
3 Measures@OPC	1	OK* (1,38%)	38,94	29,44	4,86	5,34	732	18,1	AUX	0	-0,33	5	5
3 STC	1	192,63	38,74	29,01	6,64	7,30	1000	25,0	AUX	0	-0,33	5	5
3 Nominal	1	190,00	45,20	36,50	5,19	5,59	1000	25,0	AUX	0	-0,33	5	5
Meas. 38 - POWERVOLT													
24. 5. 2000 0:33													
38 Measures@OPC	1	Not Ok* (8,59%)	38,11	28,80	5,18	5,92	758	31,9	AUX	0	-0,33	5	5
38 STC	1	206,33	39,61	29,76	6,93	7,81	1000	25,0	AUX	0	-0,33	5	5
38 Nominal	1	190,00	45,20	36,50	5,19	5,59	1000	25,0	AUX	0	-0,33	5	5
Meas. 160 - POWERVOLT													
21. 10. 2015 11:40													
160 Measures@OPC	1	Not Ok (21,84%)	39,20	32,44	1,46	1,58	217	16,8	AUX	0	-0,33	5	5
160 STC	1	47,51	41,57	34,22	6,77	7,31	1000	25,0	AUX	0	-0,33	5	5
160 Nominal	1	190,00	45,20	36,50	5,19	5,59	1000	25,0	AUX	0	-0,33	5	5
Meas. 184 - POWERVOLT													
1. 1. 2000 0:18													
184 Measures@OPC	1	Not Ok (18,53%)	40,31	32,23	3,42	3,64	495	18,6	AUX	0	-0,33	5	5
184 STC	1	110,07	41,10	32,61	6,91	7,36	1000	25,0	AUX	0	-0,33	5	5
184 Nominal	1	225,20	41,10	36,50	5,19	5,59	1000	25,0	AUX	0	-0,33	5	5
Meas. 228 - POWERVOLT													
20. 5. 2000 1:33													
228 Measures@OPC	1	Not Ok (20,59%)	43,70	35,01	5,17	5,70	742	7,7	AUX	0	-0,33	5	5
228 STC	1	180,86	41,93	32,92	6,96	7,68	1000	25,0	AUX	0	-0,33	5	5
228 Nominal	1	229,12	41,93	36,50	5,19	5,59	1000	25,0	AUX	0	-0,33	5	5



**Příloha E – Výchozí naměřené hodnoty (Tab. 7) – Část 1**

	Nmod	Pmax	Voc	Vmpp	Impp	Isc Irradiance	Module Temp.	FF	Temp	alpha	beta	tol+	tol-
Meas. 2 - POWERVOLT													
23. 5. 2000 21:46													
2 Measures@OPC	1	Ok* (1,18%)	38,96	29,44	4,86	5,34	731	69	AUX	0	-0,33	5	5
2 STC	1	142,98	38,69	29,36	6,55	7,30	1000	68	AUX	0	-0,33	5	5
2 Nominal	1	190,00	45,20	36,50	5,19	5,59	1000	75	AUX	0	-0,33	5	5
Meas. 10 - POWERVOLT													
23. 5. 2000 21:55													
10 Measures@OPC	1	Not Ok (-33,29%)	38,87	19,22	4,95	5,46	749	45	AUX	0	-0,33	5	5
10 STC	1	95,15	39,02	19,18	6,61	7,29	1000	45	AUX	0	-0,33	5	5
10 Nominal	1	126,74	45,20	36,50	5,19	5,59	1000	75	AUX	0	-0,33	5	5
Meas. 12 - POWERVOLT													
23. 5. 2000 21:57													
12 Measures@OPC	1	Not Ok (-34,42%)	38,77	19,44	4,94	5,50	754	45	AUX	0	-0,33	5	5
12 STC	1	96,10	38,55	19,00	6,56	7,29	1000	44	AUX	0	-0,33	5	5
12 Nominal	1	124,60	45,20	36,50	5,19	5,59	1000	75	AUX	0	-0,33	5	5
Meas. 14 - POWERVOLT													
23. 5. 2000 21:59													
14 Measures@OPC	1	Not Ok (-69,92%)	38,53	9,22	4,87	5,39	755	22	AUX	0	-0,33	5	5
14 STC	1	44,93	38,37	8,86	6,45	7,13	1000	21	AUX	0	-0,33	5	5
14 Nominal	1	57,15	45,20	36,50	5,19	5,59	1000	75	AUX	0	-0,33	5	5
Meas. 16 - POWERVOLT													
23. 5. 2000 22:00													
16 Measures@OPC	1	Not Ok (-69,40%)	38,59	9,00	5,03	5,37	759	22	AUX	0	-0,33	5	5
16 STC	1	45,31	38,55	8,76	6,64	7,08	1000	21	AUX	0	-0,33	5	5
16 Nominal	1	58,14	45,20	36,50	5,19	5,59	1000	75	AUX	0	-0,33	5	5
Meas. 18 - POWERVOLT													
23. 5. 2000 22:01													
18 Measures@OPC	1	Not Ok (-98,59%)	38,41	33,80	0,06	0,14	757	39	AUX	0	-0,33	5	5
18 STC	1	2,03	38,04	33,43	0,08	0,18	1000	40	AUX	0	-0,33	5	5
18 Nominal	1	2,68	45,20	36,50	5,19	5,59	1000	75	AUX	0	-0,33	5	5
Meas. 20 - POWERVOLT													
23. 5. 2000 22:07													
20 Measures@OPC	1	Not Ok (-35,64%)	37,86	19,58	5,01	5,55	771	47	AUX	0	-0,33	5	5
20 STC	1	98,00	37,33	18,83	6,49	7,20	1000	45	AUX	0	-0,33	5	5
20 Nominal	1	122,28	45,20	36,50	5,19	5,59	1000	75	AUX	0	-0,33	5	5
Meas. 22 - POWERVOLT													
23. 5. 2000 22:11													
22 Measures@OPC	1	Not Ok (-35,15%)	33,21	19,22	5,10	5,62	770	53	AUX	0	-0,33	5	5
22 STC	1	98,08	32,80	18,60	6,62	7,30	1000	51	AUX	0	-0,33	5	5
22 Nominal	1	123,21	45,20	36,50	5,19	5,59	1000	75	AUX	0	-0,33	5	5

## Příloha F – Výchozí naměřené hodnoty (Tab. 7) – Část 2

		Nmod	Pmax	Voc	Vmpp	Impp	Isc Irradiance	Module Temp.	FF	Temp	alpha	beta	tol+	tol-
Meas. 24 - POWERVOLT	23. 5. 2000 22:13													
24 Measures@OPC		1	Not Ok (-70,10%)	29,16	9,08	5,09	5,52	771	17,6	AUX	0	-0,33	5	5
24 STC		1	56,82	28,88	8,81	6,45	7,16	1000	25,0	AUX	0	-0,33	5	5
24 Nominal		1	190,00	45,20	36,50	5,19	5,59	1000	25,0	AUX	0	-0,33	5	5
Meas. 27 - POWERVOLT	23. 5. 2000 22:16													
27 Measures@OPC		1	Not Ok (-98,76%)	38,73	22,23	0,09	0,15	777	14,9	AUX	0	-0,33	5	5
27 STC		1	2,35	38,00	21,49	0,11	0,19	1000	25,0	AUX	0	-0,33	5	5
27 Nominal		1	190,00	45,20	36,50	5,19	5,59	1000	25,0	AUX	0	-0,33	5	5

**Příloha G – Výchozí naměřené hodnoty (Tab. 9, 11, 13) – Část 1**

	Nmod	Pmax	Voc	Vmpp	Impp	Isc Irradiance	Module Temp.	FF	Temp	alpha	beta	tol+	tol-
Meas. 2 - POWERVOLT	23. 5. 2000 21:46												
2 Measures@OPC	1	Ok* (1,18%)	38,96	29,44	4,86	5,34	731	17,4	AUX	0	-0,33	5	5
2 STC	1	142,98	38,69	29,36	6,55	7,30	1000	25,0	AUX	0	-0,33	5	5
2 Nominal	1	192,25	45,20	36,50	5,19	5,59	1000	25,0	AUX	0	-0,33	5	5
		190,00											
Meas. 4 - POWERVOLT	23. 5. 2000 21:50												
4 Measures@OPC	1	Not Ok (-11,91%)	39,10	33,23	3,77	5,41	739	17,9	AUX	0	-0,33	5	5
4 STC	1	125,31	38,86	32,81	5,10	7,32	1000	25,0	AUX	0	-0,33	5	5
4 Nominal	1	167,36	45,20	36,50	5,19	5,59	1000	25,0	AUX	0	-0,33	5	5
		190,00											
Meas. 6 - POWERVOLT	23. 5. 2000 21:52												
6 Measures@OPC	1	Not Ok (-33,81%)	39,09	19,30	4,92	5,41	740	18,5	AUX	0	-0,33	5	5
6 STC	1	94,99	38,93	18,91	6,65	7,31	1000	25,0	AUX	0	-0,33	5	5
6 Nominal	1	125,77	45,20	36,50	5,19	5,59	1000	25,0	AUX	0	-0,33	5	5
		190,00											
Meas. 8 - POWERVOLT	23. 5. 2000 21:53												
8 Measures@OPC	1	Not Ok (-33,93%)	39,01	19,15	4,95	5,42	745	19,4	AUX	0	-0,33	5	5
8 STC	1	94,86	38,95	19,31	6,50	7,27	1000	25,0	AUX	0	-0,33	5	5
8 Nominal	1	125,53	45,20	36,50	5,19	5,59	1000	25,0	AUX	0	-0,33	5	5
		190,00											
Meas. 10 - POWERVOLT	23. 5. 2000 21:55												
10 Measures@OPC	1	Not Ok (-33,29%)	38,87	19,22	4,95	5,46	749	21,1	AUX	0	-0,33	5	5
10 STC	1	95,15	39,02	19,18	6,61	7,29	1000	25,0	AUX	0	-0,33	5	5
10 Nominal	1	126,74	45,20	36,50	5,19	5,59	1000	25,0	AUX	0	-0,33	5	5
		190,00											
Meas. 28 - POWERVOLT	23. 5. 2000 22:20												
28 Measures@OPC	1	Not Ok (-11,94%)	39,10	32,44	4,10	5,61	786	19,0	AUX	0	-0,33	5	5
28 STC	1	132,97	38,87	32,06	5,22	7,14	1000	25,0	AUX	0	-0,33	5	5
28 Nominal	1	167,32	45,20	36,50	5,19	5,59	1000	25,0	AUX	0	-0,33	5	5
		190,00											

## Příloha H – Výchozí naměřené hodnoty (Tab. 9, 11, 13) – Část 2

	Nmod	Pmax	Voc	Vmpp	Imp	Isc	Irradiance	Module Temp.	FF	Temp	alpha	beta	tol+	tol-
Meas. 180 - POWERVOLT														
180 Measures@OPC	1	111,59	40,29	31,66	3,53	3,70	549	17,9	75	AUX	0	-0,33	5	5
180 STC	1	204,06	40,74	31,76	6,43	6,74	1000	25,0	74	AUX	0	-0,33	5	5
180 Nominal	1	190,00	45,20	36,50	5,19	5,59	1000	25,0	75	AUX	0	-0,33	5	5
Meas. 182 - POWERVOLT														
182 Measures@OPC	1	113,32	40,47	32,01	3,54	3,73	554	18,8	75	AUX	0	-0,33	5	5
182 STC	1	206,01	41,02	32,23	6,39	6,74	1000	25,0	75	AUX	0	-0,33	5	5
182 Nominal	1	190,00	45,20	36,50	5,19	5,59	1000	25,0	75	AUX	0	-0,33	5	5

## Příloha CH – Výchozí naměřené hodnoty (Tab. 16, 18)

	Nmod	Pmax	Voc	Vmpp	Impp	Isc Irradiance	Module Temp.	FF	Temp	alpha	beta	tol+	tol-
Meas. 81 - #DEFAULT		Not Ok (-82,50%)											
81 Measures@OPC	1	23,23	40,44	31,73	0,73	0,83	802	25,4	AUX	0,0359	-0,33	5	5
81 STC	1	28,87	41,02	31,69	0,91	1,03	1000	25,0	AUX	0,0359	-0,33	5	5
Meas. 84 - #DEFAULT		Not Ok (-95,36%)											
84 Measures@OPC	1	6,39	40,04	14,72	0,43	0,80	806	25,2	AUX	0,0359	-0,33	5	5
84 STC	1	7,66	40,62	16,50	0,46	0,97	1000	25,0	AUX	0,0359	-0,33	5	5
Meas. 86 - #DEFAULT		Not Ok (-98,23%)											
86 Measures@OPC	1	2,36	39,89	19,51	0,12	0,26	805	25,2	AUX	0,0359	-0,33	5	5
86 STC	1	2,92	40,48	19,75	0,15	0,31	1000	25,0	AUX	0,0359	-0,33	5	5
Meas. 88 - #DEFAULT		Not Ok (-99,03%)											
88 Measures@OPC	1	1,29	39,73	23,87	0,05	0,13	812	25,4	AUX	0,0359	-0,33	5	5
88 STC	1	1,60	40,26	24,28	0,07	0,15	1000	25,0	AUX	0,0359	-0,33	5	5
Meas. 89 - #DEFAULT		Not Ok (-99,23%)											
89 Measures@OPC	1	1,02	39,47	26,08	0,04	0,10	809	25,9	AUX	0,0359	-0,33	5	5
89 STC	1	1,28	40,12	26,60	0,05	0,13	1000	25,0	AUX	0,0359	-0,33	5	5
Meas. 94 - #DEFAULT		Not Ok (-92,71%)											
94 Measures@OPC	1	9,49	40,24	15,79	0,60	0,72	698	24,5	AUX	0,0359	-0,33	5	5
94 STC	1	12,03	41,08	13,99	0,86	1,03	1000	25,0	AUX	0,0359	-0,33	5	5
Meas. 96 - #DEFAULT		Not Ok (-92,57%)											
96 Measures@OPC	1	10,33	40,23	14,79	0,70	0,78	764	24,6	AUX	0,0359	-0,33	5	5
96 STC	1	12,26	40,80	14,21	0,86	1,02	1000	25,0	AUX	0,0359	-0,33	5	5
Meas. 98 - #DEFAULT		Not Ok (-92,58%)											
98 Measures@OPC	1	10,49	40,03	15,36	0,68	0,80	779	24,7	AUX	0,0359	-0,33	5	5
98 STC	1	12,24	40,64	13,99	0,88	1,02	1000	25,0	AUX	0,0359	-0,33	5	5
Meas. 101 - #DEFAULT		Not Ok (-91,49%)											
101 Measures@OPC	1	10,86	39,83	15,08	0,72	0,82	797	24,9	AUX	0,0359	-0,33	5	5
101 STC	1	14,05	40,39	15,57	0,90	1,02	1000	25,0	AUX	0,0359	-0,33	5	5
Meas. 115 - #DEFAULT		Not Ok (-91,28%)											
115 Measures@OPC	1	9,24	34,01	15,22	0,61	0,70	684	27,4	AUX	0,0359	-0,33	5	5
115 STC	1	14,40	35,04	16,23	0,89	1,02	1000	25,0	AUX	0,0359	-0,33	5	5