



**FAKULTA  
ELEKTROTECHNICKÁ  
ČVUT V PRAZE**

Porovnání výtěžnosti poločlánekové a  
celočlánekové fotovoltaické technologie v  
závislosti na klimatu a stínění

Comparison of energy yield of half-cut and  
full-cell photovoltaic technologies depending  
on climate and shading conditions

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
2024

Jan Dvořák

Studijní program: Inteligentní budovy  
Vedoucí práce: doc. Mgr. Jakub Holovský, Ph.D.  
Vypracoval: Bc. Jan Dvořák

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Dvořák** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **466726**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávací katedra/ústav: **Katedra měření**  
Studijní program: **Inteligentní budovy**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Porovnání výtěžnosti poločlánekové a celočlánekové fotovoltaické technologie v závislosti na klimatu a stínění**

Název diplomové práce anglicky:

**Comparison of energy yield of half-cut and full-cell photovoltaic technologies depending on climate and shading conditions**

Pokyny pro vypracování:

- Proveďte teoretický rozbor řešení vlivu stínění pomocí grafické metody.
- Ověřte experimentálně vliv stínění měřením voltampérových křivek.
- Simulujte různé případy stínění pro různé dlouhé řetězce v komerčním softwaru.
- Srovnajte výsledky simulace s grafickou metodou a s experimentem.
- Srovnajte chování účinnosti za nižšího osvětlení pro různé moduly na současném trhu.
- Teoreticky rozeberte vliv technologických parametrů na závislost účinnosti na osvětlení.
- Změřte závislost účinnosti na osvětlení vybraných fotovoltaických modulů.
- Seznamte se s výpočtním modelem závislosti na osvětlení komerčního softwaru.
- V komerčním softwaru simulujte vliv úrovně osvětlení a difúzní složky na výtěžnost.
- Vyhodnoťte rozdíl použití technologie half-cut oproti celočlánekové technologii.

Seznam doporučené literatury:

- [1] J. Muller et al., „Resistive Power Loss Analysis of PV Modules Made From Halved 15.6 × 15.6 cm 2 Silicon PERC Solar Cells With Efficiencies up to 20.0%“, IEEE J. Photovoltaics, roč. 5, č. 1, s. 189–194, led. 2015, doi: 10.1109/JPHOTOV.2014.2367868.
- [2] M. Chiodetti, J. Dupuis, D. Boubilil, K. Radouane, a P. Dupeyrat, „Half-Cell Module Behaviour and Its Impact on the Yield of a PV Plant“, 36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 1444-1448, s. 5 pages, 5962 kb, 2019, doi: 10.4229/EUPVSEC20192019-5DO.3.3.
- [3] A. H. M. Smets, K. Jäger, O. Isabella, R. van Swaaij, a M. Zeman, Solar energy: the physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems. Cambridge, England: UIT Cambridge, 2016.
- [4] „How do half-cut solar cells work while shaded?“ <https://www.gses.com.au/how-do-half-cut-solar-cells-work-while-shaded/> (cit. 2. listopad 2022).
- [5] „Characteristic curve models“. <https://help.valentin-software.com/pvsol/en/calculation/pv-modules/characteristic-curve-models/> (cit. 13. únor 2023).

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**doc. Mgr. Jakub Holovský, Ph.D. katedra elektrotechnologie FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **17.02.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **09.01.2024**

Platnost zadání diplomové práce:

**do konce zimního semestru 2024/2025**

\_\_\_\_\_  
doc. Mgr. Jakub Holovský, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta



## ANOTAČNÍ ZÁZNAM

Jméno autora: Jan Dvořák

Název práce: Porovnání výtěžnosti poločlánekové a celočlánekové fotovoltaické technologie v závislosti na klimatu a stínění

Anglický název: Comparison of energy yield of half-cut and full-cell photovoltaic technologies depending on climate and shading conditions

Rozsah práce:

- 56 stran
- 31 obrázků
- 4 tabulky
- 12 grafů

Akademický rok: 2023/2024

Ústav/Katedra: Katedra měření

Studijní program: Inteligentní Budovy

Vedoucí práce: doc. Mgr. Jakub Holovský, Ph. D

Klíčová slova: fotovoltaické moduly, stínění, intenzita záření, technologie článků

Key words: photovoltaic modules, shading, low light, solar cell technology, solar power, solar modules, bypass diodes



## **ABSTRAKT**

Hlavním cílem předkládané diplomové práce je vytvoření souhrnu informací pro porovnání dvou různých technologií fotovoltaických modulů. Pozornost je věnována technologii celočládkové a poločládkové. V této práci jsou rozebrány teoretické vlivy na stínění modulů a chování modulů za nižší intenzity záření. V praktické části jsou tyto problematiky simulovány v komerčním softwaru a následně ověřeny experimentem. Přínosem této práce je přehledná sbírka informací pro další zkoumání a vývoj fotovoltaických článků/modulů.

## **ABSTRACT**

The main goal of the presented thesis is to create a summary of information for comparing two different photovoltaic module technologies. Attention is paid to full-cell and half-cell technology. This work discusses the theoretical effects on module shading and module behavior under lower radiation intensity. In the practical part, these issues are simulated in commercial software and subsequently verified by experiment. The contribution of this work is a clear collection of information for further research and development of photovoltaic cells/modules.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem Diplomovou práci na téma: “ Porovnání výtěžnosti poločlánekové a celočlánekové fotovoltaické technologie v závislosti na klimatu a stínění ” vypracoval samostatně s použitím odborné literatury.

V Praze dne:

.....



## PODĚKOVÁNÍ

Zde bych rád bych poděkoval panu doc. Mgr. Jakobovi Holovskému, Ph.D. za odborný dohled, konzultace, vstřícnost a cenné rady, které mi pomohly při vypracování této diplomové práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Tomáši Finsterlemu, Ph.D. a Ing. Ladislavě Černé, Ph.D za pomoc při experimentech a věcné podněty pro zlepšení této práce.

Děkuji také svým rodičům za podporu při mých studiích.



# Obsah

Úvod .....	10
Principy měření a základní veličiny .....	13
Flash test .....	16
Simulace v komerčním softwaru .....	17
PV*SOL model .....	17
Jedno-diodový model .....	20
Dvou-diodový model .....	22
Struktura modulů .....	24
Vnitřní zapojení modulů .....	24
Bypass dioda .....	25
Orientace modulu .....	27
Stínění celočládkových a poločládkových modulů .....	28
Grafická metoda .....	28
Celočládkový modul .....	28
Poločládkový modul .....	30
Simulace stínění v PV*SOL .....	33
Výpočet simulací .....	33
Konfigurace simulací a jejich výsledky .....	35
Experimentální měření vlivu stínění .....	38
Řetězce modulů .....	41
Simulace vlivu úrovně osvětlení a difuzní složky na výtěžnost .....	45
Experimentální porovnání poločládkových a celočládkových modulů v závislosti na intenzitě záření .....	48
Vliv technologických parametrů na závislost účinnosti na intenzitě záření .....	49
Stav nakrátko .....	49
Napětí naprázdno .....	50
Lineární člen .....	50
Exponenciální člen .....	51
Fill factor .....	52
Chování účinnosti při nižší intenzitě záření pro různé moduly na současném trhu .....	53
Závěr .....	54
Citovaná literatura .....	56





## Úvod

Fotovoltaické elektrárny jsou nezpochybnitelnou složkou energetického sektoru. V současnosti hrají fotovoltaické moduly klíčovou roli v energetických strategiích mnoha zemí, které se snaží rozčlenit své energetické zdroje a snížit tak produkci skleníkových plynů a závislost na fosilních palivech. Účinnost, se kterou jsou moduly schopny vyrábět elektrickou energii je tedy stěžejní parametr, který určuje jejich ekonomickou a ekologickou efektivitu.

Současný trend ve výrobě a instalaci fotovoltaických modulů táhne k poločládkové technologii. V dnešní době je jen málo společností, které se stále věnují vývoji a výrobě celočládkových modulů. Poločládkové moduly mají teoreticky lepší vlastnosti při stínění, obsahují však více pájených spojů a jejich produkce je nákladnější. Další předkládanou výhodou, uváděnou v reklamních článcích je nižší sériový odpor a tím i nižší ztráty při vyšší intenzitě záření, zejména při standardních testovacích podmínkách (STC). To teoreticky může znamenat nižší relativní účinnost při nižší intenzitě záření. Cenu fotovoltaických modulů na trhu udává účinnost při hodnotách STC, avšak pro produkci energie v době její spotřeby jsou důležité i hodnoty při nižších intenzitách záření. V ideálním případě, by bylo navrhovat články dle prostředí, ve kterém budou používány, například navrhovat články s vyšší účinností při vyšší intenzitě do míst s vyšší intenzitou záření a naopak.

V rámci této práce bude proto věnována pozornost porovnání technologií celočládkových a poločládkových modulů zejména z hlediska jejich deklarovaných výhod pro reálné použití. Tím se myslí jak závislost na intenzitě, tak vliv stínění a jeho souvislost s množstvím difuzní složky v daném klimatu. Porovnání vychází z teoretického rozboru základních principů, podepřeného literární rešerší, z měření pomocí flash testu a ze simulací v komerčním softwaru PV\*sol.

Nejdříve budou v předkládané práci stanoveny základní parametry, které slouží pro popis výkonu fotovoltaických článků/modulů. Poté bude v rešeršní části zpracováno téma modelování výkonu fotovoltaického článku při reálných podmínkách, na jakém principu se tvoří voltampérové charakteristiky, které jsou stěžejním výsledkem simulací. Pro přechod od článku k modulu bude třeba rozebrat strukturu modulu, jeho dělení na pod-řetězce a překlenovací diody. Efekt překlenovací diody a její vliv na tvar záporné části voltampérové křivky je ověřen měřením. Tím se dostaneme k tvaru voltampérové charakteristiky modulu při stínění. Pomocí grafické metody budou diskutovány jednotlivé případy stínění pro celočládkovou a poločládkovou technologii. V zápětí budou tyto teoretické případy ověřeny pomocí měření na reálných modulech pomocí flash testeru a zároveň srovnány se simulacemi v programu PV\*sol. Simulovány budou následně i různě dlouhé řetězce modulů při zastínění a vliv difuzní složky záření na stínění. Můžeme totiž předpokládat, že pokud



bude částečně zastíněn jeden modul v řetězci, sledovač maximálního výkonu zvolí bod, který odpovídá maximálnímu bodu výkonu celého řetězce, bez ohledu na nezastíněné paralelní řetězce. Vliv difuzní složky bude zkoumán proto, protože při vyšším podílu difuzní složky je méně patrný dopad stínů.

V druhé části se vrátíme k základním principům a parametrům, které mají vliv na účinnost při nižších hodnotách ozáření. Pomocí nich budou definovány technologické parametry s největším dopadem na relativní účinnosti fotovoltaických modulů v závislosti na různé intenzitě záření. Těmito parametry jsou zejména sériový odpor a faktor ideality, přičemž jejich zlepšování má vzájemně se kompenzující efekt na tuto námi sledovanou vlastnost. To bude experimentálně demonstrováno pomocí měření celočláňkového i poločláňkového modulu flash testem při různých intenzitách. V závěru bude prozkoumán současný trh s moduly a bude posuzováno jejich chování při nižší intenzitě záření tak, jak ho deklarují sami výrobci v datových listech.





## Principy měření a základní veličiny

### Bod maximálního výkonu (MPP)

Jak už z názvu napovídá, jedná se o provozní bod článku/modulu/pole s maximálním elektrickým výkonem. Jelikož okamžitý výkon vždy odpovídá ploše  $U \cdot I$ , musí být tato plocha největší možná v případě MPP. Pro udržování maximálního výkonu se používá sledovač MPP, který pomocí měření napětí a proudu dokáže reagovat na okolní vlivy jako jsou teplota a intenzita záření.

Existuje více systémů sledování bodu MPP, pro instalace na střechu domů ho nejběžněji obsahuje střídač a tím rozhoduje o výkonu celého řetězce. Mohou být však střídače bez sledování MPP, samotné sledování může být pak na úrovni modulů nebo fotovoltaických polí. MPP sledovače operují díky algoritmům ovládající DC-DC měnič. [1]

### Fill factor

Fill factor/faktor plnění jak je vyobrazeno na obrázku č.1 popisuje vztah mezi plochou maximálního výkonu MPP v porovnání s plochou vzniklou napětím naprázdno  $V_{oc}$  a proudem nakrátko  $I_{sc}$ .

$$FF = \frac{V_{MPP} \cdot I_{MPP}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} [1] \quad (1)$$

Kde:

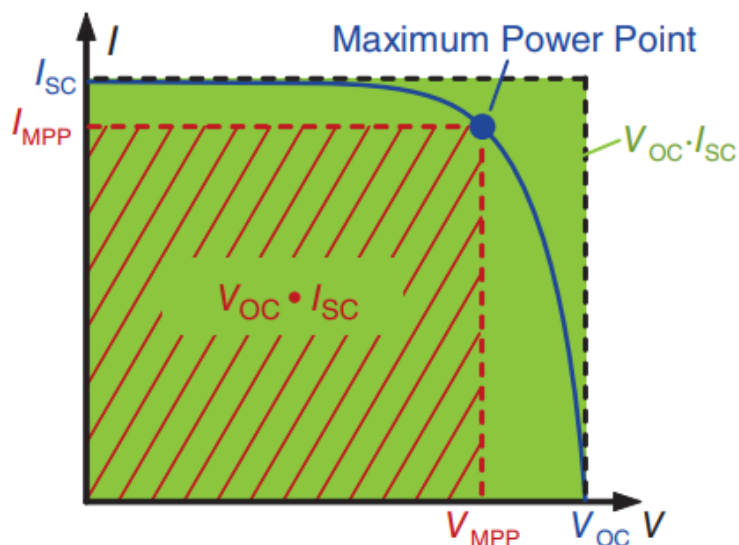
$V_{MPP}$  je napětí v bodě maximálního výkonu [V]

$I_{MPP}$  je proud v bodě maximálního výkonu [A]

$V_{oc}$  je napětí naprázdno [V]

$I_{sc}$  je proud nakrátko [A]

Hodnota fill factoru se pohybuje mezi 0 a 1.



Obrázek 1 – vltampérová charakteristika a vyobrazení bodů MPP, Voc a Isc [2]



## Účinnost

Účinnost solárního článku/modulu je poměr mezi vyprodukovaným výkonem a optickým příkonem, tj. výkonem dostupným z ozáření dopadající na plochu článku/modulu.

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{G \cdot A} \quad [1] \quad (2)$$

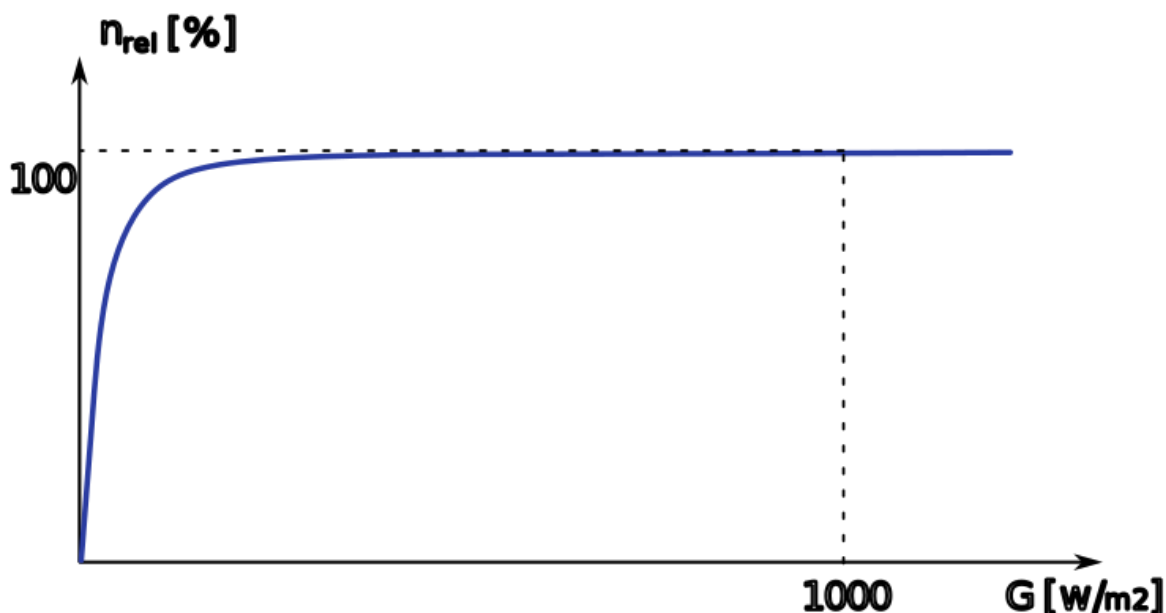
Kde:

$P_{MPP}$  je maximální výkon [W]

$A$  je plocha článku/modulu [ $m^2$ ]

$G$  je intenzita ozáření [ $W/m^2$ ]

Pojem účinnost se bude v této práci vyskytovat hlavně ve formě relativní účinnosti. Relativní účinnost slouží ke zkoumání článků/modulů při různých hodnotách intenzity záření (za konstantní teploty), narozdíl od typických katalogových hodnot měřených při standardních testovacích podmínkách (STC). Relativní účinnost je normalizovaná při  $1000 \text{ W/m}^2$  viz obrázek 2.



Obrázek 2 – ilustrace grafu relativní účinnosti

Relativní účinnost lze stanovit pomocí vzorce:

$$\eta_{rel} = \frac{\eta_G}{\eta_{G_{STC}}} \quad [\%] \quad (3)$$



## STC podmínky

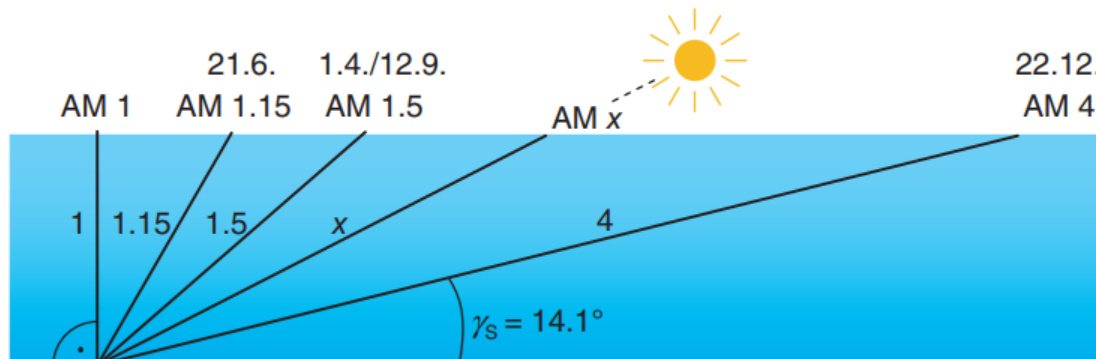
Standardní testovací podmínky jsou používány pro testování a následné porovnávání fotovoltaických modulů. Podmínky jsou stanoveny Mezinárodní elektrotechnickou komisí (IEC) a byli přijaty jako standard pro hodnocení výkonnosti fotovoltaických modulů. [1]

STC podmínky:

- Teplota modulu 25 °C
- Intenzita ozáření 1000 W/m<sup>2</sup>, s kolmým úhlem dopadu na modul
- Spektrum AM1.5

## Spektrum AM1.5

Spektrum AM (air mass) představuje spektrálně rozlišenou intenzitu slunečního záření po průchodu zemskou atmosférou, pod určitým úhlem. AM0 tedy znamená spektrum mimo Atmosféru. Když slunce je v Zenitu, tj. přímo nad pozorovatelem, tak je cesta slunečního záření přes atmosféru nejkratší a označuje se AM1 (vzdálenost cesty je ekvivalentní tloušťce atmosféry). Při běžném provozu fotovoltaických modulů se pozice slunce mění v průběhu dne a roku. Spektrum AM1.5 se také nazývá průměrné roční spektrum, je možno ho naměřit na jaře a na podzim. Označení AM1.5 znamená, že světlo cestovalo 1.5násobek vzdálenosti oproti AM1. Na obrázku 3 lze pozorovat rozdílnou cestu světelných paprsků skrze atmosféru. [2]



Obrázek 3 - Spektrum uvnitř a mimo atmosféru [2]

Spektrum AM 1.5G reflektuje navíc i rozptyl světla v atmosféře, znázorňuje globální záření, neboli přímou i difuzní složku záření. Skutečný poměr přímé a difuzní složky záření závisí na klimatických podmínkách. [1]



## Flash test

Moduly v této práci budou měřeny pomocí flash testů. Flash test je metoda měření výkonnosti fotovoltaického modulu, kterou používají samotní výrobci pro kontrolu a akreditované laboratoře pro potvrzení parametrů modulu. Též se v literatuře objevuje jako „sluneční simulátor“.

Pomocí krátkého světelného impulzu se měří voltampérová charakteristika fotovoltaického modulu. Impulz má definovanou intenzitu ozáření, spektrum a délku. Většinou Flash tester obsahuje xenonovou výbojku s filtrem, který tvoří spektrum AM 1.5. Použití záblesku oproti stálému ozáření je výhodné z hlediska teploty a rychlosti měření. Jelikož je impulz generován po velice krátkou dobu, tak téměř nedochází k ohřívání modulu a tím ovlivnění měření, lze tedy teplotu považovat za konstantní. [2]

Abychom mohli provést měření, je nutné modul umístit ve větší vzdálenosti od zdroje záření, aby byl modul homogenně ozářen. Ozáření v průběhu měření by mělo být dle standardních testovacích hodnot (STC)  $1000 \text{ W/m}^2$ . Hodnota ozáření je v průběhu měření kontrolována referenčním senzorem. Senzor musí být zkalibrován za pomoci referenčního modulu, tj. modulu testovaného v akreditované laboratoři s maximální chybou měření  $\pm 2 \%$ . Flash testery se dělí na více tříd, dle přesnosti vyzářeného impulzu a měřených veličin. Dle IEC EN 60904-9 se hodnotí nerovnoměrnost záření, shoda se spektrem AM1.5 a časová nestabilita záření. [2]

Tabulka 1 - klasifikace flash testerů [2]

třída	Shoda s AM1.5 (%)	Nerovnoměrnost záření (%)	Časová nestabilita záření (%)
A	$\pm 25$	2	2
B	$\pm 50$	5	5
C	$\pm 100$	10	10

Z naměřené voltampérové charakteristiky modulu se následně vyhodnocuje [2]:

- Napětí naprázdno  $V_{oc} [V]$
- Proud nakrátko  $I_{sc} [A]$
- Napětí v bodě maximálního výkonu  $U_{MPP} [V]$
- Proud v bodě maximálního výkonu  $I_{MPP} [A]$
- Maximální výkon  $P_{MPP} [W]$
- Fill Factor  $FF [1]$
- Účinnost modulu  $\eta [1]$
- Sériový odpor (získaný derivací v bodě  $V_{oc}$ )  $R_s [\Omega]$
- Paralelní odpor (získaný derivací v bodě  $I_{sc}$ )  $R_p [\Omega]$

Měření v této práci bude prováděno na slunečním simulátoru PASAN Sun Simulator 3c. Dle výše zmíněného hodnocení v tabulce 1 se jedná o simulátor třídy AAA, té nejvyšší.





## Simulace v komerčním softwaru

Pro simulaci výkonu FV modulů při různých případech stínění a intenzit záření byl vybrán software PV\*SOL od Valentín Software GmbH. Tento software je velmi uživatelsky přívětivý a umožňuje vytvářet různorodé konfigurace fotovoltaických systémů a jejich okolí. Je široce využíván v praxi pro projektování, simulaci výtěžnosti a ekonomické kalkulace.

Důležitými charakteristikami všech FV zařízení jsou VA křivky, které program počítá a jsou i jedním z výstupů programu. Pro simulaci závislosti výkonu na osvětlení se v programu používají také křivky označované jako „charakteristické křivky FF“, které udávají závislost faktoru plnění FF na intenzitě. PV\*SOL totiž používá předpoklad, že pro různé intenzity osvětlení se proud nakrátko chová lineárně a napětí naprázdno se lze považovat za logaritmické. Většina odchylek od ideálního chování se tedy odehrává v tzv. charakteristické křivce FF. PV\*SOL vytváří charakteristické křivky a VA křivky pomocí výpočetních modelů, které simulují elektrické a teplotní chování článků a modulů za různých podmínek. Software k tomu používá svůj empirický model „**PV\*SOL model**“ a fyzikální **Dvou-diodový model**. Empirický model vychází z měření skutečných fotovoltaických článků/modulů a mohou tím dosahovat velmi přesných výsledků, zatímco fyzikální model se snaží reprezentovat a zobecňovat reálné procesy v polovodičích. Fyzikální výpočetní model cílí na použití pro moduly, které nebyly měřeny výrobcem. [3]

Pomocí těchto výpočetních modelů je PV\*sol schopen simulovat různé konfigurace modulů za různého osvětlení.

### PV\*SOL model

#### Charakteristická křivka FF

Matematický model vyžaduje kromě standardních dat poskytnutých od výrobce další nezbytná data pro stanovení chování okolo úrovně intenzity  $200\text{W}/\text{m}^2$ , což odpovídá 20 % úrovně při standardních testovacích podmínkách (STC). Pokud výrobce neposkytne data k modulu, které popisují jeho chování při nižší intenzitě záření, tak jsou tyto hodnoty vypočítány na základě technologie článků viz Tabulka 2.

Tabulka 2 - tabulka s parametry pro různé technologie, které PV\*SOL model rozlišuje [3]

Module technology	$E_{SL}$	$E_{min}$	$k$	$f f_{Extra}$
Amorphous Si	150	$2.2 \cdot 10^{-6}$	0.9685	1.03
CdTe	200	$1.0 \cdot 10^{-7}$	1.0000	1.03
Amorph	250	$5.0 \cdot 10^{-8}$	1.0300	1.00
CIS	300	0.1	1,0000	1.10
HIT	200	$1.0 \cdot 10^{-7}$	1.0400	1.04
All others	300	0.1	1.0000	1.05



Kde:

$E_{SL} [W/m^2]$  představuje bod nízké intenzity záření, kde má charakteristická křivka FF maximum

$ff_{Extra} [1]$  vyjadřuje, kolikrát se zvýší FF v bodě  $E_{SL}$

$E_{min} [W/m^2]$  je škálovací konstanta pro logaritmickou závislost napětí na osvětlení, její význam je podobný, jako saturační proud

$k [1]$  vyjadřuje, jak se změní  $I_{MP}/I_{SC}$  při nízké intenzitě záření

PV\*SOL model používá pro charakteristickou křivku plnicího faktoru jako funkci ozáření rovnici

$$FF = \frac{E}{aE^2 + bE + c} \quad (4)$$

Kde  $E$  je intenzita osvětlení a  $a, b$  a  $c$  jsou fitovací parametry, které se nastaví tak, aby v bodě STC bylo  $FF = FF_{STC}$  a v bodě  $E_{SL}$ , aby funkce měla hodnotu  $ff_{Extra} \cdot FF_{STC}$  a zároveň zde měla nulovou derivaci. Tyto parametry lze spočítat analyticky [3] a to i pro případy, kdy  $ff_{Extra}$  nemá v bodě  $FF_{SL}$  maximum.

Pro napětí naprázdno za nízkého osvětlení  $U_{OC,SL}$ , používá PV\*sol logaritmickou závislost, kde se uplatňuje škálovací parametr  $E_{min}$ :

$$U_{OC,SL} = U_{OC,STC} \frac{\log(E_{SL}/E_{min})}{\log(E_{STC}/E_{min})} \quad (5)$$

Z hlediska zaměření této práce zde můžeme poznamenat, že použití charakteristické křivky FF pravděpodobně může reflektovat vliv sériového odporu na hodnotu FF. Naopak v případě chování napětí naprázdno a role paralelního odporu (jeho příliš nízké hodnoty) toto říci nelze a PV\*sol model toto reflektovat neumí.

PV\*SOL model využívá lineární závislost mezi proudem nakrátko a ozářením, stejně tak k odvození proudu v bodě maximálního výkonu (MPP). V reálných podmínkách může být pokles proudu při poklesu intenzity mírně rychlejší. Odchylku (v jednom jediném bodě)  $E_{SL}$  vyjadřuje konstanta  $k$ .

$$I_{SC,SL} = k \cdot I_{SC,STC} \frac{E_{SL}}{E_{STC}} \quad (6)$$

$$I_{MPP,SL} = k \cdot I_{MPP,STC} \frac{E_{SL}}{E_{STC}} \quad (7)$$



Pro učení velikosti  $U_{MPP,SL}$  už zbývá jen použít vztah pro faktor plnění  $FF_{SL} = U_{MPP,SL} I_{MPP,SL} / (U_{OC,SL} I_{SC,SL})$ . Tím jsou určeny všechny parametry v bodě  $E_{SL}$ . Mezi  $E_{SL}$  a STC, se pak předpokládá lineární interpolace. Tuto interpolaci však nelze extrapolovat do počátku (počátkem neprochází) a proto je zde nahrazena parabolou, která kromě toho, že má procházet počátkem a bodem  $E_{SL}$ , má být v tomto bodě hladce napojena na zmíněnou lineární interpolaci, čímž je beze zbytku určena. Analytické výrazy pro obě křivky jsou dostupné v dokumentaci PV\*sol [3].

Dodatečně jsou použity obvyklé lineární teplotní koeficienty pro změnu  $I_{SC}$  a  $V_{OC}$  s teplotou. Pro nízkou intenzitu je pro  $I_{SC}$  navíc pomocí složitější rovnice zahrnut i teplotní koeficient pro výkon. (Obvykle totiž nestačí teplotní koeficient pro  $I_{SC}$  a  $V_{OC}$ .)

### **VA křivka**

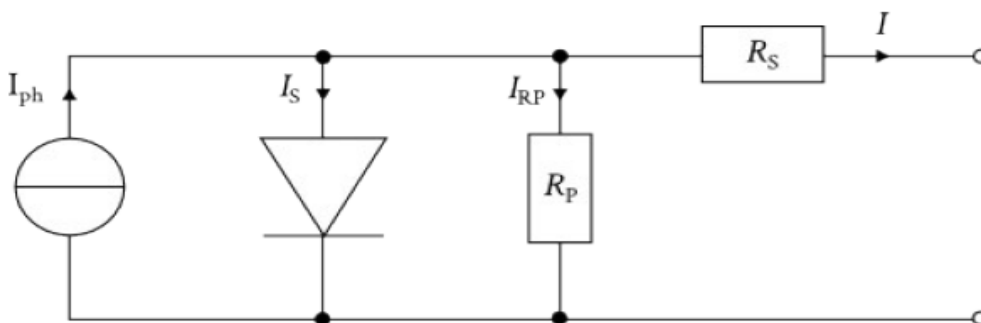
Samotná VA – křivka je vytvořena exponenciální interpolací mezi stavy naprázdno, MPP a stavem nakrátko při dané intenzitě záření. Za zmínku zde stojí, že ani tato interpolace se nevyhne matematickým těžkostem klasické diodové rovnice a řešení není čistě analytické, neboť využívá numericky spočtenou inverzní funkci k funkci  $y = x / \exp(x - 1)$ .

PV\*sol řadí všechny křemíkové technologie článků do kategorie „ostatní“, což může být zatíženo chybou.



## Jedno-diodový model

Pro pochopení dvou-diodového modelu je vhodné nejprve představit si aproximaci na jedno-diodovém fyzikálním modelu. Jedno-diodový model je standardní diodový model (Shockleyho rovnice), který je rozšířen o sériový a paralelní odpor. Toto rozšíření lze znázornit náhradním schématem na obrázku 4.



Obrázek 4-náhradní schéma jedno-diodového modelu [3]

Rovnice jedno-diodového modelu je:

$$I = I_{ph} - I_s \cdot \left( \exp \left( \frac{V + I \cdot R_s}{n \cdot V_T} \right) - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad [A] \quad (8)$$

Kde:

$I_s$  je saturační proud [A]

$V_T$  je tepelné napětí [V]

$n$  je diodový faktor ideality, typicky se pohybuje mezi 1-2 [1]

$U$  je napětí článku [V]

$I$  je proud článku [A]

$I_{ph}$  je fotogenerovaný proud [A]

$R_s$  je sériový odpor  $\approx 10^{-1} [\Omega]$

$R_p$  je paralelní odpor  $\approx 10^2 [\Omega]$

Tepelné napětí  $U_T$  je vypočteno dle:

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad [V] \quad (9)$$

Kde:

$k$  je Boltzmanova konstanta

$T[K]$  je teplota p-n přechodu

$q[C]$  je velikost elementárního elektrického náboje



Fotogenerovaný proud je lineárně závislý na ozáření  $E [W/m^2]$  a zvyšuje se s teplotou článku  $T[K]$  :

$$I_{ph} = (C_1 + C_2 T) E [A] \quad (10)$$

Koeficienty  $C_1$  a  $C_2$  jsou závislé na článku/modulu, zde PV\*sol neuvádí bližší informace, jen to že mohou být vypočítány z technického listu. Nicméně tyto konstanty lze alespoň přibližně určit za předpokladu, že  $I_{ph} \cong I_{SC}$  (ukážeme v další kapitole), přičemž známe hodnoty  $E$  a  $T$  při STC, které jsou  $1000 W/m^2$  a  $298 K$ . Známe-li také teplotní koeficient proudu nakrátko  $\alpha_{ISC}$ , neboli procentuální změnu  $I_{SC}$  při změně teploty o  $1 K$ . Řešením soustavy rovnic tedy získáme  $C_1 \cong (1 - 298\alpha_{ISC})I_{SC}/1000Wm^{-2}$  a  $C_2 \cong \alpha_{ISC}I_{SC}/1000Wm^{-2}$ .

Saturační proud je obvykle řádů  $10^{-11}$  až  $10^{-9} A$  a v PV\*sol modelu je zjednodušeně vyjádřen jako:

$$I_S = C_S T^3 \exp\left(-\frac{E_{GAP}}{nkT}\right) [A] \quad (11)$$

Kde:

$C_S$  je konstanta závislá na materiálu a technologii článku/modulu, pohybuje se okolo  $10^2 [A \cdot K^{-3}]$  a lze ji vypočítat z fundamentálních polovodičových parametrů

$E_{GAP}$  je energie zakázaného pásu, např. u křemíku při teplotě  $T=300 K$

je  $E_{GAP} \approx 1,12 [eV]$

U sériového odporu se zanedbává závislost na ozáření a teplotě, zatímco pro výpočet hodnoty paralelního odporu v závislosti na ozáření se používá vztah:

$$R_p(E) = R_{p,STC} \frac{E_{STC}}{E} \quad (12)$$

Zde je třeba podotknout, že tento vztah má smysl spíše pro moderní součástky, kde dominantním paralelním odporem je odpor ochuzené oblasti p-n přechodu. U starších výrobků, kde se mohou vyskytovat svody v důsledku technologických nedokonalostí, bude lepší uvažovat paralelní odpor konstantní.



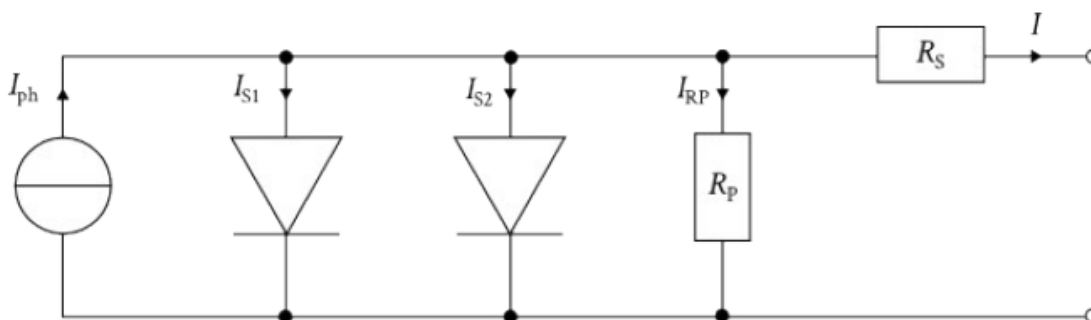
Při výpočtu jedno-diodové rovnice se využívají okrajové podmínky založené na datech poskytnutých v technickém listu modulu. Okrajové podmínky jsou:

- Ve stavu naprázdno, bez zátěže (nulový proud, napětí  $V_{OC,STC}$ )
- Ve stavu nakrátko (nulové napětí, proud  $I_{SC,STC}$ )
- V bodě maximálního výkonu (MPP,  $I_{MPP}, V_{MPP}$ )
- Gradient výkonu v bodě MPP se rovná 0

Ze čtyř okrajových podmínek je možno určit  $C_S, n, R_S$  a  $R_{p,STC}$  a vykreslit voltampérovou charakteristiku.

## Dvou-diodový model

Dvou-diodový model na rozdíl od jedno-diodového má v obvodu další paralelně zapojenou diodu, náhradní schéma se nachází na obrázku 5. Přidání další diody má za následek zlepšení rozlišovací schopnosti parametrů v okolí bodu maximálního výkonu (MPP). [3]



Obrázek 5-náhradní schéma dvou-diodového modelu [3]

Rozšíření původní rovnice o část představující další diodu vedlo k nutnosti vytvoření indexů pro odlišení mezi jednotlivými částmi.

$$I = I_{ph} - I_{S1} \cdot \left( \exp \left( \frac{V + I \cdot R_S}{n_1 \cdot V_T} \right) - 1 \right) - I_{S2} \cdot \left( \exp \left( \frac{V + I \cdot R_S}{n_2 \cdot V_T} \right) - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_S}{R_p} \quad [A] \quad (13)$$

Saturační proud je vypočítán pomocí:

$$I_{S1} = C_{S1} T^3 \exp \left( -\frac{E_{GAP}}{n_1 kT} \right) [A] \quad (14)$$

$$I_{S2} = C_{S2} T^{5/2} \exp \left( -\frac{E_{GAP}}{n_2 kT} \right) [A] \quad (15)$$

Kde:

$$\text{Saturační faktor } C_{S2} \approx 10^{-2} \left[ A \cdot K^{-\frac{5}{2}} \right]$$



Diodové faktory  $n_{1,2}$  jsou hodnoty, které nelze vypočítat z okrajových podmínek. Tyto parametry se určují na základě hodnot, které se běžně vyskytují v literatuře. Často se u statických výpočetních modelů běžně volí faktory ideality  $n_1 = 1$  a  $n_2 = 2$ . U iteračních výpočetních modelů dochází k jejich inkrementálním změnám. [2] [4]

Okrajové podmínky pro samotný výpočet parametrů jsou totožné s jedno-diodovým modelem. Ze čtyř okrajových podmínek je možno určit  $C_{S1}$ ,  $C_{S2}$ ,  $R_S$  a  $R_p$ .

Následně lze vykreslit voltampérovou křivku. Protože známe hodnotu  $I_{ph}$  pro různé intenzity, fyzikální model dokáže předpovědět i chování za nižších osvětlení, což je také vedle matematického modelu druhá možnost, kterou lze zvolit v programu PV\*sol.



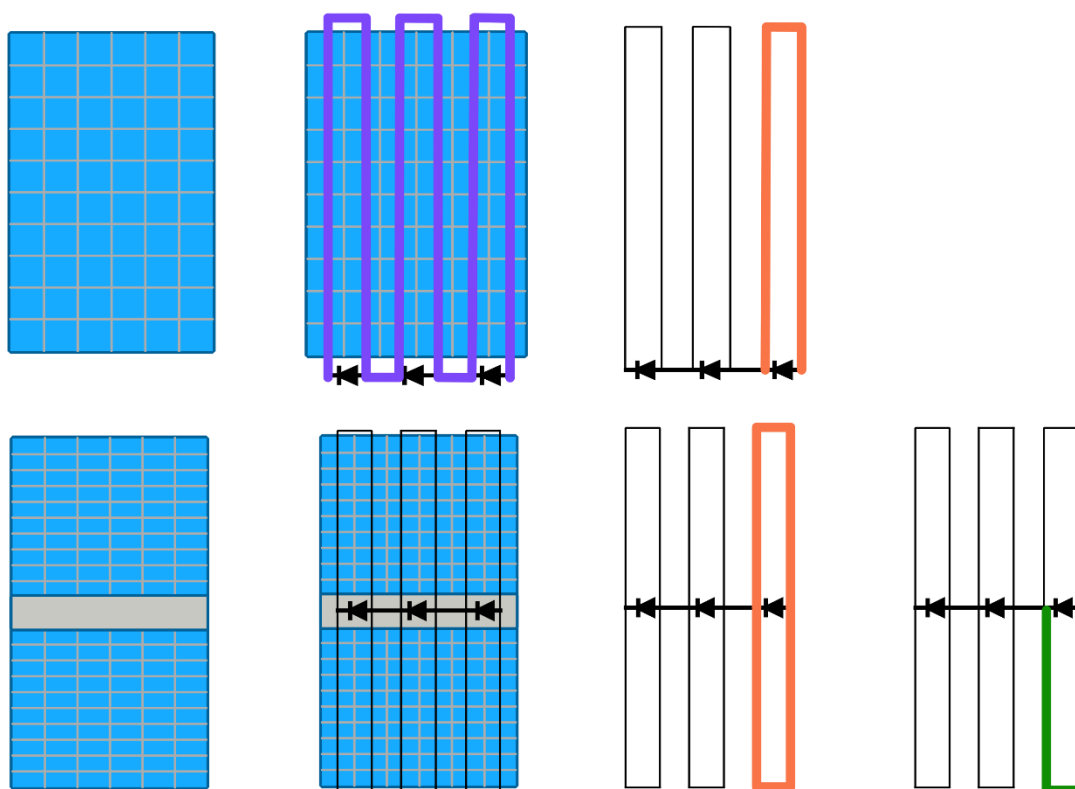
## Struktura modulů

Pro pochopení výkonové ztráty zastíněním modulu musíme mít základní povědomí o jeho struktuře a vlivu orientaci při instalaci.

### Vnitřní zapojení modulů

Jak už název napovídá, poločláňkové moduly jsou tvořeny z článků půlených. Poločláňky se vyrábí z článků celých, nařezáním na laseru. Celočláňkové moduly jsou tvořeny jedním řetězcem sériově spojených článků (viz. Obr. 6, fialová barva), který se obvykle skládá ze tří pod-řetězců. Dělení do pod-řetězců zde znamená, že každý pod-řetězec je vybaven vlastní překlenovací diodou, která umožňuje výrazně redukovat ztráty při stínění. Na druhé straně, poločláňkové moduly jsou strukturovány odlišně. Typicky, každý pod-řetězec je tvořen dvěma větvemi (viz. Obr. 6, zelená barva), které jsou spojeny paralelně.

Obrázek 6 poskytuje pohled na vnitřní strukturu fotovoltaických modulů. V horní části obrázku je zobrazen celočláňkový modul, zatímco v dolní části je vyobrazen poločláňkový modul.

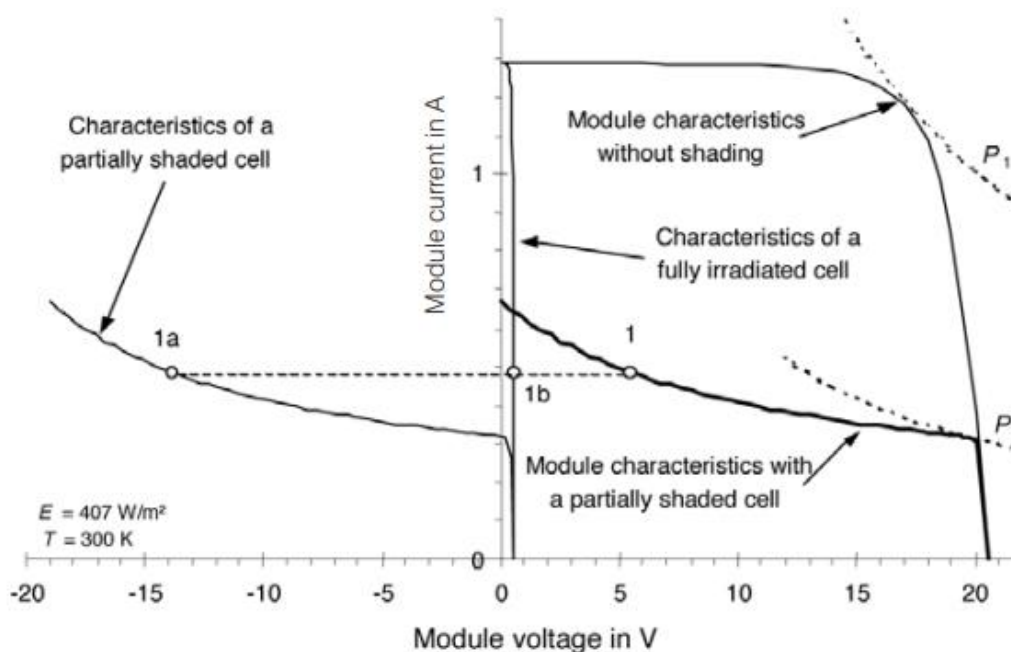


Obrázek 6 - obvyklé vnitřní zapojení článků v modulu (oranžově pod-řetězce, zeleně paralelní větve článků)



## Bypass dioda

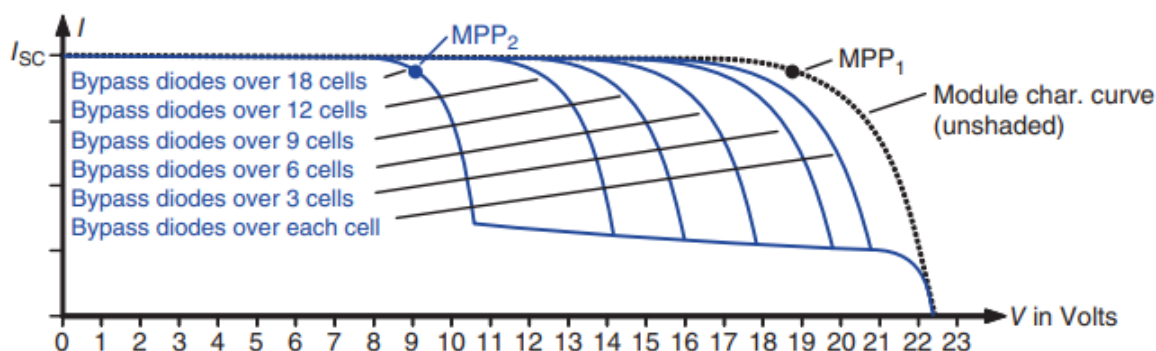
Bypass diody neboli překlenovací diody jsou používány k redukci ztrát stíněním a jako prevence proti vznikům tzv. hotspotů. Nezasťíněné články spojené do řetězce se zastíněným článkem mohou zatížit svým výkonem zastíněný článek. Záleží na tom, jaký tvar závěrné části charakteristiky zastíněný článek má, viz obr. 7, a jaký bod maximálního výkonu bude zvolen střídačem. Pokud by nebyly použité překlenovací diody, tak by mohlo dojít k přehřívání zastíněného článku. Přehřívání může poškodit folii EVA, sloužící k zapouzdření článků v modulu, nebo může poškodit samotný článek. [2]



Obrázek 7 - Voltampérová charakteristika modulu se zastíněným článkem ze 75% (bez bypass diody) [5]

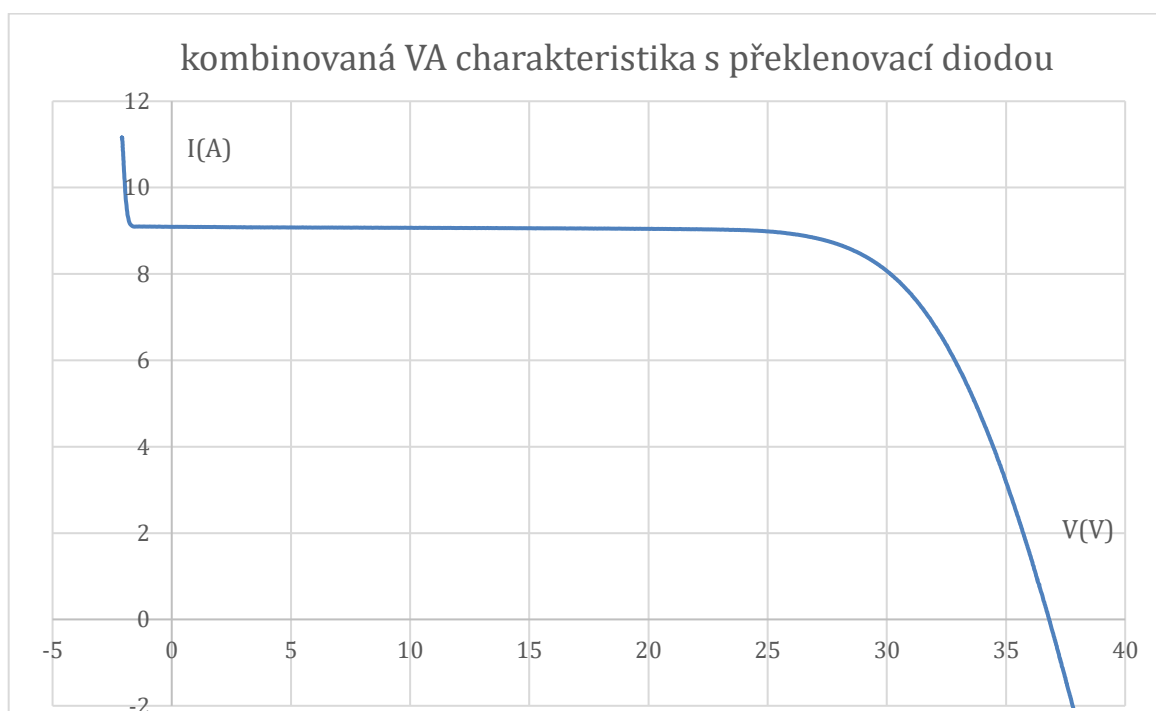
Z hlediska výkonového jsou překlenovací diody klíčové. Když dojde k zastínění článku je jeho schopnost generovat (ale i propouštět) elektrický proud snížena. Protože proud musí být v celém řetězci stejný, zastíněný článek omezí proud v celém řetězci. Na obrázku 7 můžeme pozorovat charakteristiku nezasťíněného modulu (celkově 36 článků v sérii, bez překlenovací diody) s jedním zastíněným článkem ze 75 %. Celkový pokles výkonu je necelých 70 %. Pokud z nějakého důvodu přejde systém do pracovního bodu označeného jako „1“, bude část výkonu disipována v zastíněném článku v podobě tepla. Při velkých disipovaných výkonech hrozí již výše popsané hotspoty. [5]

Za účelem ochrany článků a zmírnění ztrát stíněním jsou do modulů instalovány překlenovací diody. V současnosti se u běžných solárních modulů (používaných v domácích elektrárnách a v solárních parcích) vyskytují 3 diody, jak již bylo vyobrazeno na obr. 6. Překlenovací diody jsou připojeny k řetězcům antiparalelně. Když se podřetězec se zastíněným článkem vlivem ostatních podřetězců dostane do záporného napětí (větší než prahové napětí překlenovací diody), dioda začne vést proud a zastíněný podřetězec je překlenut. Překlenovací dioda ovlivňuje řetězec/článek pouze při zpětné polarizaci. [2]



Obrázek 8 - charakteristika solárního modulu s různým počtem článku na jednu překlenovací diodu [2]

Nejmenšího poklesu výkonu by dosahovaly solární moduly s překlenovacími diodami přes každý článek. V případě zastínění by došlo k překlenutí konkrétního článku a ostatní články v řetězci by pracovaly nenarušeně při maximálním možném výkonu. Tuto skutečnost lze pozorovat na obrázku 8. Avšak z ekonomických a konstrukčních důvodů je jejich počet omezen. Při stínění modulu s překlenovacími diodami nedochází k disipaci energie v článku, ale v samotných diodách. Dochází k nadměrné tepelné zátěži okolí a tento jev je potřeba konstrukčně řešit. Pokud by navíc byly umístěny přímo u každého článku, byla by jejich výměna složitá. Obvykle jsou překlenovací diody umístěny v připojovací skřínce modulu. [2]



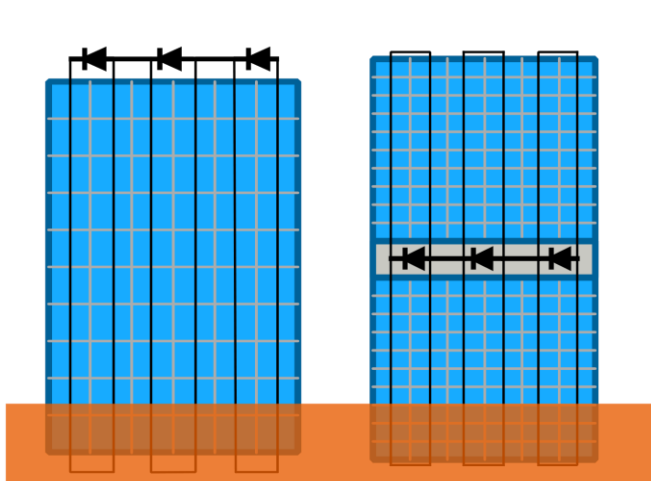
graf 1 - kombinovaná VA charakteristika s překlenovací diodou

Při měření na flash testu bylo experimentálně ověřeno, že měřené voltampérové charakteristiky obsahují i vliv překlenovacích diod v oblasti záporného napětí. Překlenovací dioda ovlivňuje tvar záporné charakteristiky modulu, jak vidíme z měření (graf 1), ale i každého pod-řetězce. Tento efekt využijeme v grafické metodě.

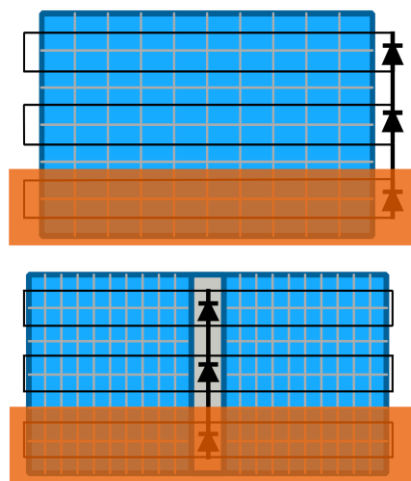


## Orientace modulu

Překlenovací diody mohou sice být efektivním řešením pro stínění ve fotovoltaických instalacích, záleží však na poloze stínu a na orientaci modulů. Při orientaci „na výšku“ může mít výhodu poločlankový modul. Při zastínění spodní části modulu (například od přilehlé budovy/plotu) je ovlivněna jen jedna paralelní větev z každého pod-řetězce [6]. Zatímco u celo-člankového modulu je ovlivněn modul celý. U orientace „na šířku“ je efekt zastínění na výkon modulu stejný pro obě technologie, při dané konfiguraci viz obr. 9 a 10. Při samotné instalaci je tedy potřebné promyslet orientaci modulu s ohledem na okolí a možné stínění.

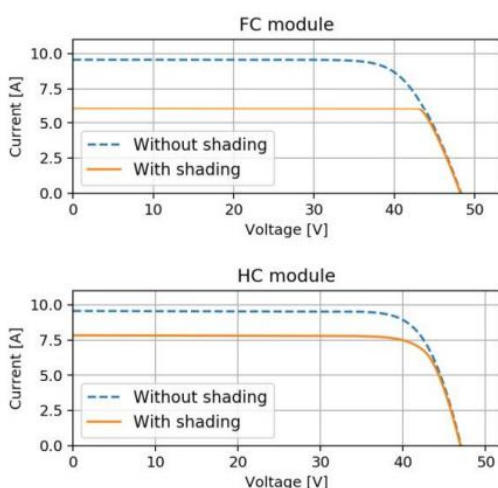


Obrázek 9 - orientace modulů „na výšku“

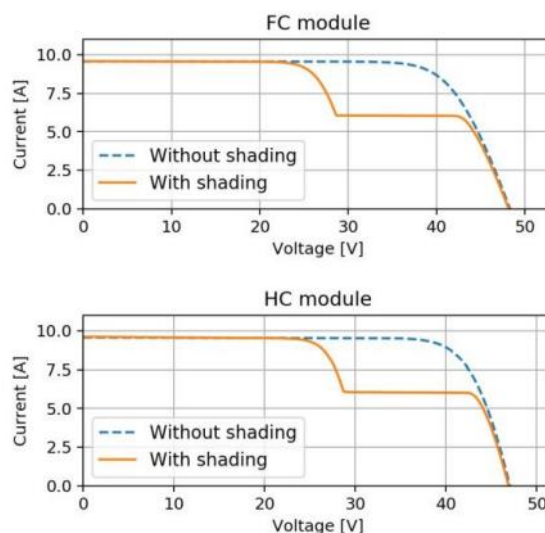


Obrázek 10 - orientace modulů "na šířku"

Tomuto tématu se věnuje i [6], kde je toto tvrzení podpořené i simulacemi. Viz obrázek 11 a 12. Jak si lze povšimnout, tak u celočlankového modulu (FC/Full-cell module) je úbytek proudu, a tedy i výkonu znatelný. Ztráta výkonovým nesouladem mezi řetězci je 24 %, oproti 15 % u poločlankového modulu (HC/Half-Cut module). U orientace „na šířku“ jsou VA-křivky obdobné.



Obrázek 11 - částečné zastínění při orientaci "na výšku" [6]



Obrázek 12 - částečné zastínění při orientaci "na šířku" [6]

V této práci bude uvažována pouze orientace „na šířku“, pro vhodné porovnání obou technologií.



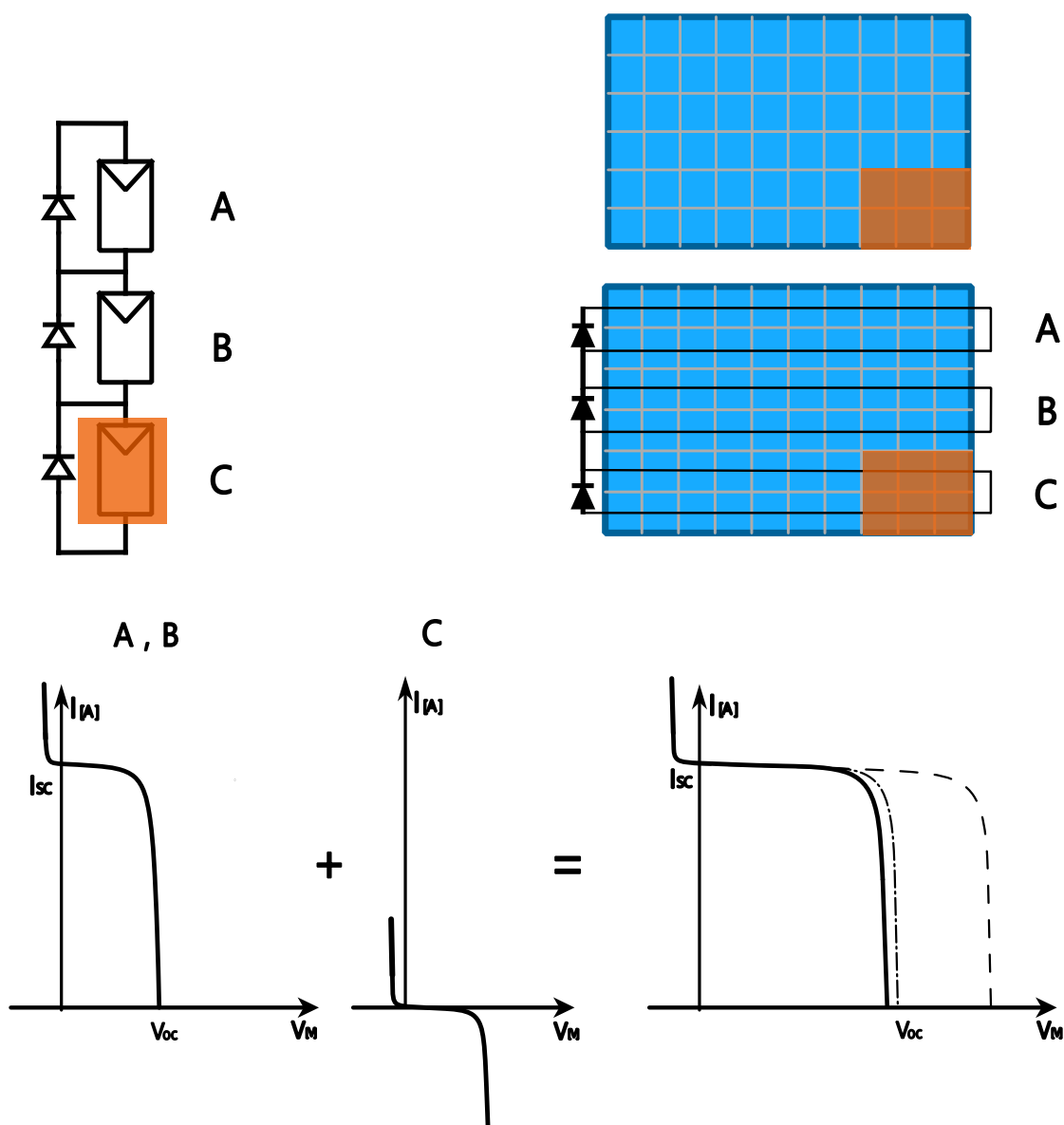
## Stínění celočlánekových a poločlánekových modulů

### Grafická metoda

V této části budou provedeny teoretické konfigurace stínění pro celočlánekový a poločlánekový modul. Je použita metoda, kterou nazýváme grafická, ačkoliv její podstata je čistě matematická. Jde o sčítání napětí v bodech, které odpovídají stejnému proudu, protože se jedná o sériové řazení. Grafická metoda odpovídá sčítání VA křivek v tabulkovém procesoru, pokud použijeme funkci interpolace do stejných proudových bodů. Přesto všechny obrázky v grafické metodě jsou pouze ilustrace vytvořené v softwaru inkscape. Veškeré uvedené konfigurace jsou ověřeny pomocí měření a simulací. Pro jednoduchost bude uvažováno úplné zastínění pod-řetězců/větví článků, popřípadě paralelních větví.

### Celočlánekový modul

Celočlánekový modul – jeden pod-řetězec zastíněn

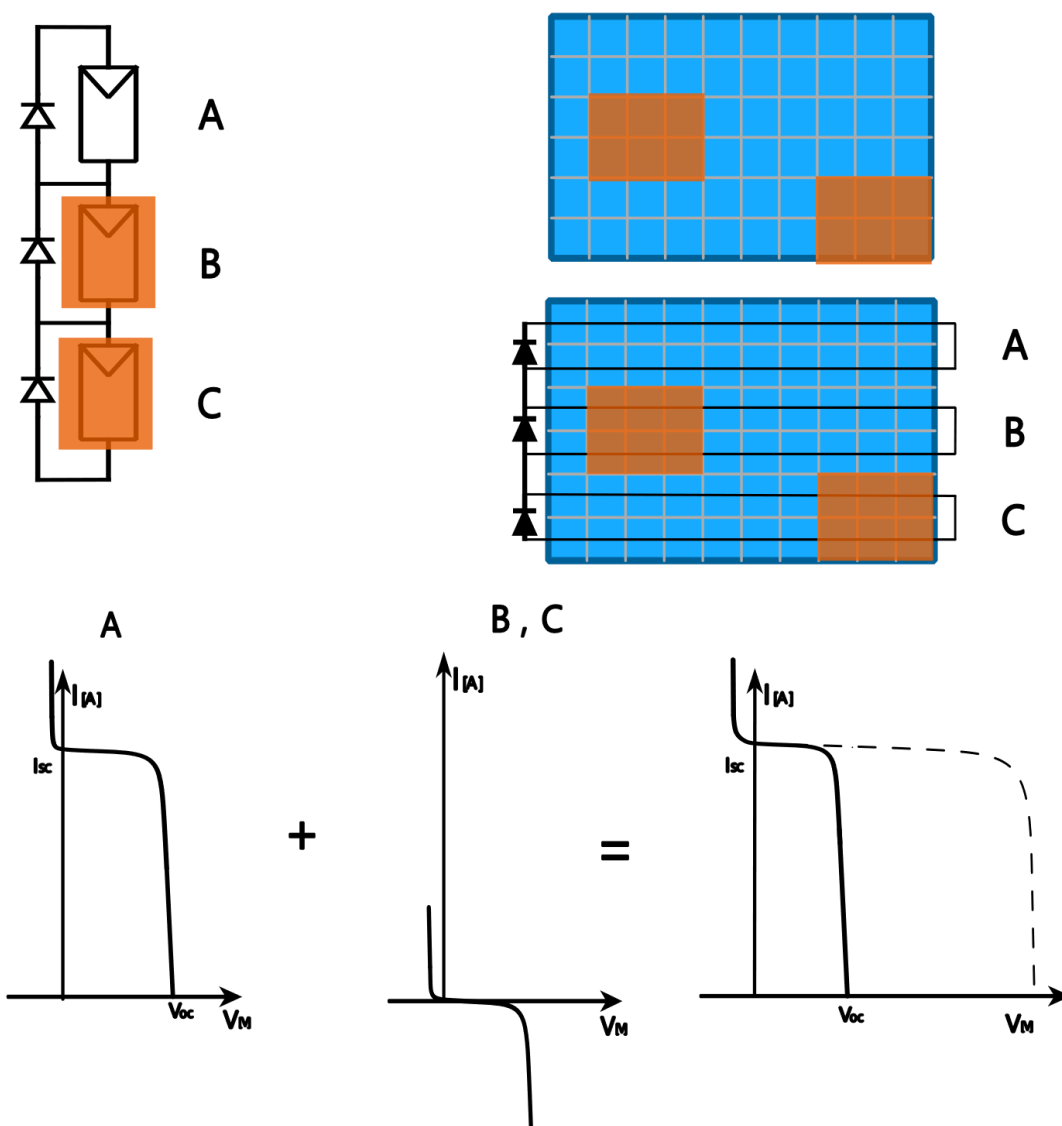


Obrázek 13 - Celočlánekový modul – jeden pod-řetězec zastíněn



Na obrázku 13 lze pozorovat čerchovanou čáru, ta představuje voltampérovou křivku bez úbytku napětí na diodě. Vyobrazení úbytku napětí na diodě je pouze názorné, ve skutečnosti je prahové napětí jedné překlenovací diody jen přibližně 0,7 V. Na dalších obrázcích se úbytek napětí již vyskytovat nebude. Na obrázku 13 je také možné pozorovat teoretická výsledná voltampérová charakteristika zastíněného celočlánekového modulu z 1/3 a „původní“ nezastíněná (čárkovaná čára).

### Celočlánekový modul – dva pod-řetězce zastíněny



Obrázek 14- Celočlánekový modul – dva pod-řetězce zastíněny

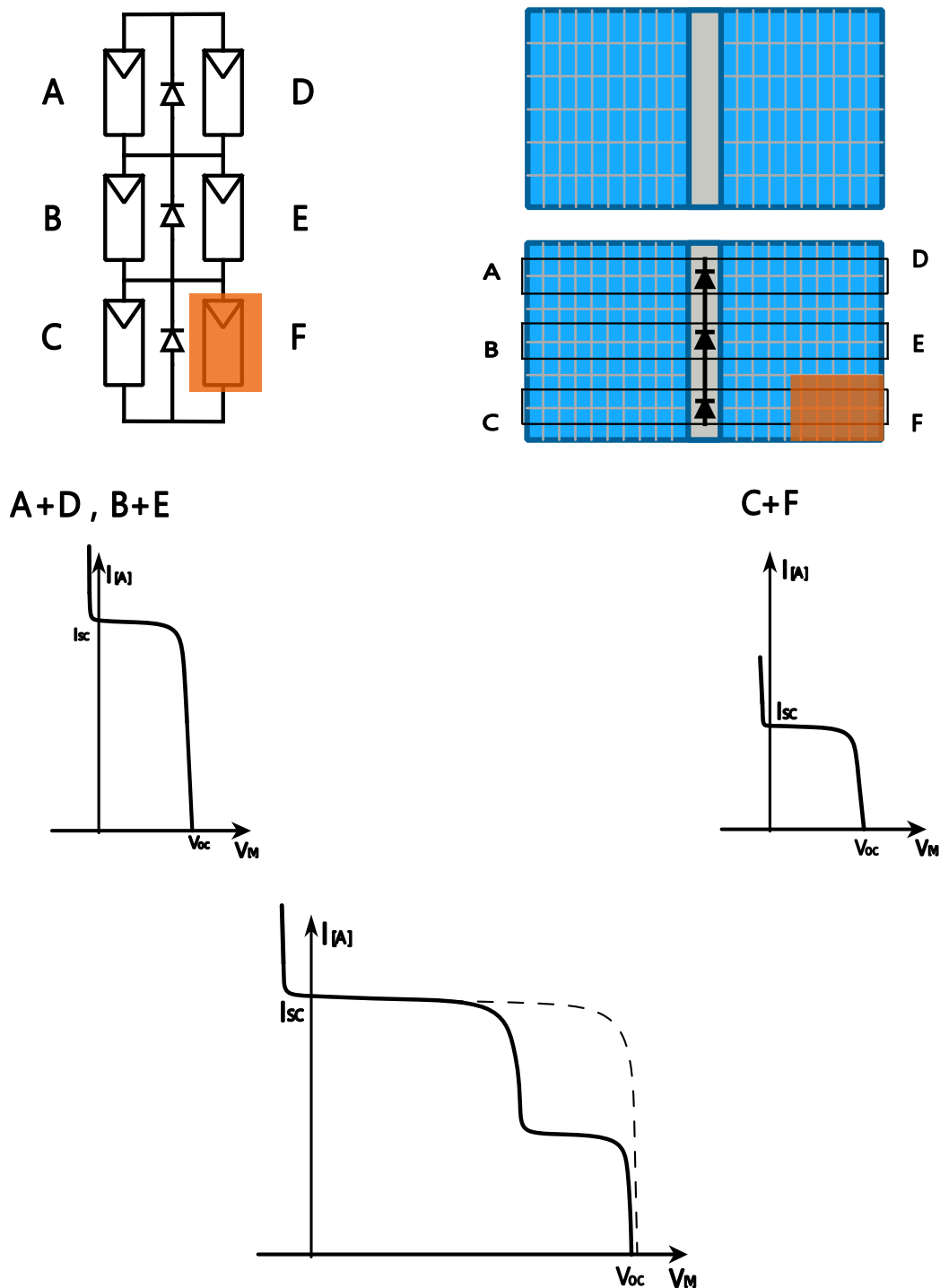
Na obrázku 14 je možno pozorovat grafické znázornění zastíněného celočlánekového modulu ze 2/3. Výsledná voltampérová charakteristika tedy odpovídá jedinému nezastíněnému pod-řetězci A.



## Poločlánkový modul

Jelikož je u poločlánkového modulu více případů stínění, budou zde uvedeny jen některé a zbytek bude uveden v příloze.

### Poločlánkový modul – zastíněna jedna paralelní větev z jednoho pod-řetězce

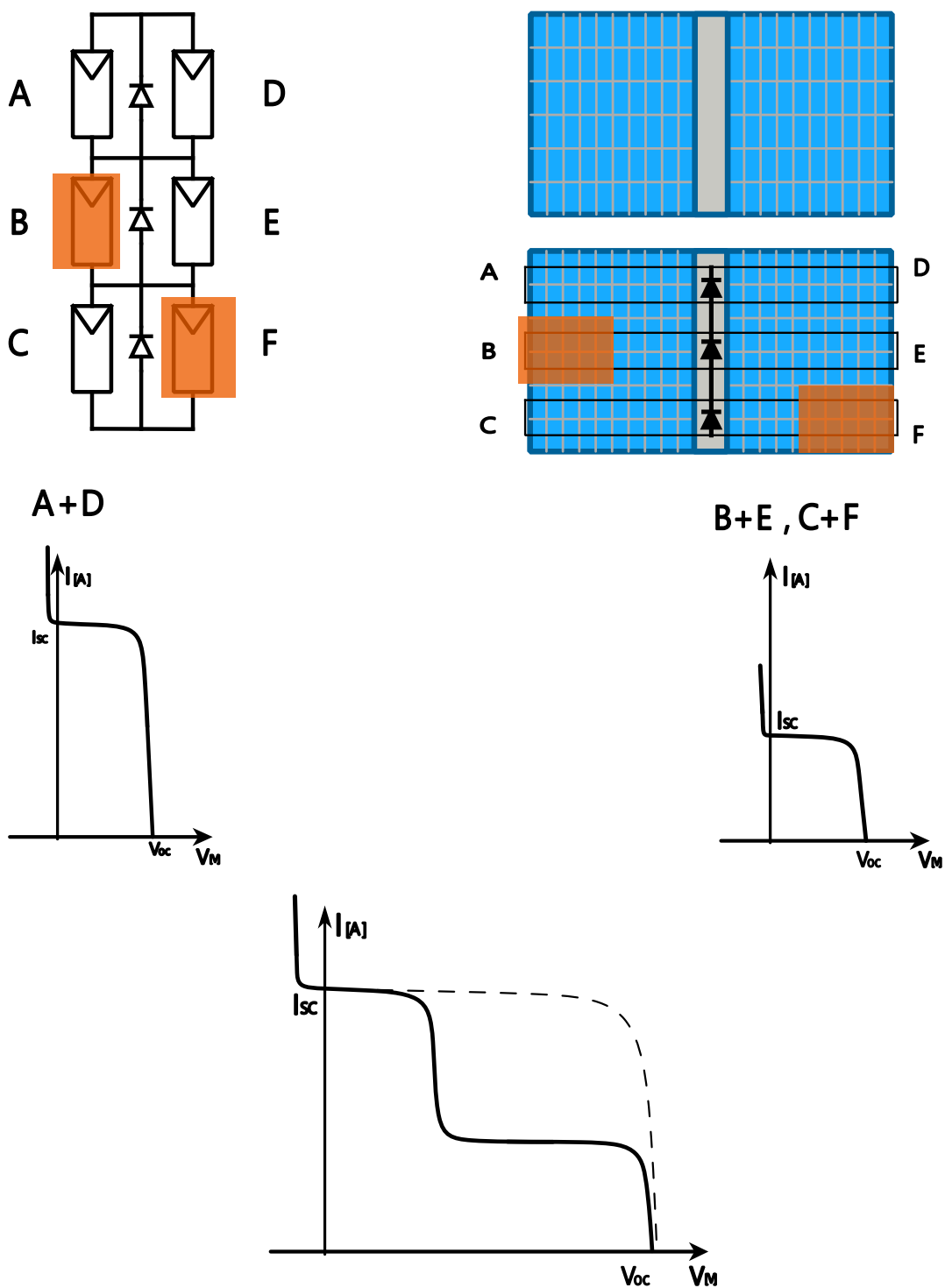


Obrázek 15 - Poločlánkový modul – zastíněna jedna paralelní větev z jednoho pod-řetězce

Na obrázku 15 lze vidět nespornou výhodu poločlánkových modulů. Při kompletním zastínění článku ve větvi F, paralelní větev C není tímto faktem ovlivněna a stále generuje dostupný elektrický výkon.



### Poločlánkový modul – Zastíněny dvě paralelní větve z různých pod-řetězců

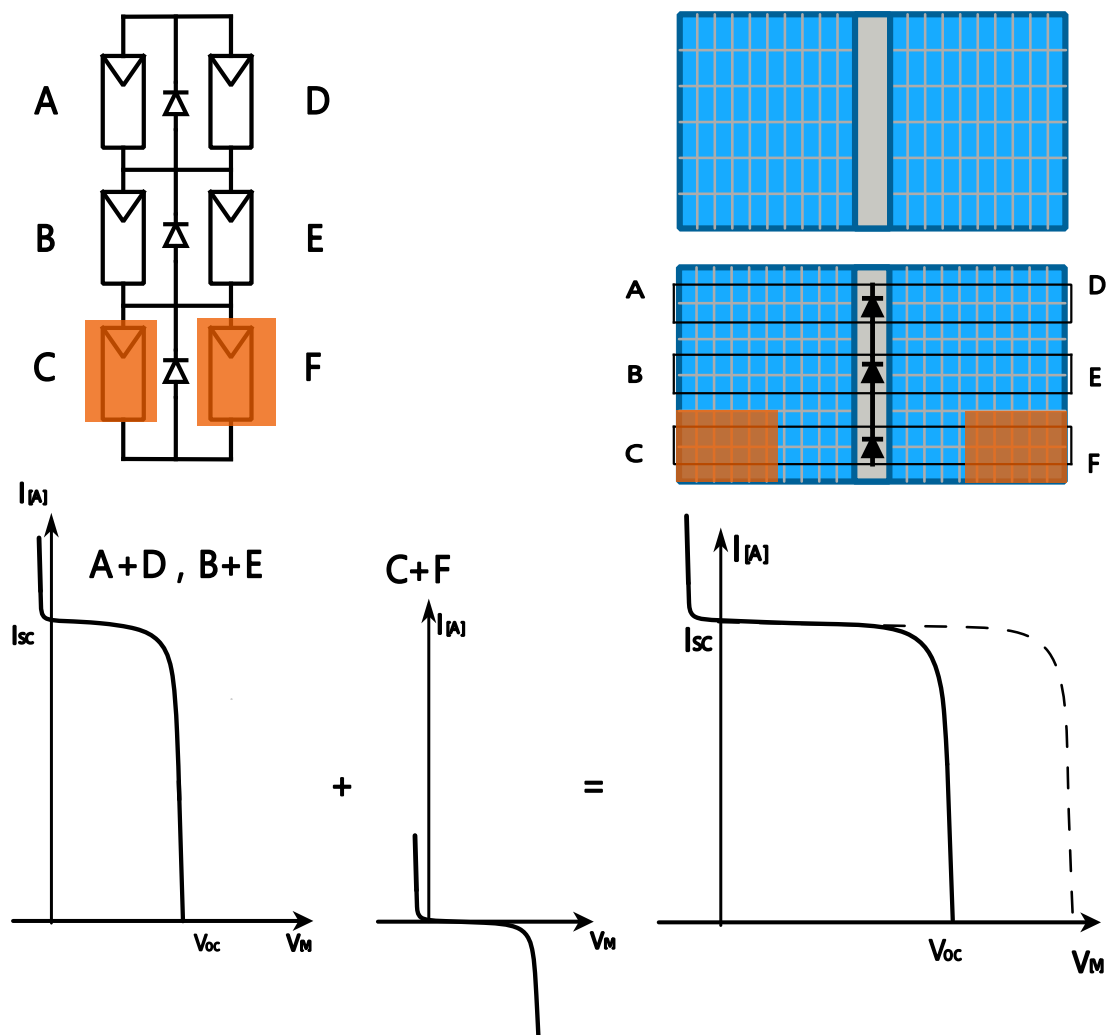


Obrázek 16 - Poločlánkový modul – Zastíněny dvě paralelní větve z různých pod-řetězců.

Na obrázku 16, ve výsledné voltampérové charakteristice je možné opět zřetelně pozorovat vliv překlenovacích diod u větví F a B.



## Poločláňkový modul – zastíněný jeden celý pod-řetězec



Obrázek 17 - Poločláňkový modul – zastíněný jeden celý pod-řetězec.

Na obrázku 17 je možné vidět paralelu s celočláňkovým modulem, při zastínění jednoho pod-řetězce (paralelní větve C a F), lze pozorovat stejný tvar výsledné voltampérové křivky jako u celočláňkového modulu (při zastínění jednoho pod-řetězce).



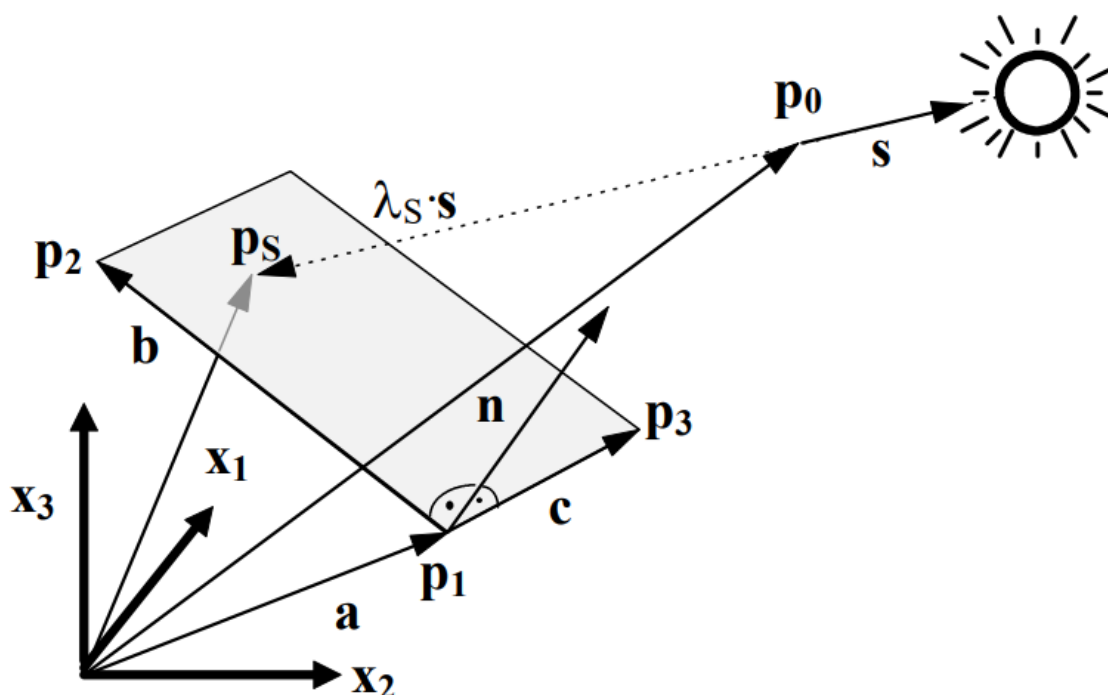


## Simulace stínění v PV\*SOL

Možnost simulací nejrůznějších konfigurací okolí a fotovoltaických systémů může být silný nástroj při projektování fotovoltaických systémů. Pro simulace byl použit již zmiňovaný software PV\*sol.

### Výpočet simulací

Cílem této kapitoly je seznámit se s výpočtem stínění, jak je realizován v programu PV\*sol a porovnat ji s jinými metodami v této práci. V PV\*SOL® je zastínění vypočítáno na úrovni řetězců (uvnitř jednoho modulu) nebo článků, aby byla zajištěna nejvyšší přesnost simulace. Na stránkách PV\*sol je odkaz na literaturu [7], kde se popisuje výpočet ztrát při stínění od okolních prvků. [8]



Obrázek 18 - určení pozice stínu, vytvořeným jedním bodem [5]

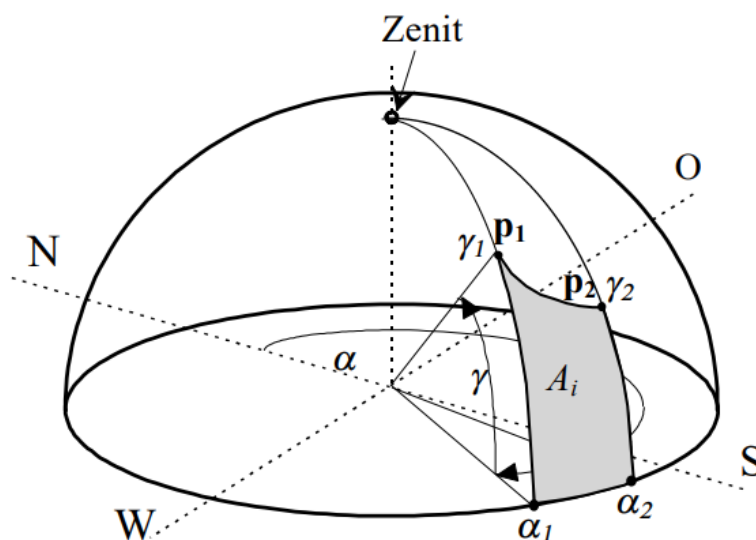
Na obrázku 18 je definován modul body  $p_1$ ,  $p_2$  a  $p_3$ . Do roviny modulu je promítán vržený stín  $p_s$  od bodu  $p_0$ . Tímto konceptem můžou být určeny všechny pozice stínu  $p_{si}$ , každého vrcholu  $O_i$  okolního objektu.

Dle [7] jsou všechny objekty reprezentovány pomocí mnohoúhelníků a jejich vrcholů. Pro všechny povrchové mnohoúhelníky je potřeba vypočítat stínové mnohoúhelníky, které dohromady tvoří úplný stín objektu. Stíny redukují přímou složku ozáření a tím i redukují výkon modulu. V zastíněné oblasti modulu však není naprostá tma, protože zde dopadá na fotovoltaické články stále ještě složka difuzního záření.

Vysoká vlhkost, meteorologické podmínky, geografická poloha, roční období, znečištění a oblačnost jsou jevy působící na klimatické podmínky, které ovlivňují úroveň difuzního záření. Difuzní záření vzniká rozptylem světelných paprsků při průchodu atmosférou a výše vypsané jevy rozptyl zintenzivní. V případě difuzního záření jsou stíny méně ostré a výrazné. [2]



Také difuzní záření je ovlivněno okolím modulu, avšak na rozdíl od přímé složky nemá směr. Zdrojem difuzního záření je hypotetická polokoule zkonstruovaná kolem fotovoltaického modulu. Všechny objekty lze promítnout na tuto polokouli, viz obrázek 19.



Obrázek 19 – hypotetická polokoule pro výpočet difuzního záření [7]

Pokud jsou okolní objekty daleko, uvažuje se v rovině modulu konstantní difuzní záření. Pakliže jsou blízko, výpočty difuzního záření jsou opakovány pro více bodů na modulu. [7]

V lokalitách s převažující difuzní složkou není tak patrný efekt stínů, tím pádem není tak znatelný úbytek výkonu při stínění. To je třeba si uvědomit při hodnocení simulace stínění.



## Konfigurace simulací a jejich výsledky



Obrázek 20 - konfigurace modulů pro simulace stínění

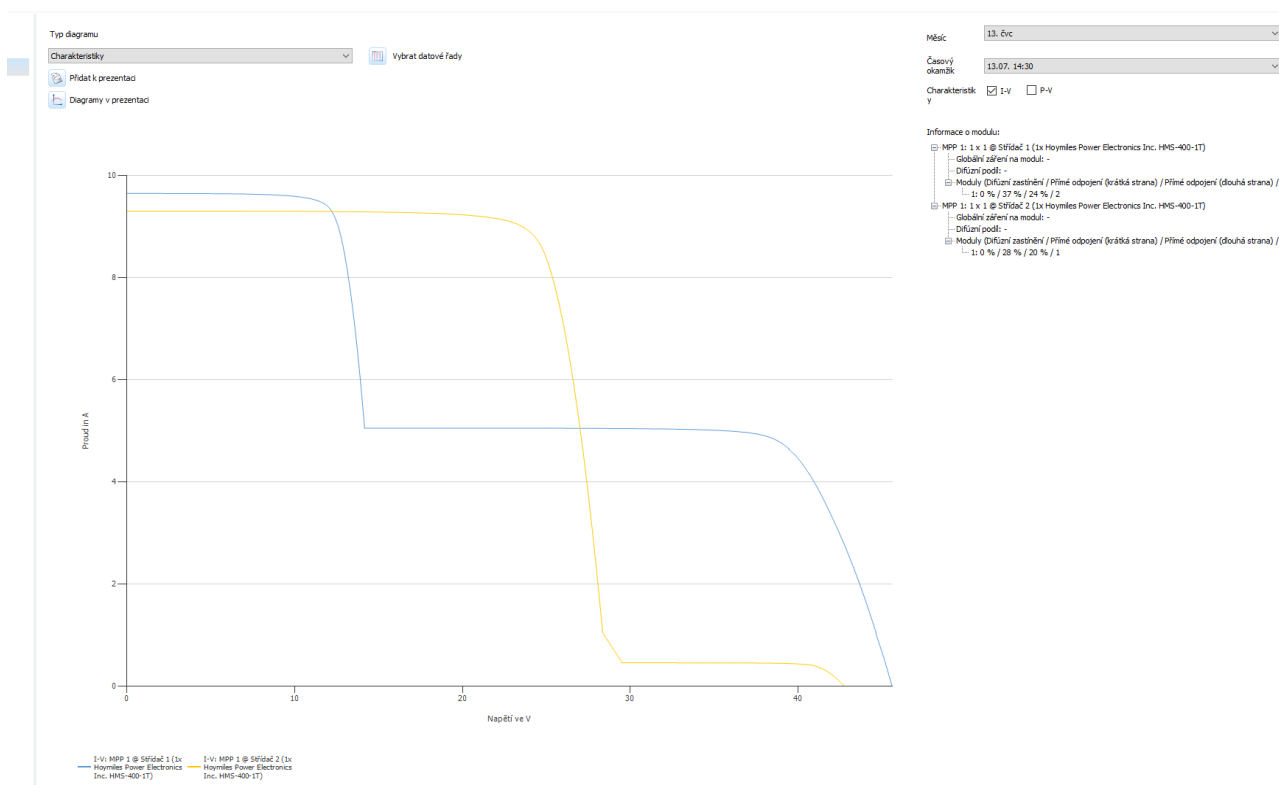
V Prostředí PV\*sol byl vytvořen model střechy se sklonem 35 stupňů, s orientací na jih. Moduly poločlánkový Canadian Solar CS6R-410MS a celočlánkový Amerisolar 270W Poly B, byly použity z důvodu jejich dostupnosti pro následné měření. V prostředí softwaru, speciálně v jeho 3D modeláři, lze vytvořit nespočet stínících prvků (komíny, antény, arkýře, zdi, okolní budovy a atd.). Jako stínící prvky byly vybrány komíny s neměnným průměrem 10 cm. Moduly byly umístěny v dostatečné vzdálenosti, aby nemohlo dojít k jejich ovlivnění od stínících prvků. Konfigurace modulů pro stínění je možné vidět na obrázku 20 s detailem stínícího prvku na obrázku 21. Lokace pro simulace byla zvolena Praha, Letiště Václava Havla.



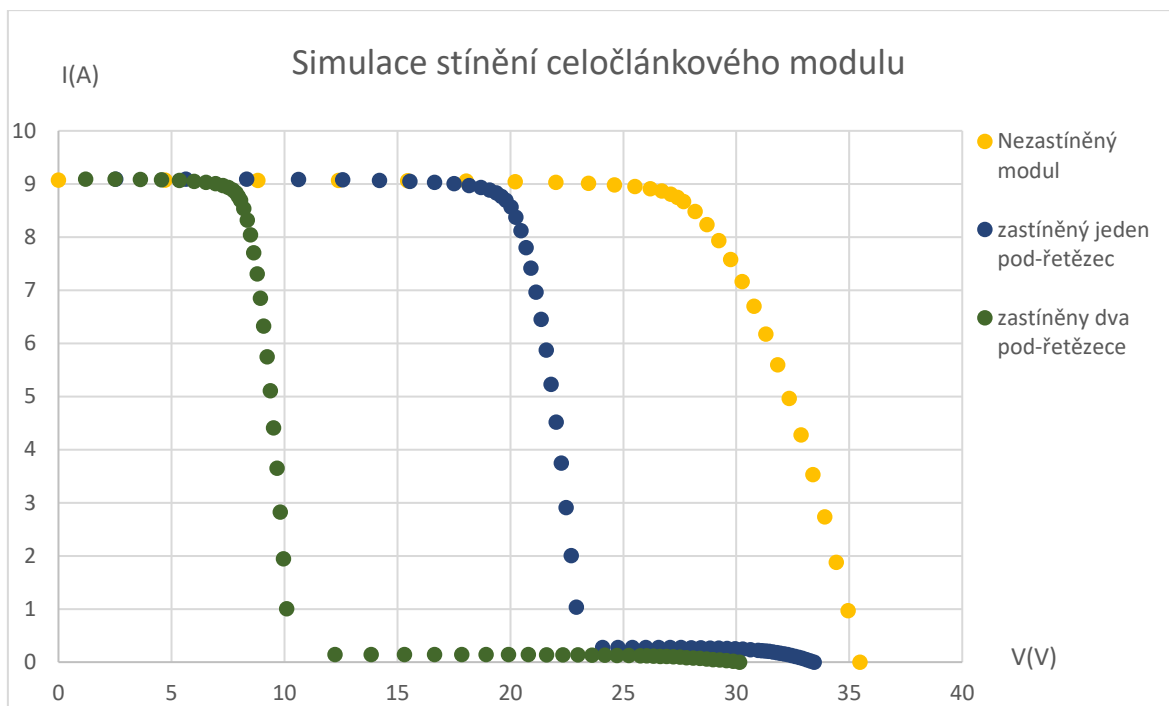
Obrázek 21 - detail stínícího prvku



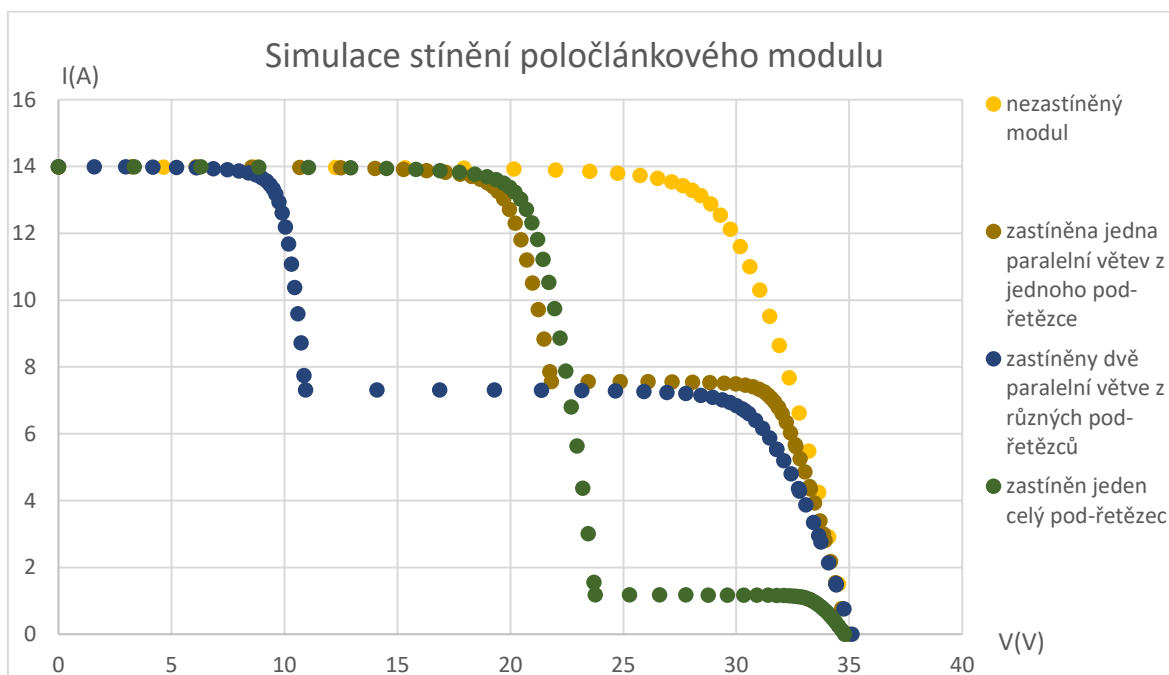
V prostředí softwaru lze po simulacích vybrat den a minutu pro vyobrazení voltampérové křivky, viz obrázek 22. PV\*sol udává informace o poměru zastínění modulu a intenzitě záření v danou chvíli, kdy byla charakteristika vybrána. Touto metodikou byly vybrány jednotlivé charakteristiky, jejichž tvary a udávaný poměr zastínění odpovídá těm uvedeným v grafické metodě. Následně byly charakteristiky vyexportovány a normalizovány pro možnosti následného porovnání, zpracování charakteristik proběhlo v prostředí excel.



Obrázek 22 - ukázka výstupu voltampérových charakteristik v PV\*sol



graf 2 - Simulace stínění celočlánekového modulu



graf 3 - Simulace stínění poločlánekového modulu

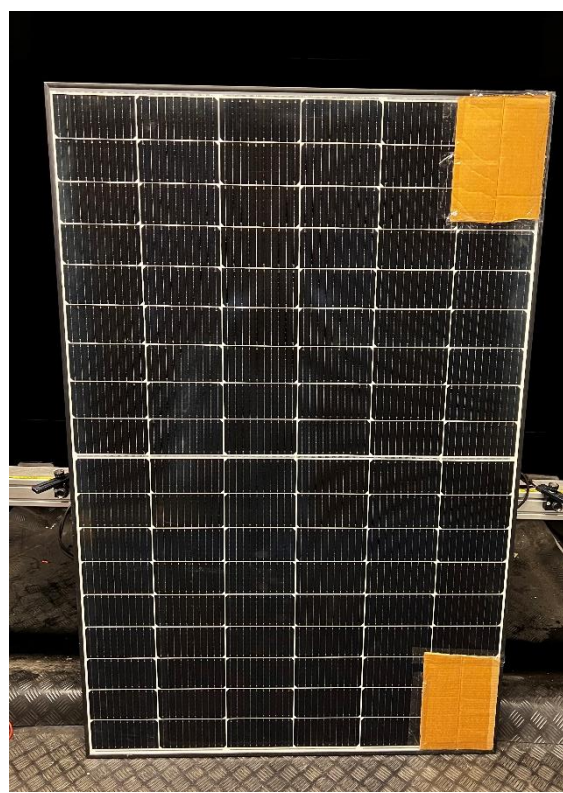
V prostředí PV\*sol nelze vytvořit úplné zastínění, na moduly stále dopadá difuzní složka ozáření. Výsledné charakteristiky z grafu 2 a 3 odpovídají tvarově grafické metodě.

## Experimentální měření vlivu stínění

V této části bude popsáno měření voltampérových charakteristik na solárním simulátoru Pasan. Měření na přístroji flash tester Pasan SunSim IIIc probíhalo v Laboratoři diagnostiky fotovoltaických systémů ČVUT FEL. Proměřované fotovoltaické moduly byly poskytnuty touto laboratoří. Jednalo se o již zmíněný poločlánekový modul Canadian Solar CS6R-410MS a celočlánekový modul Amerisolar 270W Poly B, viz obrázek 23. Ke stínění modulu sloužily kartonové výstřižky, který byly umísťovány stejně jako v grafické metodě, viz. Obrázek 24. Před měřením bylo potřeba moduly zanést do softwaru Pasan, tomu předcházelo měření velikosti modulů, měření velikosti článků, stanovení počtu článků a stanovení technologie článků.



Obrázek 23 - fotka použitých modulů

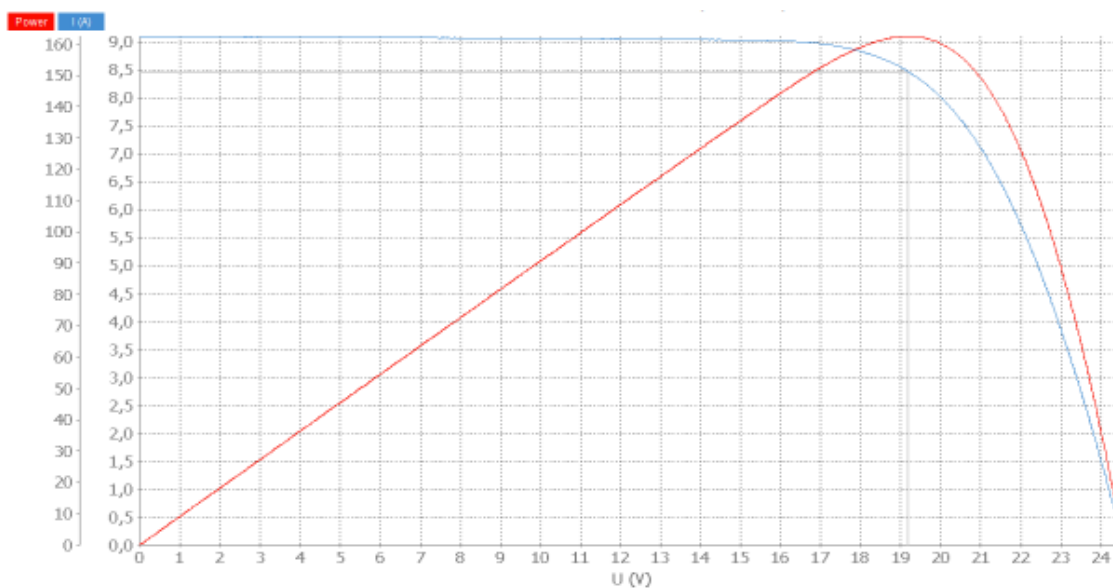


Obrázek 24 - ukázka umísťování stínících prvku, během měření

Měření probíhalo za teploty blízké STC teplotě, poté je provedena korekce na přesnou teplotu 25 stupňů Celsia. Korekce probíhají autonomně a k uživateli se dostávají již výsledky po korekci. Charakteristiky lze měřit při různých intenzitách záření, kdy jsou před výbojku zařazeny šedé filtry. Měření voltampérových charakteristik zastíněných modulů probíhalo při  $1000 \text{ W/m}^2$ .

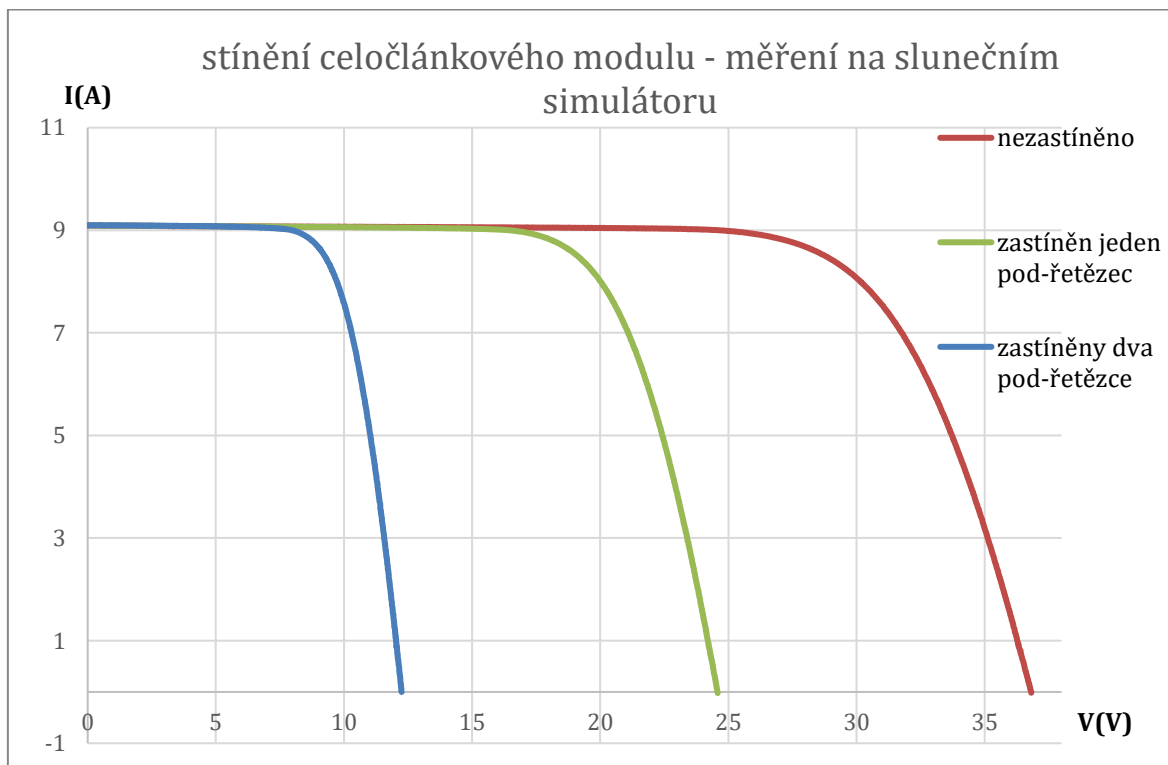


Výstup ze slunečního simulátoru Pasan je dokument csv a také vlastní pdf dokument, kdy lze okamžitě pozorovat parametry modulu a voltampérovou charakteristiku. Na obrázku 25 je možné pozorovat charakteristiku zastíněného jednoho řetězce u celočlánekového modulu, která je přímým výstupem ze softwaru Pasan.



Obrázek 25 - ukázka výstupu ze softwaru Pasan

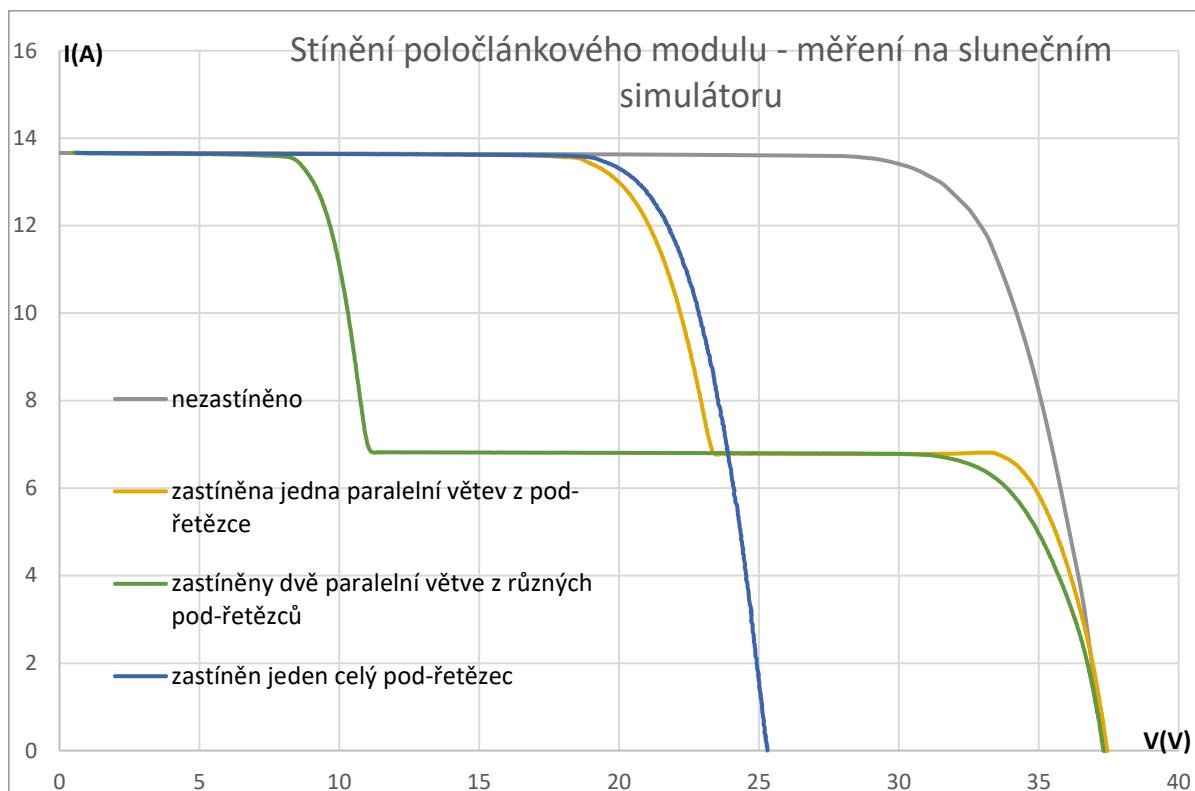
Všechny výsledné voltampérové charakteristiky celočlánekového modulu lze pozorovat na grafu 4



graf 4 - stínění celo-článekového modulu – měření na slunečním simulátoru



Všechny výsledné voltampérové charakteristiky poločlánekového modulu lze pozorovat na obrázku 5.



graf 5 - Stínění polo-článekového modulu – měření na slunečním simulátoru

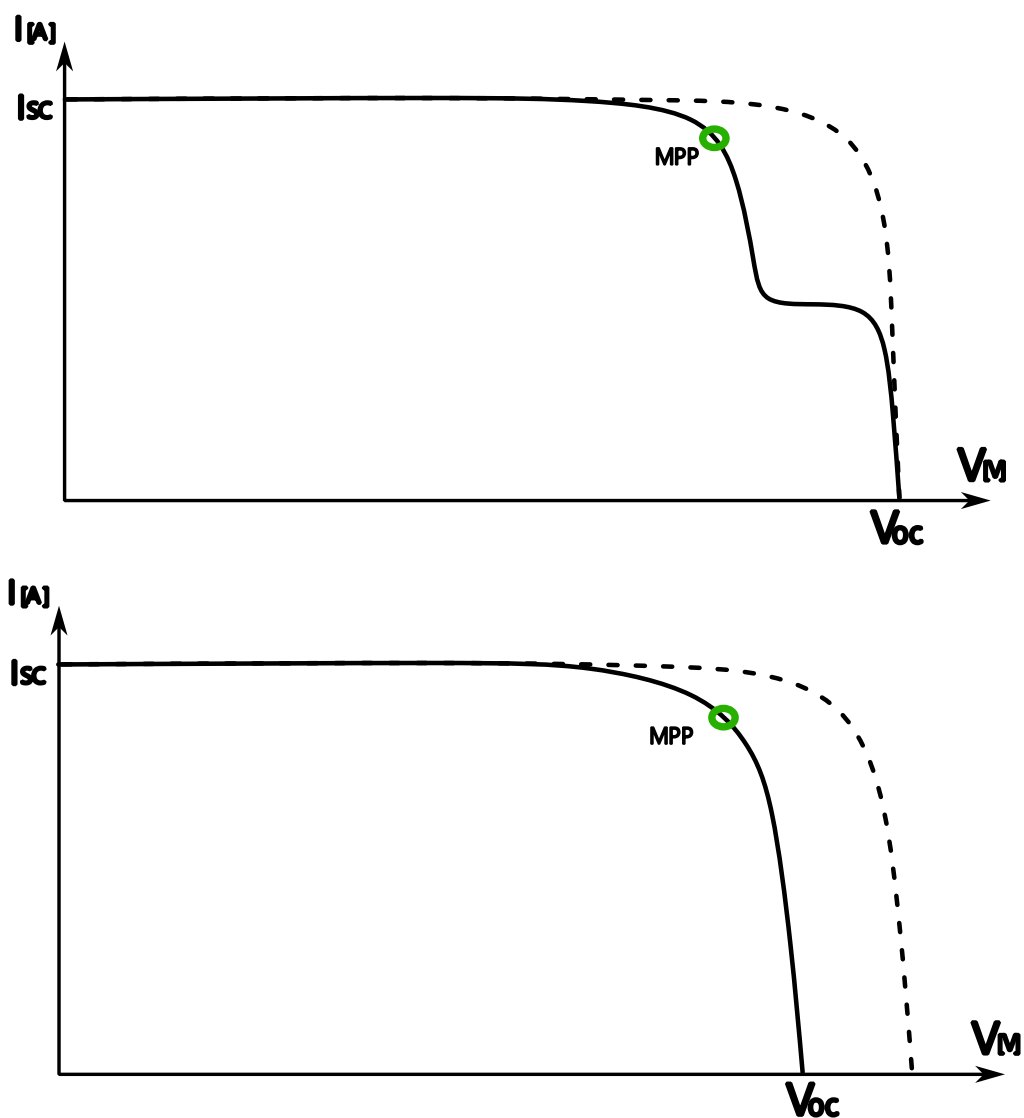
Naměřené voltampérové křivky potvrdily teoretické i simulované tvary křivek z předchozích kapitol. Také je vidět, že Software PV\*sol korektně reprodukuje chování překlenovacích diod v celočlánekové i v poločlánekové technologii. Při zastínění jedné paralelní větve z podřetězce, můžeme pozorovat ve výsledné voltampérové křivce vyskytující se část, odpovídající poklesu na přibližně 50 % proudu.





## Řetězce modulů

Pro komplexnější zhodnocení rozdílu celočláčkové a poločláčkové technologie je třeba pohlédnout na případ reálného systému tvořeného fotovoltaickým polem tvořeným větším počtem modulů. Chování zastíněných modulů ve fotovoltaickém poli lze také znázornit pomocí grafické metody viz obrázek 26. Lze očekávat, že bod maximálního výkonu řetězce modulů bude ovlivněn nezastíněnými moduly. MPP tracker (sledovač bodu MPP) nastaví pracovní bod modulů ve prospěch maximálního možného výkonu celého ovládaného řetězce/pole.



Obrázek 26 – grafické znázornění chování zastíněných modulů v poli

Pokud u poločláčkového modulu nastane případ stínění, kdy dojde k zastínění pouze jedné paralelní větve jednoho z pod-řetězců, je možné očekávat, že MPP tracker zvolí bod s vyšším proudem, který bude odpovídat maximálnímu možnému výkonu celého řetězce/pole a neprojeví se pak rozdíl mezi poločláčkovou a celo-čláčkovou technologií. Toto chování bude prozkoumáno simulacemi, které budou posuzovány pomocí výkonových křivek.

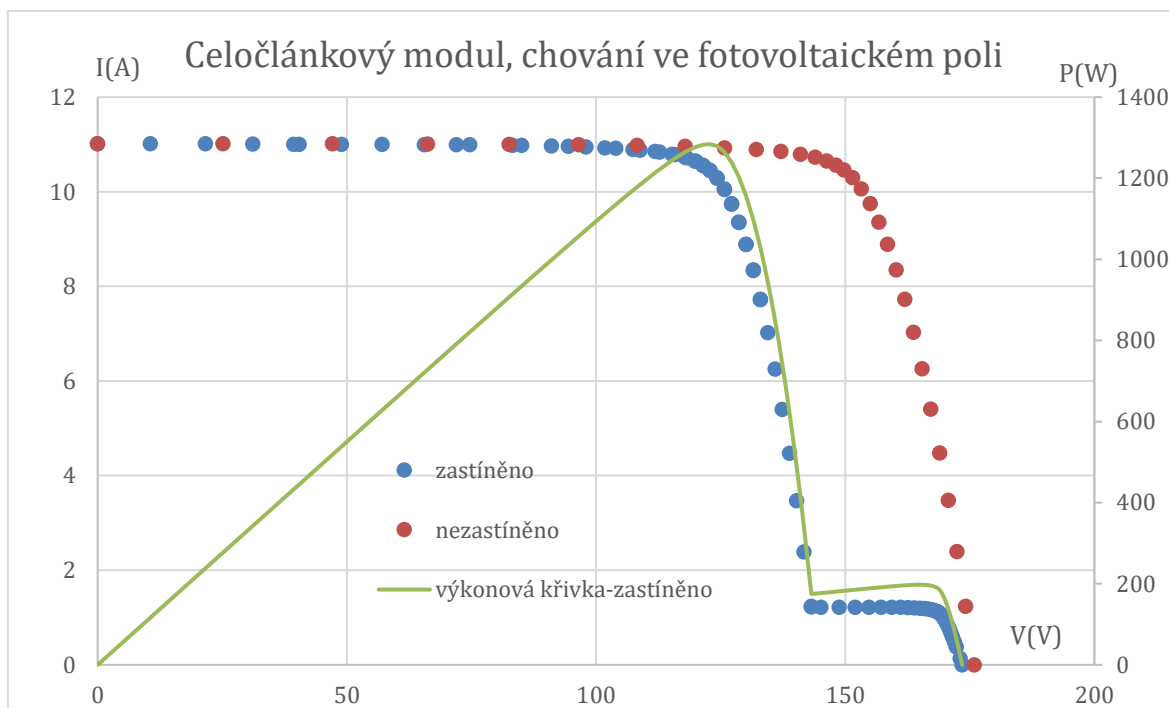


V programu PV\*sol, byl navrhnout model střechy s orientací na jih a sklonem 35 stupňů. Na střechu byly umístěny čtyři poločláňkové moduly LG440N2W-E6 a celočláňkové LG440QAC-A6. Moduly byly rozděleny podle typu technologie do řetězců, kde každý řetězec byl zapojen do vlastního střídače Solax X1 – mini – 1.5K-G4. Stínící prvky byly zvoleny stejné, jako u předchozích simulací. Zvolenou konfiguraci je možné vidět na obrázku 27. V programu PV\*sol byla nastavena simulace s minutovým krokem a byl vybrán den 25. června ve 12:48 (meteorologická data z Letiště Václava Havla, Praha).



Obrázek 27 - zvolená konfigurace pro simulaci vlivu difuzní složky

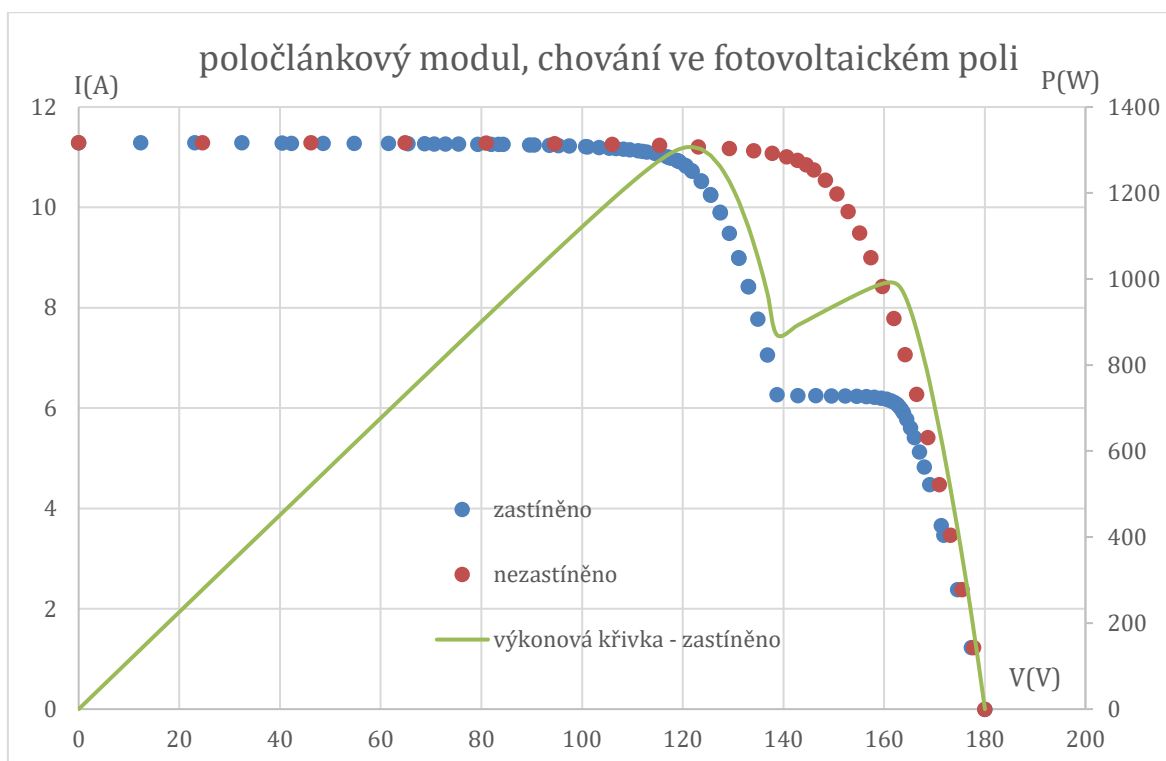
Výslednou voltampérovou charakteristiku pro řetězec celočláňkových modulů můžeme pozorovat v grafu 6. Charakteristika odpovídá stavu, kdy dva pod-řetězce modulu jsou zastíněny.



graf 6 - Celočláňkový modul, chování ve fotovoltaickém poli



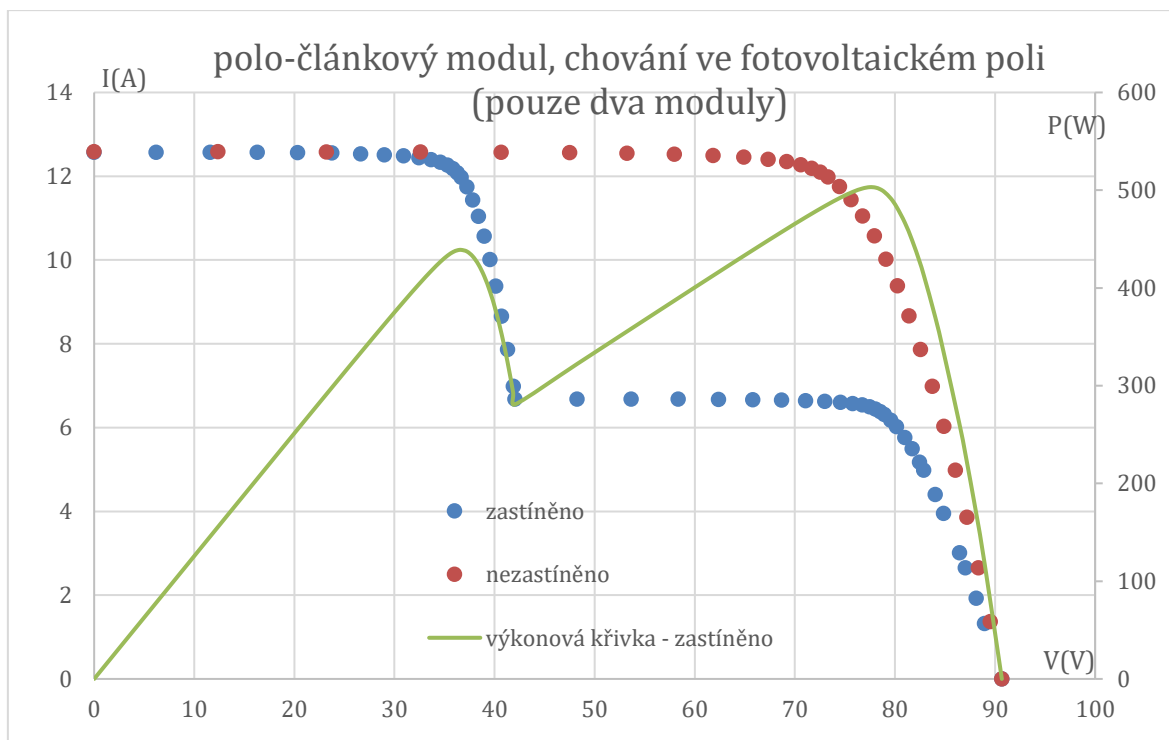
Výslednou voltampérovou charakteristiku pro řetězec poločlánekových modulů můžeme pozorovat v grafu 7. Charakteristika odpovídá stavu, kdy dvě nezávislé paralelní větve modulu jsou zastíněny. V části s grafickou metodou je tento stav popsán jako „Zastíněny dvě paralelní větve z různých pod-řetězců“



graf 7 - poločlánekový modul, chování ve fotovoltaickém poli

Ve voltampérové charakteristice můžeme pozorovat lokální a globální maximum výkonu. Jak již bylo zmíněno dříve, při stínění v programu PV\*sol stále dopadá na modul difuzní složka záření, nelze větve článků zastínit úplně. I přesto lze konstatovat, že sledovač MPP by vybral bod, kde má výkonová křivka maximum. V tomto případě stínění by výsledný výkon nezastíněnými paralelními větvemi pod-řetězců poločlánekového modulu nebyl využit.

Situace, ale záleží na aktuálním počtu u poločlánekových modulů v sériovém zapojení a aktuálním počtu zastíněných paralelních větví pod-řetězců. Výslednou voltampérovou charakteristiku pro řetězec dvou poločlánekových modulů můžeme pozorovat v grafu 8. Charakteristika odpovídá stavu, kdy v jednom modulu ve všech pod-řetězcích je zastíněna jedna paralelní větev (viz příloha).



graf 8 - poločlánkový modul, chování ve fotovoltaickém poli (pouze dva moduly)

Výsledná voltampérová charakteristika (graf 8) je zatížena chybou, jelikož hlavní řetězec pořád přijímá difuzní záření. I přesto však můžeme konstatovat, že výkonová špička by byla vyšší v oblasti snížení proudu na polovinu. Vidíme, že, jestli bude využit výkon z nezastíněných paralelních větví pod-řetězců, záleží na počtu modulů a jejich zastínění.

Simulace v PV\*sol se osvědčily jako sofistikovaný nástroj pro projektování fotovoltaických systémů. Software pracuje se stíněním a meteorologickými daty ve vybraných lokacích, je možné s ním projektovat nejrůznější fotovoltaické konfigurace. Výsledky pak evidentně mohou velmi spolehlivě reprodukovat efekty stínění a lze tak s velkou přesností zhodnotit, zdali vybraná konfigurace je uspokojující či nikoliv.



## Simulace vlivu úrovně osvětlení a difuzní složky na výtěžnost

Abychom však efekty stínění nepřeceňovali příliš, je třeba si uvědomit, že stíny se tvoří pouze pro přímé sluneční záření, přičemž v našich klimatických podmínkách je dokonce větší část dopadající energie ve formě difuzního záření.

Ve webové aplikaci solargis.info byla provedena analýza míst s různým ročním podílem difuzní složky záření. Na základě toho bylo vybráno Francouzské město Brest, které může mít pro některá období vyšší podíl difuzní složky. V aplikaci PV\*sol, byl vytvořen 3D model střechy a stínících prvků viz obr.28. Střecha má sklon 35 stupňů a je orientovaná na jih. Na střechu byly umístěny tři poločlánkové moduly LG440N2W-E6, zapojeny do jednoho řetězce, řetězec je zapojen do střídače Solax X1-1.1-S(L). Stínící prvky byly vytvořeny rozměrnější, aby při případném stínění zasáhly, co největší plochu modulů.

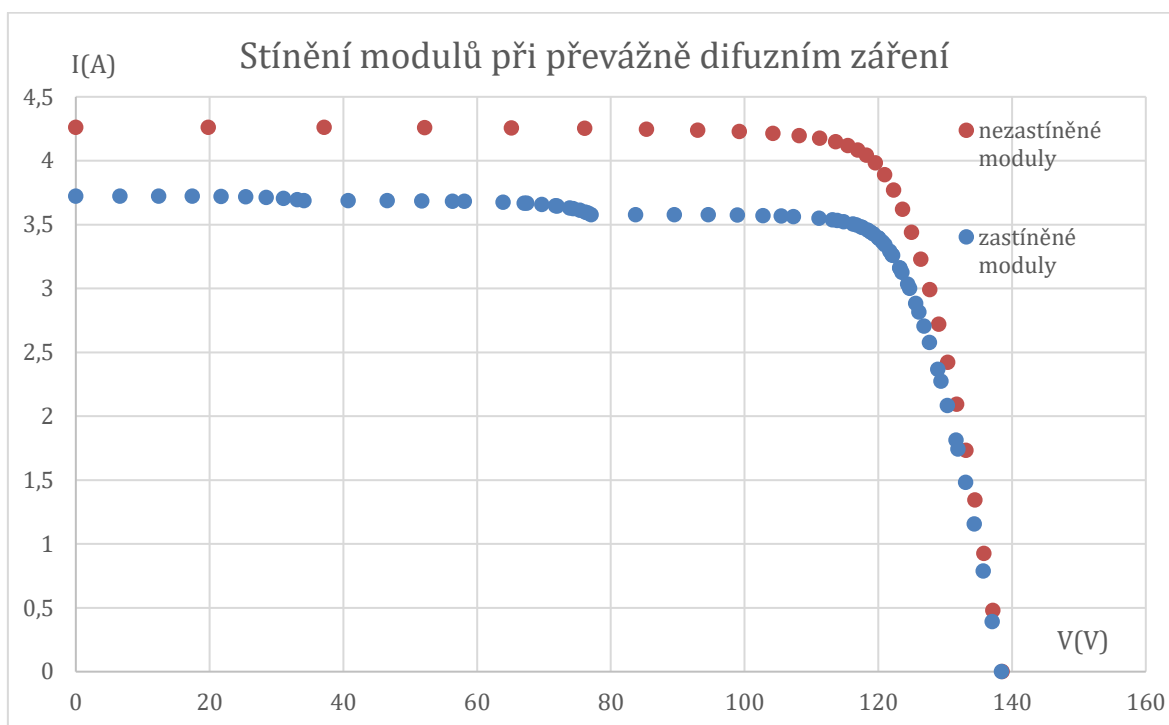


Obrázek 28 - konfigurace modulů a stínících prvků

Globální horizontální ozáření (v literatuře uváděno často jako GHI, global horizontal irradiation), které je získáno z klimatických dat v místě simulace, se skládá z přímé a difuzní složky (zdroj dat Meteonorm 8.2). V případě simulace s nakloněnými moduly se přímé i difuzní záření přepočítává na nakloněnou rovinu, do kalkulací se též započítává odraz země [9]. Lze si vybrat mezi různými výpočetními modely pro difuzní záření, ale byl ponechán výchozí tzv. Hofmannův model [10], jelikož se jedná se o nejnovější výpočetní model z nabízených modelů.



V programu PV\*sol byla nastavena simulace s minutovým krokem, pro lepší časové rozlišení a větší výběr výsledných VA charakteristik. Výsledné charakteristiky jsou vykreslovány pro celý řetězec modulů, tedy reflektují jak chování samotných článků, tak chování překlenovacích diod pro všechny moduly současně. Vybraná charakteristika ze dne 12. června v 13:47 vznikla při globálním záření na modul  $376,82 \text{ W/m}^2$  a difuzním podílem 95,4 %. Software umožňuje vykreslit křivky i bez stínění a rozdíl mezi jednotlivými křivkami je tedy hned patrný z grafu 9.



graf 9 - Stínění modulů při převážně difuzním záření

Stínění jednotlivých modulů je popsáno v tabulce 3:

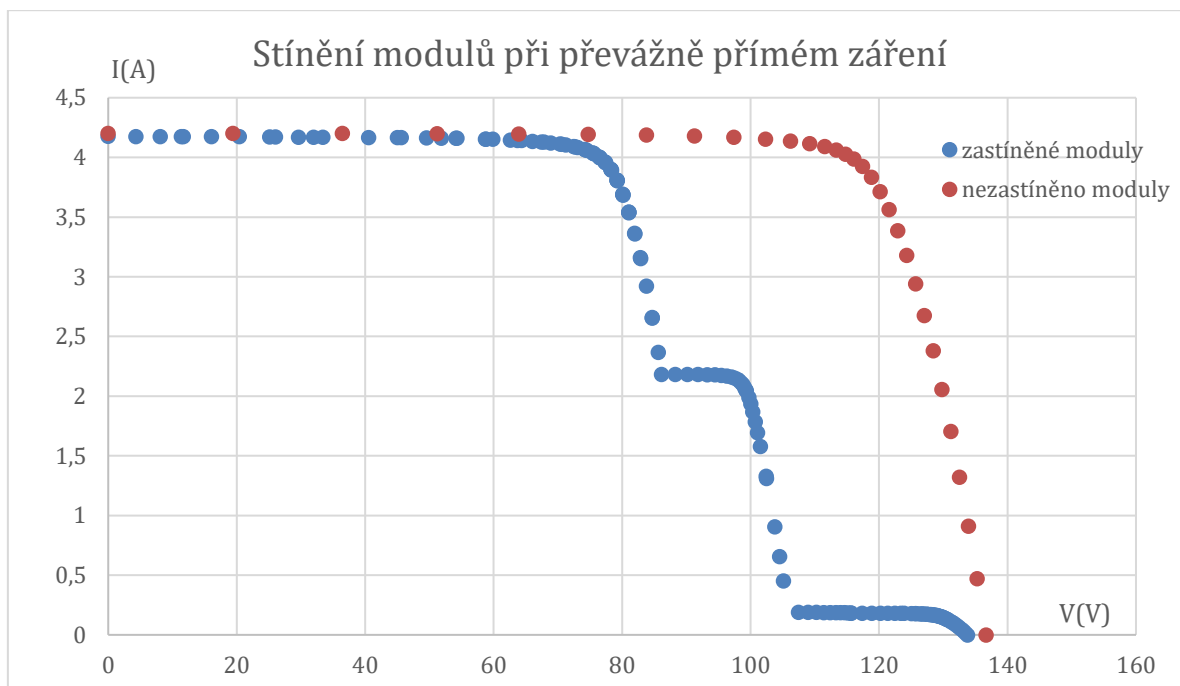
Tabulka 3 - procento zastínění jednotlivých modulů při převážně difuzním záření

moduly	Difuzní stínění (%)	Přímé stínění, krátká strana modulu (%)	Přímé stínění, dlouhá strana modulu (%)	Počet zastíněných řetězců článků (1)
1	11	70	49	3
2	15	70	50	3
3	12	70	50	3

Při takovémto vysokém procentu přímého zastínění pozorujeme relativně malý pokles VA křivky, a tedy lze očekávat malý pokles ve výkonu. To je vysvětleno právě velkým podílem difuzní složky a zároveň relativně malým difuzním stíněním.



Pro srovnání byla simulována situace, kdy převažuje přímá složka záření. Charakteristika vznikla 2. července v 17:59 při stejné konfiguraci modulů a stínění, ve stejné lokalitě. Globální záření na modul činilo  $370,91 \text{ W/m}^2$  s difuzním podílem pouze 15,2 %. Výslednou charakteristiku lze pozorovat v grafu 10.



graf 10 - Stínění modulů při převážně přímém záření

Stínění jednotlivých modulů je popsáno v tabulce 4

Tabulka 4 - procento zastínění jednotlivých modulů při převážně přímém záření

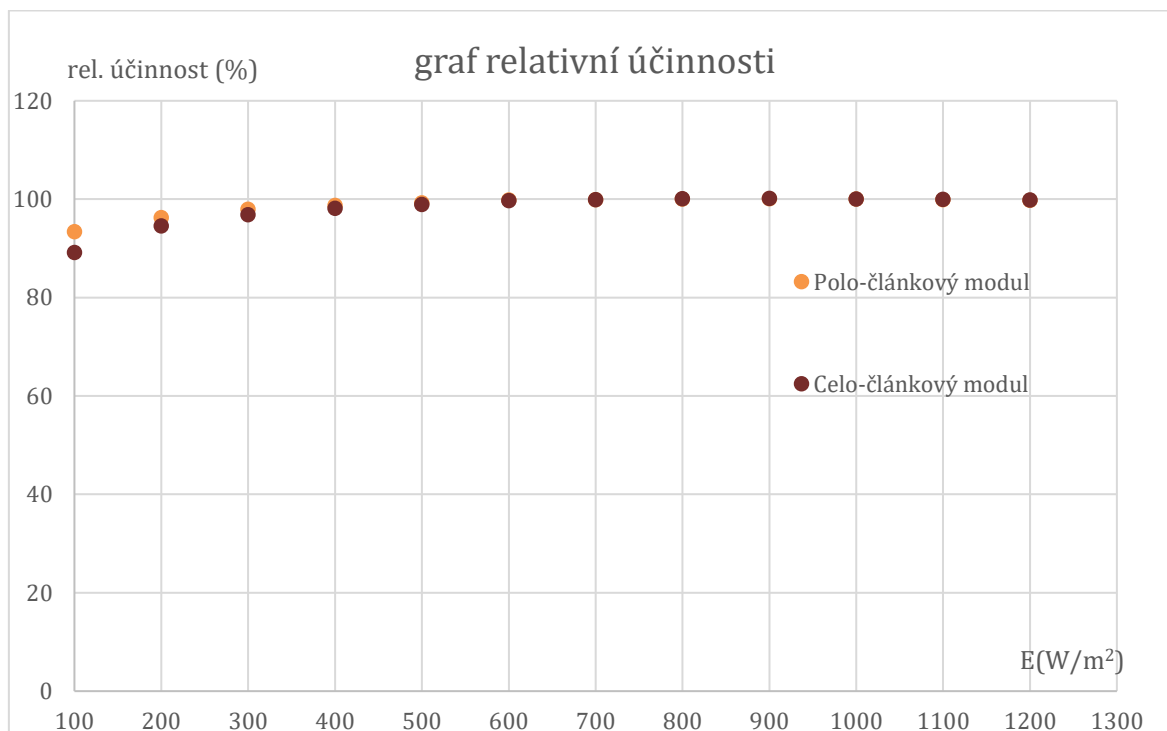
moduly	Difuzní stínění (%)	Přímé stínění, krátká strana modulu (%)	Přímé stínění, dlouhá strana modulu (%)	Počet zastíněných řetězců článků (1)
1	11	1	2	1
2	15	10	55	2
3	12	10	54	2

Při vyšším podílu složky přímého záření je zřetelný dopad stínů, lze pozorovat efekt překlenovací diody. I přes menší podíl zastínění než u předchozího případu, je VA křivka ponížena o zastíněné řetězce a výsledný výkon (při obdobné intenzitě záření) lze očekávat menší.



## Experimentální porovnání poločlánekových a celočlánekových modulů v závislosti na intenzitě záření

Dle [6] mají poločlánekové moduly relativně nižší účinnost při nižší intenzitě záření. Pro již dříve porovnávané moduly z hlediska stínění byla pomocí měření na flash testeru Pasan změřena charakteristika relativní účinnosti, při 25°C.



graf 11 - graf relativní účinnosti

Jak je možné pozorovat v grafu 11, tak změřený celočlánekový modul nemá vyšší relativní účinnost při nižší intenzitě záření.

Dle [6] a například i [11], byli porovnávány celočlánekové a poločlánekové moduly se stejnými články. Stejně články ale rozpůlené byly ovlivněny nedokonalostmi na půleném okraji a také jsou ovlivněny zvýšením poměru velikosti okraje k povrch článku, což vede k vyšší rekombinaci na krajích. [12]

Výše uvedená charakteristika je ovlivněna samotnými články modulů. Samotná technologie článků je velmi odlišná. Celočlánekový modul je polykrystalický, zatímco poločlánekový modul je monokrystalický PERC. Je třeba se podívat na technologii nejenom na úrovni modulů, ale i samotnou technologii článků a parametrů ovlivňující jejich výkon při změně intenzity záření





## Vliv technologických parametrů na závislost účinnosti na intenzitě záření

V kapitole o simulacích jsme s využitím dokumentace ke komerčnímu softwaru popsali matematický (empirický) a fyzikální (diodová rovnice) model chování FV součástek při nižších intenzitách záření. Vstupem do obou modelů jsou standardní parametry z datových listů od výrobce měřené při STC hodnotách a v případě matematického modelu také při jedné nižší intenzitě. Fyzikální model už ze své podstaty v sobě obsahuje i chování při nízkých intenzitách, avšak to předtím nebylo prakticky rozebráno. Fyzikální model pracuje na základě určení plné sady technologických parametrů, včetně  $R_S$  a  $R_p$ . Zatímco paralelní odpor  $R_p$  je dán kvalitou výroby jednotlivých křemíkových desek solárních článků (zejména izolace hran), tak sériový odpor  $R_S$  je dán hlavně metodou kontaktování a konstrukcí celého modulu. Zejména zde by se tedy měl projevit rozdíl mezi celo-čládkovou a poločládkovou technologií. Dále si tedy rozebereme fyzikální model z hlediska závislosti na osvětlení.

Pro ztotožnění technologických parametrů ovlivňující výkon fotovoltaického modulu v závislosti na intenzitě záření bude vhodné vycházet z již známé jedno-diodové rovnice:

$$I = I_{ph} - I_S \cdot \left( \exp \left( q \frac{V + I \cdot R_S}{n \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_S}{R_p} \quad [A] \quad (16)$$

Jelikož se v rovnici vyskytuje proud i napětí ve více jejích členech, nelze s ní pracovat bez zjednodušení.

### Stav nakrátko

Následující zjednodušení nelze použít při vysokých sériových odporech.

Při zanedbání parazitních odporů se zjednoduší výraz na:

$$I_{SC} = I_{ph} - I_S \cdot \left( \exp \left( q \frac{V}{n \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right) \quad [A] \quad (17)$$

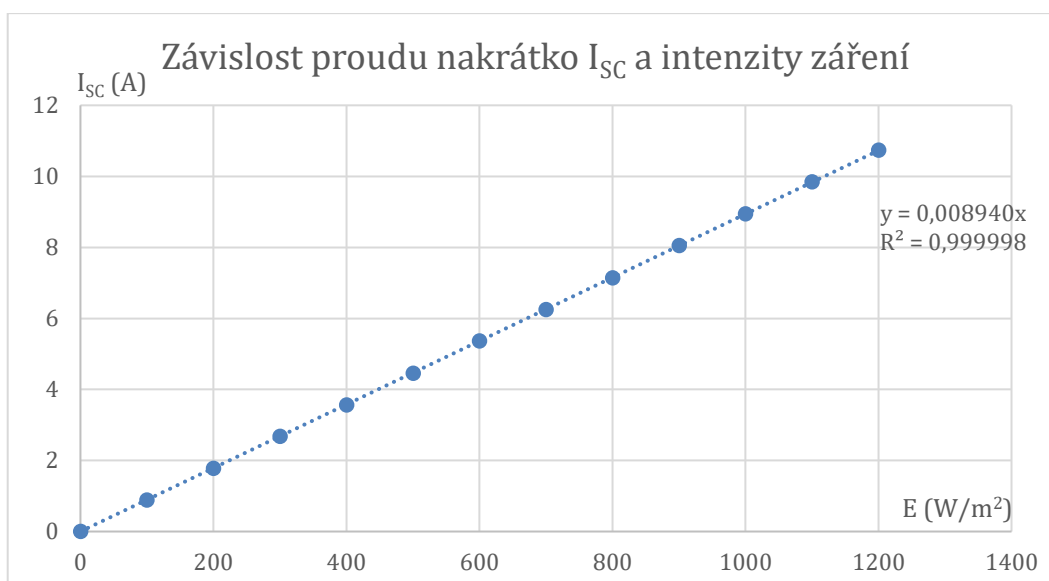
V bodě nakrátko, tedy při nulovém napětí, je exponenciála rovna jedné a tím se celá závorka rovná nule:

$$I_{SC} \approx I_{ph} \quad [A] \quad (18)$$

Foto-generovaný proud  $I_{ph}$  je úměrný intenzitě záření  $E$  (viz kapitola s charakteristickými křivkami PV\*sol):

$$I_{ph} = \textit{konstanta} \cdot E \quad [A] \quad (19)$$

Tedy dostáváme úměrnost, se kterou pracuje též matematický model v simulacích kapitole. Otázkou je, jak velkých zanedbáních jsme se dopustili. Pro tento účel byla tato závislost ověřena měřeními na flash testeru Pasan v akreditované laboratoři. Byla pozorována téměř dokonalá linearita, viz vysoká hodnota  $R^2$  v grafu 12, a to i pro relativně starší modul. Protože charakteristiky byly pro celo-čládkovou a poločládkovou technologii obě lineární, je zde uveden pouze výsledek pro celo-čládkový modul Amerisolar poly B 270W.



graf 12 - Závislost proudu nakrátko  $I_{SC}$  a intenzity záření

Z tohoto měření plyne, že jelikož je proud lineárně závislý na intenzitě záření, nelze v něm shledat klíčový parametr pro změnu relativní účinnosti v závislosti na změně intenzity záření.

## Napětí naprázdno

Vydeme opět z plnohodnotné diodové rovnice. Jelikož není možné napsat diodovou rovnici v explicitním tvaru, který by byl navíc invertovatelný, je vhodné ji rozdělit na členy které v daném rozsahu hodnot napětí dominují.

Lineární člen 
$$I = I_{ph} - \frac{V+I \cdot R_s}{R_p} [A] \quad (20)$$

Exponenciální člen 
$$I = I_{ph} - I_s \cdot \left( \exp \left( q \frac{V+I \cdot R_s}{n \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right) [A] \quad (21)$$

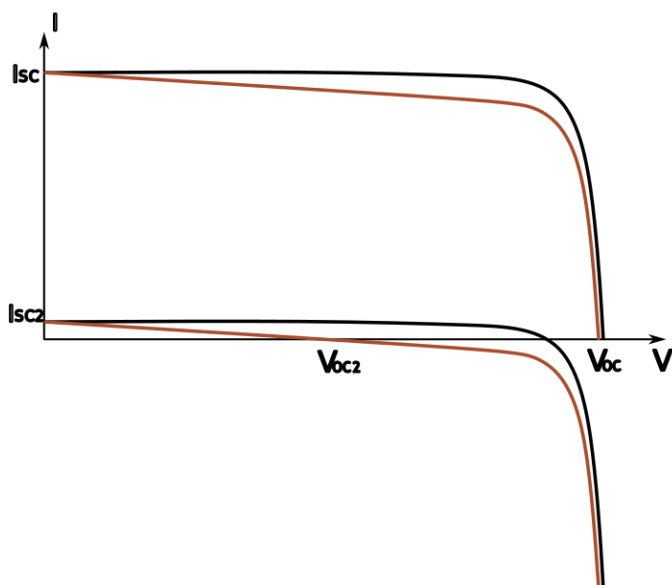
Vzhledem k vlastnostem exponenciální funkce, kdy je ze začátku méně rostoucí, lze předpokládat, že pro nižší napětí a menší paralelní odpor je dominantnější lineární člen. Pro vyšší napětí a vyšší paralelní odpor dominuje exponenciální člen. Existuje však nemalá oblast, kde hrají roli oba členy.

## Lineární člen

Platí předpoklad nízkého napětí a nízkého  $R_p$  a nepříliš velkého  $R_s$ : Lineární člen ve stavu naprázdno, tedy při nulovém proudu přejde na tvar:

$$V_{OC} \approx I_{ph} \cdot R_p [V] \quad (22)$$

Vidíme tudíž lineární závislost napětí na foto-generovaném proudu. Jeho charakteristika byla již popsána výše. Tedy pro malé odpory  $R_p$  a malé intenzity je i napětí malé. (Nyní vidíme, že předpoklad je splněn.) Vliv paralelního odporu při různých intenzitách si lze znázornit graficky, viz obr.29. Při nižších intenzitách záření (VA křivka posunutá dolů) lze pozorovat ztelný rozdíl hodnoty napětí naprázdno, hnědá křivka a  $V_{OC2}$  reprezentují články s nižším paralelním odporem. Ideální paralelní odpor je největší možný. Obr. 29 je pouze grafické znázornění možného případu, tato charakteristika nebyla naměřena.



Obrázek 29 – vliv paralelního odporu se změnou intenzity záření

Takový pokles napětí naprázdno vede k celkovému poklesu výkonu a tím i relativní účinnosti, nehledě ani na další pokles faktoru plnění vlivem tvaru části V-A křivky nad osou x. Dle [13] je paralelní odpor klíčovým parametrem při nízké intenzitě záření, a jeho difference může způsobit až desetiprocentní rozdíl v roční energetické bilanci fotovoltaického systému. Nižší hodnoty paralelního odporu  $R_p$  jsou připisovány horšímu zpracování, nebo špatné kvalitě základních surovin a jsou dnes již výjimkou. [13]

### Exponenciální člen

Platí předpoklad vyššího napětí a vysokého  $R_s$  a nepříliš malého  $R_p$ : Exponenciální člen ve stavu naprázdno se rovnice zjednoduší na výraz:

$$0 = I_{ph} - I_s \cdot \left( \exp \left( q \frac{V_{OC}}{n \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right) [A] \quad (23)$$

Po úpravě rovnice a vyjádření napětí naprázdno  $V_{OC}$ :

$$V_{OC} \approx \frac{n \cdot k \cdot T}{q} \cdot \ln \left( 1 + \frac{I_{ph}}{I_s} \right) [V] \quad (24)$$

Tento výraz je čteně zmiňován v literatuře, např. [2]. Zde je možno upozorovat vliv jednotlivých členů na relativní účinnost při nižším osvětlení. Klesá-li intenzita, klesá úměrně i  $I_{ph}$  a logaritmičtě klesá i  $V_{OC}$ . Jde-li pouze o relativní účinnost vůči STC, zajímá nás pouze derivace podle  $I_{ph}$ . Obvykle je  $I_{ph}/I_s \gg 1$  a lze tedy zanedbat 1 v závorce. Snadno odvodíme, že jediný vliv na velikost derivace má faktor ideality  $n$ . Faktor ideality je známka kvality p-n přechodu a typu rekombinace v článku, pro ideální p-n přechod je faktor ideality roven 1. [1]

Dále je vidět, že sériový odpor nemá vliv na napětí naprázdno.



## Fill factor

Fill factor, neboli faktor plnění byl už dříve definován jako:

$$FF = \frac{V_{MPP} \cdot I_{MPP}}{V_{OC} \cdot I_{SC}} [1] \quad (1)$$

Dříve již byla věnována pozornost napětí naprázdno  $V_{OC}$ , které se nemění vlivem sériového odporu, ale mění se za nízkého osvětlení vlivem paralelního odporu. Nyní vyšetříme chování v okolí bodu MPP:

$$I_{MPP} = I_{ph} - I_S \cdot \left( \exp \left( q \frac{[V_{MPP} + I_{MPP} \cdot R_s]}{n \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right) - \frac{[V_{MPP} + I_{MPP} \cdot R_s]}{R_p} [A] \quad (25)$$

Vidíme, že vliv sériového odporu je pouze ve členu  $V_{MPP} + I_{MPP} \cdot R_s$ . Pro situaci kdy  $R_s = 0$  označíme napětí v bodě MPP jako  $V_{MPP, R_s=0}$ . Z grafického znázornění VA křivky plyne, že v bodě MPP sériový odpor ovlivňuje zejména napětí. Budeme-li předpokládat, že proud se při odstranění sériového odporu nezmění vůbec, je triviální, že se nemění ani člen v hranatých závorkách a tedy platí:

$$V_{MPP} = V_{MPP, R_s=0} - I_{MPP} \cdot R_s [V] \quad (26)$$

Dle [14] je porovnávána celočláneková a poločláneková technologie z hlediska zabudování samotných článků do modulu. Pro porovnání byl použit analogický vzorec:

$$V_{MPP, modulu} = V_{MPP, článku} - I_{MPP, článku} \cdot R_{s, propojení} [V] \quad (27)$$

Jelikož je u poločlánekových modulů při paralelním spojení článků do řetězců, nižší ohmická ztráta v důsledku polovičního proudu, dochází k menšímu úbytku napětí. Tím, že se sníží úbytek napětí při zabudování článku do modulu, zvýšilo se napětí  $U_{MPP}$  a ve výsledku se zvýšil i faktor plnění FF.

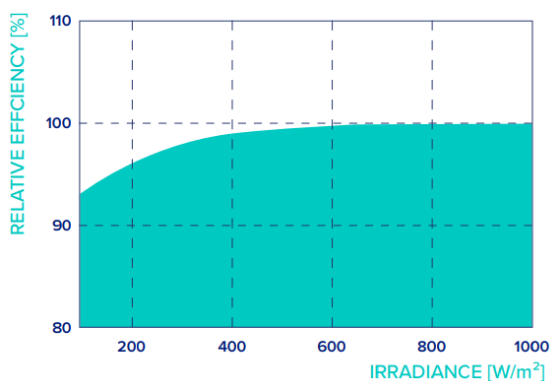
Pro nás důležitým aspektem je také chování pro různé intenzity. Již víme, že intenzitu nejlépe reprezentuje hodnota proudu  $I_{ph}$ , z modelu PV\*sol víme, že ta je přibližně úměrná proudu  $I_{MPP}$ , tudíž předchozí rovnice velmi dobře reprezentuje také intenzitní závislost vlivu sériového odporu. Je vidět, že tato závislost má negativní sklon ve směru vyšší intenzity, a tedy pozitivní sklon ve směru nižších intenzit. To znamená, že novější technologie s menším členem  $I_{MPP, článku} \cdot R_{s, propojení}$  musí mít menší nárůst napětí pro nižší intenzity, pokud se jedná o vliv sériového odporu.



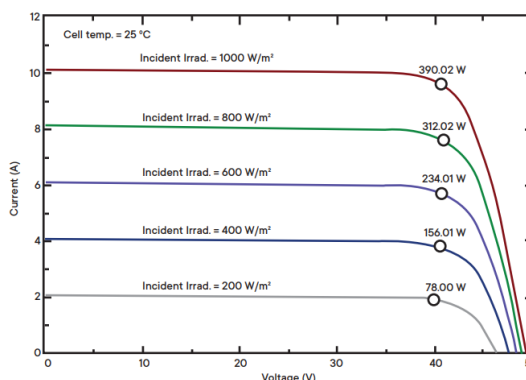
## Chování účinnosti při nižší intenzitě záření pro různé moduly na současném trhu

Je jen na samotných výrobcích, zda informace o chování modulu za různých intenzit záření bude uvádět v katalogovém listu. Na současném trhu je patrný různorodý přístup k této problematice. Některé katalogové listy obsahují specifikace o výkonnosti modulů při nižším osvětlení, zatímco jiné ne. Nejčastěji se lze setkat s moduly, které buďto úplně postrádají data o svém chování v podmínkách nižšího osvětlení, nebo sice poskytují VA křivky pro různé intenzity záření, avšak bez uvedeného výkonu v bodě maximálního výkonu (MPP) a mají nízké rozlišení os, což komplikuje přesné odečítání údajů.

Avšak někteří výrobci chování jejich modulů při různých intenzitách záření uvádí. Například společnost BISOL slovně uvádí pro svůj modul „Monocrystalline PV Module BDO 400Wp“, že při intenzitě záření  $200 \text{ W/m}^2$  má modul 99,3% účinnost STC (relativní účinnost). Někteří výrobci (např. Kaylon) uvádí VA křivky při různých intenzitách záření s uvedeným výkonem v bodě MPP, viz obr.31. Společnost Hanwha Q CELLS GmbH dokonce ve svých katalogových listech uvádí charakteristiku relativní účinnosti, viz obr.30. Katalogové listy jsou uvedeny v příloze.



Obrázek 30 Q CELLS - Q.PEAK DUO M-G11S+ SERIES



Obrázek 31 Kaylon - M10-108 GLASS-BACKSHEET

Pokud bychom měli například srovnat moduly od společnosti BISOL a Hanwha Q CELLS, tak můžeme konstatovat, že na obrázku 30 je při intenzitě záření  $200 \text{ W/m}^2$  zcela jistě výrazně menší relativní účinnost, než 99,3 % u výše zmíněného modulu od společnosti BISOL.

V chování jednotlivých modulů při různé intenzitě záření je rozptýl a nelze jednoznačně nějaké chování přiřadit určité technologii. Toto tvrzení lze přiřknout nejen celočláňkové a poločláňkové technologii neboli efektu sériového odporu, ale i technologii jednotlivých čláňků neboli efektu faktoru ideality.



## Závěr

V této diplomové práci jsme se zaměřili na porovnání celočláňkové a poločláňkové technologie modulů při stínění a vlivu nízké intenzity záření na účinnost modulu.

Ze začátku práce byly stanoveny parametry, které slouží pro popis výkonu fotovoltaických článků/modulů. Poté byla věnována pozornost měření fotovoltaických modulů pomocí solárních simulátorů. Následně byla vytvořena rešeršní práce, která byla věnována komerčnímu softwaru PV\*sol. Byly popsány výpočetní modely softwaru PV\*sol, které slouží pro stanovení voltampérové charakteristiky. Voltampérové charakteristiky jsou důležitým parametrem pro posouzení správného chování softwaru. Na jejich základě se zpracovává předpokládaný roční úhrn získané elektrické energie fotovoltaických systémů, na základě tvorby těchto křivek jsou navrhované reálné instalace fotovoltaických elektráren.

Součástí softwaru PV\*sol je i simulace stínění modulů, které vzniká od okolních prvků. V samotných simulacích se zohledňuje vliv přímě i difuzní složky, což je důležitý faktor při stínění. Následně bylo popsáno vnitřní zapojení jednotlivých technologií modulů, dělení do pod-řetězců a byl popsán vliv překlenovacích diod. Dále byl popsán vliv montáže modulu, který je důležitým aspektem u stínění celočláňkových modulů. Jelikož je poločláňkový modul rozdělen do více větví článků, je méně závislý na nedostatečně promyšleném umístění při instalaci. Což znázorňuje i grafická metoda vytvořená v rámci teoretické přípravy pro měření a simulace. Poločláňkový modul obsahuje teoreticky více možných případů stínění. Teoretické tvary voltampérových charakteristik odpovídaly i v simulacích. Vše následně potvrdilo měření na slunečním simulátoru Pasan na půdě Katedry elektrotechnologie FEL ČVUT v Praze. Tvary voltampérových charakteristik v simulacích odpovídají naměřeným tvarům, což potvrzuje jejich správnost.

Následně byly provedeny simulace stínění modulu zapojeného do řetězce s dalšími nezastíněnými moduly. To, jestli sledovač pracovního bodu MPP využije i nezastíněné paralelní větve pod-řetězce poločláňkového modulu, záleží na okolnostech. Záleží na počtu nezastíněných modulů a samotné konfiguraci zastínění modulu. Dále byla vytvořena simulace na zkoumání vlivu difuzní složky záření. Bylo ověřeno, že v lokalitách s převažující difuzní složkou není tak patrný efekt stínů a tím pádem není ani tolik znatelný úbytek výkonu při stínění. Výhoda rozdělení celočláňkového modulu do více větví nemusí být tak patrná.

V rámci zkoumání chování poločláňkové a celočláňkové technologie za nižší intenzity záření byl vytvořen graf relativní účinnosti. Původní předpoklad lepšího chování celočláňkové technologie za nižší intenzity záření se nevyplnil, jelikož technologie článků byla rozdílná. Zjednodušením jedno-diodového fyzikálního modelu byly analyticky zhodnoceny technologické parametry, které na účinnost za nižšího ozáření mají vliv. Jeden z klíčových parametrů byl shledán ve faktoru ideality  $n$ , který vypovídá o kvalitě p-n přechodu a typu rekombinace v článku. Další klíčový parametr byl shledán v paralelním odporu  $R_p$ , který je



připisován horšímu zpracování, nebo je také připisován špatné kvalitě základních surovin. Nicméně to je dnes již výjimkou.

Poslední klíčový parametr byl shledán v sériovém odporu, který je spojován s poločlámkovou technologií. Jelikož je u poločlámkových modulů při paralelním spojení článků do řetězců, nižší ohmická ztráta v důsledku polovičního proudu, dochází k zvýšení faktoru plnění  $FF$ . Naše úvahy plně korespondují s odbornou literaturou, na níž je odkazováno v textu práce. Bylo konstatováno, že očekávaný relativní nárůst účinnosti pro starší celočlámkové moduly s vyšším sériovým odporem je velmi často kompenzován jejím poklesem vinou horšího faktoru ideality.

Rovněž v chování jednotlivých modulů na současném trhu při různé intenzitě záření je značný rozptyl a nelze jednoznačně nějaké chování přiřadit určité technologii. V každém případě účinnost článků/modulů stoupá obecně s vývojem nových technologií a jde i ruku v ruce s přechodem na poločlámkovou technologii.



## Citovaná literatura

1. A. H. M. Smets, K. Jäger, O. Isabella, R. van Swaaij, a M. Zeman. *Solar energy: the physics and engineering of*. Cambridge, England : UIT Cambridge, 2016. ISBN: : 978-1906860325.
2. Mertens, Konrad. *Photovoltaics: Fundamentals, Technology, and Practice. 2nd Edition*. Chichester, United Kingdom : John Wiley & Sons Ltd, 2019. ISBN: 978-1-119-40133-9.
3. Characteristic curve models. *PV\*SOL®Help*. [Online] [Citace: 10. duben 2023.] <https://help.valentin-software.com/pvsol/en/calculation/pv-modules/characteristic-curve-models>.
4. X. Ma, S. Bader, B. Oelmann. "On the Performance of the Two-Diode Model for Photovoltaic Cells Under Indoor Artificial Lighting,". *IEEE Access*. 2021, Sv. vol. 9, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3047158, stránky 1350-1361.
5. Quaschnig, Volker. *Understanding renewable energy systems*. UK : Earthscan Publications Ltd, 2005. ISBN: 1-84407-136-7.
6. ] M. Chiodetti, J. Dupuis, D. Boubilil, K. Radouane, a P. Dupeyrat,. "Half-Cell Module Behaviour and Its Impact on the Yield of a PV Plant", 36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. 2019, stránky 1444-1448.
7. Quaschnig, Volker. *Simulation der Abschattungsverluste bei solarelektrischen Systemen*. Berlin : Verlag Dr. Köster, 1996. ISBN 3-89574-191-4.
8. Shading due to nearby objects. *PV\*SOL® Help*. [Online] [Citace: 15.. duben 2023.] <https://help.valentin-software.com/pvsol/en/calculation/pv-modules/shading-due-to-nearby-objects/>.
9. "Irradiation onto inclined plane". *PV\*SOL®Help*. [Online] [Citace: 25. Listopad 2023.] <https://help.valentin-software.com/pvsol/en/calculation/irradiation/irradiation-onto-inclined-plane/>.
10. Hofmann, Martin & Seckmeyer, Gunther. "A New Model for Estimating the Diffuse Fraction of Solar Irradiance for Photovoltaic System Simulations". *Energies*. , 2017. Sv. 10, 248. DOI: 10.3390/en10020248.
11. Max Mittag et al. "TECHNO-ECONOMIC ANALYSIS OF HALF CELL MODULES - THE IMPACT OF HALF CELLS ON MODULE POWER AND COSTS". *PV Module Technology*. Marseille (France) : Conference: 36th EU PV Solar Energy Conference and Exhibition, 2019. DOI: 10.4229/EUPVSEC20192019-4AV.1.20.
12. Andreas Fell et al. "Modeling of Edge Recombination Losses in Half-Cells". Amsterdam : Conference: EU PVSEC 2017, 2017. DOI: 10.4229/EUPVSEC20172017-2CV.2.36.
13. Grunow et al. ". Weak light performance and annual yields of PV modules and systems as a result of the basic parameter set of industrial solar cells". Paris, France : 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 2004.
14. J.Müller et al. "Resistive Power Loss Analysis of PV Modules Made From Halved 15.6 × 15.6 cm<sup>2</sup> Silicon PERC Solar Cells With Efficiencies up to 20.0%". *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2015. Sv. 5, 1. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2014.2367868.