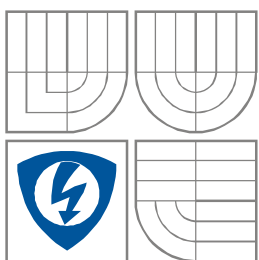


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A

KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

VLIV STÍNĚNÍ NA I – U CHARAKTERISTIKY FOTOVOLTAICKÝCH MODULŮ

INFLUENCE OF SHADING ON I – V CHARACTERISTICS OF PHOTOVOLTAIC
MODULES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Hájek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Křivík, Ph.D.

BRNO, 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektrotechnická výroba a management

Student: Bc. Tomáš Hájek

ID: 83714

Ročník: 2

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Vliv stínění na I-U charakteristiky fotovoltaických modulů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s charakteristikami fotovoltaických modulů a s možnostmi jejich simulace.

Prozkoumejte vliv stínění na I-U a P-U charakteristiky fotovoltaických modulů.

Osvojte si základy práce s programem VEE Pro 8.0.

Vytvořte program simulující I-U a P-U charakteristiky fotovoltaických modulů při proměnném zastínění fotovoltaických článků modulu.

Výsledné charakteristiky získané programem porovnejte s charakteristikami naměřenými na reálném fotovoltaickém modulu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 27.5.2010

Vedoucí práce: Ing. Petr Křivík, Ph.D.

prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Licenční smlouva poskytovaná k výkonu práva užít školní dílo

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Tomáš Hájek
Bytem: Nerudova 940, Vrchlabí, 54301
Narozen/a (datum a místo): 4.11.1983, Vrchlabí
(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 244/53, 602 00 Brno
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
 - diplomová práce
 - bakalářská práce
 - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Vliv stínění na I-U charakteristiky fotovoltaických modulů

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Petr Křivík, Ph.D.

Ústav: Ústav elektrotechnologie

Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

- tištěné formě – počet exemplářů 2
- elektronické formě – počet exemplářů 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 27. 5. 2010

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Abstrakt:

Předkládaná práce se zabývá principy fotovoltaiky. Popisuje základní principy fungování fotovoltaických panelů a jednotlivé generace jejich vývoje. Práce je dále zaměřena na teoretické poznatky o ekvivalentních obvodech k fotovoltaickým panelům. Hlavním cílem práce je návrh simulačního prostředí v programu Agilent VEE Pro 8.0. Programové prostředí umožňuje simulaci I-U charakteristik reálných fotovoltaických panelů.

Abstract:

The presented thesis is concerned with the principles of Photovoltaics. It describes the basic principles of photovoltaic panels functioning and the unique periods of their development. The thesis is also focused on the theoretical knowledge of equivalent circuits of photovoltaic panels. The primary objective of the thesis is a project of simulation environment in the programme Agilent VEE Pro 8.0. The programme enables a simulation of I-U characteristics of real photovoltaic panels.

Klíčová slova:

Fotovoltaika, fotovoltaický panel, simulace, stínění, ekvivalentní obvod

Keywords:

Photovoltaic, Photovoltaic panel, simulation, shaded, equivalent circuit

Bibliografická citace díla:

HÁJEK, T. *Vliv stínění na I-U charakteristiky fotovoltaických modulů*. Brno, 2010. 62 s.

Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Křivík, Ph.D. FEKT VUT v Brně

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 27. 5. 2010

.....

Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Křivíkovi, Ph.D. za metodické a cíleně orientované vedení při plnění úkolů realizovaných v průběhu zpracovávání diplomové práce.

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

POPISNÝ SOUBOR ZÁVEREČNÉ PRÁCE

Autor: Bc. Tomáš Hájek

Název závěrečné práce: Vliv stínění na I – U charakteristiky fotovoltaických modulů

Název závěrečné práce ENG: Influence of shading on I – V characteristics of photovoltaic modules

Anotace závěrečné práce:

Předkládaná práce se zabývá principy fotovoltaiky. Hlavním cílem práce je návrh simulačního prostředí v programu Agilent VEE 8.0. Programové prostředí umožňuje simulaci I-U charakteristik reálných fotovoltaických panelů.

Anotace závěrečné práce ENG:

The presented thesis is concerned with the principles of Photovoltaics. The primary objective of the thesis is a project of simulation environment in the programme Agilent VEE 8.0. The programme enables a simulation of I-U characteristics of real photovoltaic panels.

Klíčová slova:

Fotovoltaika, fotovoltaický panel, simulace, stínění, ekvivalentní obvod

Klíčová slova ENG:

Photovoltaic, Photovoltaic panel, simulation, shaded, equivalent circuit

Typ závěrečné práce: diplomová

Datový formát elektronické verze: formát pdf

Jazyk závěrečné práce: český

Přidělovaný titul: Ing.

Vedoucí závěrečné práce: Ing. Petr Krivík, Ph.D.

Škola: Vysoké učení technické v Brně

Fakulta: Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav: Ústav elektrotechnologie

Studijní program: Elektrotechnika, elektronika, komunikační a řídicí technika

Studijní obor: Elektrotechnická výroba a management

Obsah

1. ÚVOD	10
2. FOTOVOLTAIKA [1], [2], [3]	11
2.1 Solární energie	11
2.2 Vývoj fotovoltaiky.....	11
2.3 Trendy v oblasti článků z krystalického křemíku.....	13
2.3.1 První generace	14
2.3.2 Druhá generace.....	14
2.3.3 Třetí generace	14
3. PRINCIP FUNKCE FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ	16
4. VLIV ZASTÍNĚNÍ	18
5. EKVIVALENTNÍ OBVODY [5]	20
5.1 Jednoduchý ekvivalentní obvod	20
5.2 Rozšířený ekvivalentní obvod (jedno – diodový model).....	21
5.3 Dvou – diodový model	24
5.4 Dvou – diodový model s rozvinutým členem.....	25
5.5 Ostatní elektrické parametry fotovoltaických článků.....	26
5.6 Teplotní závislost.....	29
5.7 Odhad parametrů	30
6. ELEKTRICKÝ POPIS FOTOVOLTAICKÉHO MODULU [5]	32
6.1 Sériové zapojení fotovoltaických článků.....	32
6.2 Sériové zapojení dle nehomogenních podmínek	34
7. PRAKTICKÉ MĚŘENÍ	39
7.1 Osvětlení fotovoltaického panelu	41
7.2 Reálný fotovoltaický panel.....	42
7.2.1 I-U a P-U charakteristiky reálného fotovoltaického panelu ($h = 30 \cdot 10^{-2}$ m).....	43
7.2.2 I-U a P-U charakteristiky reálného fotovoltaického panelu ($h = 15 \cdot 10^{-2}$ m).....	45
8. SIMULAČNÍ PROGRAM	47
8.1 Programovací prostředí.....	47
8.2 Metoda výpočtu	48
8.3 Simulační prostředí.....	49

8.3.1 Simulace	52
8.4 Hledání charakteristických konstant	53
8.4.1 Příklad výpočtu charakteristických konstant C_1, C_2	54
8.5 Simulace reálného fotovoltaického panelu	55
8.6 Simulace vlivu zastínění	56
8.6.1 Simulace vlivu zastínění 1 článku na 24 – článkovém panelu	56
8.6.2 Simulace vlivu zastínění 6ti článků na 24 – článkovém panelu	57
9. ZÁVĚR.....	58
10. POUŽITÁ LITERATURA	59
SEZNAM OBRÁZKŮ	60
SEZNAM TABULEK.....	62

1. ÚVOD

Fotoelektrický jev objevil Alexandre Edmond Becquerel v roce 1839. Fotovoltaika patří k nejperspektivnějším alternativním zdrojům energie. Hlavním principem je přeměna sluneční energie na elektrickou. Význam fotovoltaiky jako energetického zdroje se neustále zvyšuje. Hlavní výhodou tohoto zdroje je fakt, že světlo je nevyčerpatelný a hlavně také ekologický zdroj energie.

Fotovoltaické panely prošly několika generacemi vývoje. Jejich vývoj a výroba je poměrně drahá. Proto je vhodné zrealizovat ekonomičtější řešení na testování reálných fotovoltaických panelů.

Práce se zabývá návrhem simulačního prostředí v programu Agilent VEE Pro 8.0. Programové prostředí umožňuje simulaci I-U charakteristik reálných fotovoltaických panelů. Díky tomuto prostředí se charakteristiky fotovoltaických panelů nasimulují a otestují bez nutnosti potřeby reálného fotovoltaického panelu.

Výsledné charakteristiky získané programem je možné porovnat s charakteristikami naměřenými na reálném fotovoltaickém panelu.

2. FOTOVOLTAIKA [1], [2], [3]

Přeměna sluneční energie v energii elektrickou ve fotovoltaických slunečních článcích patří mezi nejrychleji rostoucí oblasti výroby tzv. „zelené“ energie. Fotovoltaika je v celosvětovém měřítku jedním z nejrychleji se rozvíjejících oborů. Fotovoltaický efekt byl objeven v roce 1839. Do roku 1940 byl pro vědce objektem pro bádání. Praktického využití se dočkal až s rozvojem polovodičové technologie. Jeho využití směřovalo do kosmického výzkumu. Od sedmdesátých let se fotovoltaické články začaly využívat i pro běžné uživatelské použití. Samotný fotovoltaický článek má sám o sobě nízký výkon a proto se sériovým či paralelním spojením několika článků vytvářejí tzv. fotovoltaické moduly. Z těchto modulů se pak budují fotovoltaické systémy.

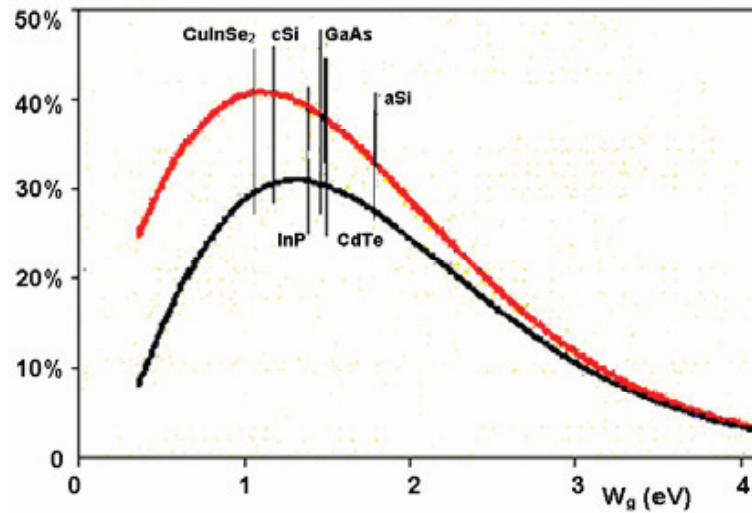
2.1 SOLÁRNÍ ENERGIE

Ročně roste výroba fotovoltaických článků až o 40%. Jejich použití je stále více upřednostňované, ačkoliv je elektřina z těchto článků velmi drahá. V současnosti se fotovoltaické články vyrábí z křemíkových desek náročnými technologiemi. Typický článek vrátí energii potřebnou na jeho výrobu až po 5 letech. Životnost článků je 30 let a více, takže články energii na jejich výrobu znásobí několikrát.

Fotovoltaika je do budoucna jedním ze způsobů, jak by bylo možno získávat energii. Hlavní předností fotovoltaiky je její univerzální využití. Fotovoltaické systémy lze využívat v široké škále výkonů pohybujících se od zlomků wattu až po velké megawattové elektrárny. Tyto systémy jsou tedy jako zdroje energie vhodné především v místech, kde se nenachází elektrická síť. Obrovskou výhodou je jejich ekologická nezávadnost a spolehlivost, protože při činnosti fotovoltaického systému nevznikají žádné emise, odpady ani hluk, které by zatěžovaly životní prostředí. Systémy nevyžadují téměř žádnou obsluhu a údržbu.

2.2 VÝVOJ FOTOVOLTAIKY

Na vývoj článků se jako velmi vhodný materiál pro výrobu osvědčil křemík, protože z hlediska šířky zakázaného pásu je u křemíku možno dosáhnout velmi vysoké účinnosti generace volných nosičů, jak je patrné na **Obr. 2. 1**.

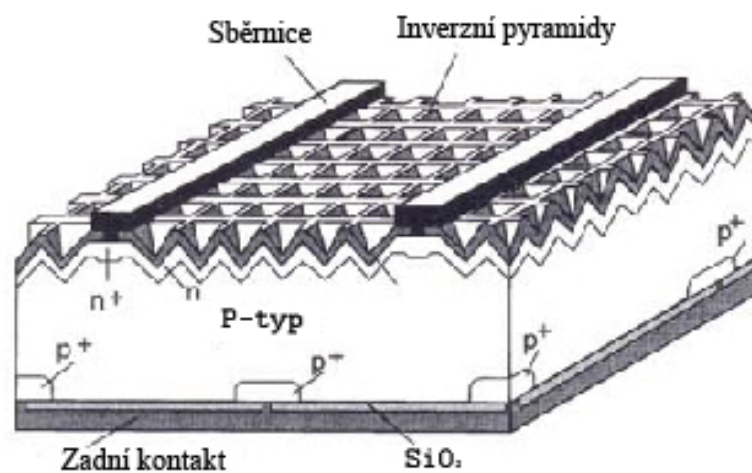


Obr. 2.1: Účinnost generace volných nosičů [1]

Rychlý růst účinnosti článků na počátku padesátých let je spojen s nalezením základních principů konstrukce a technologie článků, tj. optimalizací polohy přechodu PN a zvýšením generace nosičů v objemu fotovoltaického článku pomocí antireflexní vrstvy.

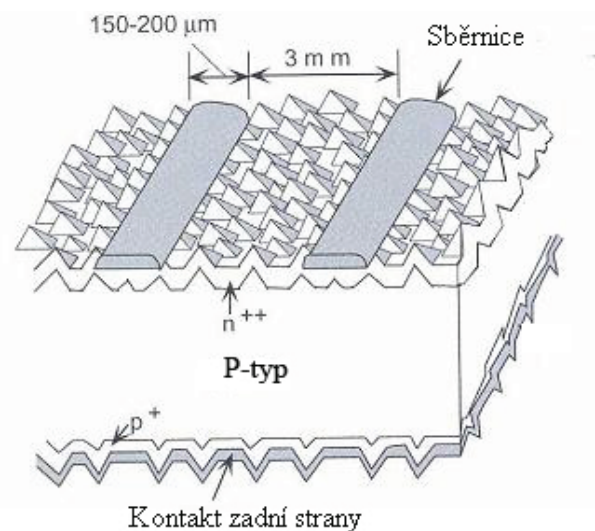
Tato konstrukce byla užívána až do poloviny osmdesátých let. V tomto období byla postupně zdokonalována technologie, což se projevilo v postupném zvyšování účinnosti a snižování cen vyráběných článků.

Další vývoj technologie v druhé polovině osmdesátých let je spojen se zdokonalením funkce antireflexní vrstvy pomocí texturace povrchu. V roce 1994 byla u této struktury dosažena účinnost 24% (viz. **Obr. 2.2**)



Obr. 2.2: Struktura PERL s účinností 24% [1]

Ve vývoji článků následovalo nahrazení vakuově deponovaných kontaktů, kontakty realizovanými sítotiskovou metodou. Díky této metodě byla výrazně zjednodušena a zlevněna technologie článků. Tato struktura je v současnosti běžně využívána (viz. **Obr. 2.3**).



Obr. 2.3: Struktura současných článků z krystalického křemíku [1]

Předností článků z krystalického křemíku je relativně vysoká účinnost, spolehlivost a dlouhá životnost.

2.3 TRENDY V OBLASTI ČLÁNKŮ Z KRYSTALICKÉHO KŘEMÍKU

Současným trendem ve vývoji fotovoltaických článků je snižování výrobních nákladů a zvyšování výkonu u článků samotných. Dalším faktorem je zatěžování životního prostředí výrobou. Výrobci se proto snaží těchto parametrů dosáhnout např.: zvyšováním spolehlivosti a životnosti článků, snižováním spotřeby drahých materiálů, snížením spotřeby samotného křemíku (tloušťka destiček) a snížením energetické náročnosti přípravy krystalického křemíku.

Na trhu v současné době převyšuje poptávka nabídku po článcích. Díky uvedeným trendům se články rozdělili do několika generací:

2.3.1 První generace

Do této kategorie se řadí křemíkové deskové články. Dosahují vysokých účinností fotovoltaické přeměny blížících se k 20%. Jsou díky náročné výrobě poměrně drahé.

2.3.2 Druhá generace

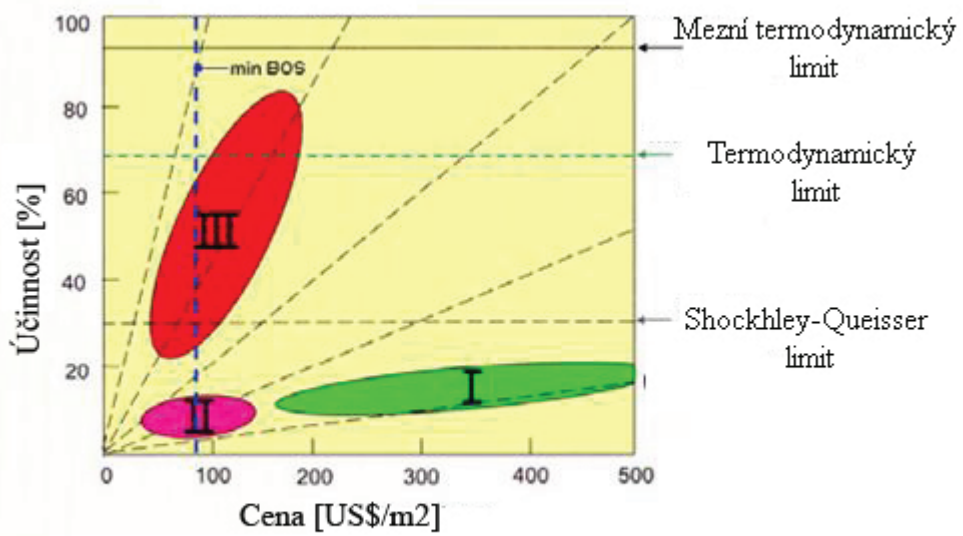
Do této kategorie se řadí články, které jsou založeny na tenkých vrstvách křemíku (dochází zde k menší spotřebě křemíku). Hlavními představiteli druhé generace jsou články založené na tenkých vrstvách amorfního nebo mikrokrytalického křemíku, které na jednotku výkonu vyžadují až stokrát méně křemíku než deskové články. Účinnost fotovoltaické přeměny je nižší než u článků první generace a to méně než 10% při téměř totožných nákladech na výrobu.

2.3.3 Třetí generace

Další kategorií je tzv. třetí generace článků, která směřuje k využití odlišných fyzikálních principů s cílem dosáhnout účinnosti nad Shockley-Queisserovu hranici (Klíčovým faktorem, který vede k výpočtu Shockley-Queisser hranice je množství elektrické energie, která je vyprodukována za jeden foton)

Vysoká cena zdrojového křemíku přiměla výrobce klasických článků z krystalického křemíku ke ztenčování desek a k významnému rozvoji alternativních technologií. Mezi tyto technologie patří destičky extrudované skrz štěrbinu (EFG Shott Solar) nebo vytahované z taveniny mezi dvěma strunami (Evergreen Solar).

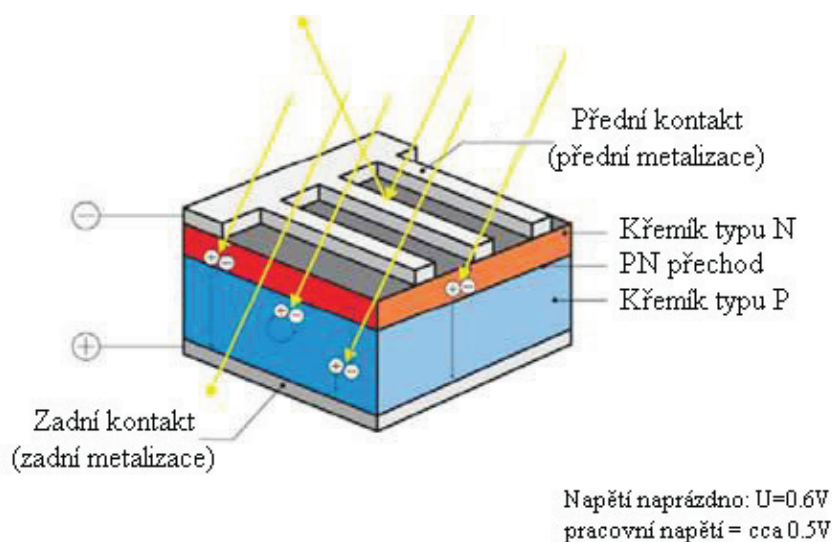
Novou alternativou jsou články z křemíkových kuliček vznikajících žháním polykrystalických zrn (Spheral Solar).



Obr. 2.4: Tři generace fotovoltaiky [1]

3. PRINCIP FUNKCE FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ

Dnes používané fotovoltaické články jsou v podstatě velkoplošné polovodičové diody, které jsou znázorněny schematicky na **Obr. 2.1**. Pokud přiložíme mezi horní a spodní elektrodu napětí, bude proud dán Shockleyho diodovou rovnicí (1).



Obr. 3.1: Princip činnosti fotovoltaického článku [4]

$$I = I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

kde

I_0 saturační proud diody [A]

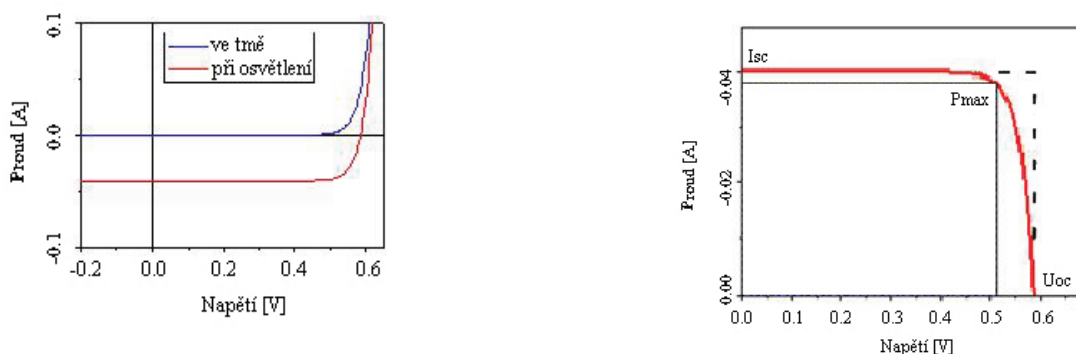
e elementární náboj [Q]

U přiložené napětí [V]

k Boltzmannova konstanta

T teplota [K]

Pokud je článek osvětlen, přidá se k tomuto proudu ještě fotogenerovaný proud I_L , který posune volt-ampérovou charakteristiku tak, jak je ukázáno na **obr. 3.2**. Ve čtvrtém kvadrantu článek dodává výkon do vnějšího obvodu. Tento kvadrant je vynesena v pravé části **obr. 3.2** v detailu s vyznačením napětí naprázdno U_{OC} proudu nakrátko I_{SC} .



Obr. 3.2: Volt-ampérová charakteristika slunečního článku ve tmě a při osvětlení (vlevo) a obvyklý způsob kreslení 4. kvadrantu s vyznačenými hodnotami proudu nakrátko (I_{SC}), napětí naprázdno (U_{OC}) a bodu max. výkonu P_{max} .

Výkon slunečního článku je dán součinem napětí a proudu dodávaného do vnějšího obvodu, tedy $P = U \cdot I$, a pracovní bod článku by měl být bod P_{max} , kde článek poskytuje maximální výkon. Důležitou charakteristikou článků je také faktor plnění

$$FF = P_{max} / (I_{SC} \cdot U_{OC}), \quad (2)$$

který lze znázornit jako podíl plochy obdélníku o stranách U_m a I_m a obdélníku o stranách U_{OC} a I_{SC} . Faktor plnění FF je dobrým měřítkem kvality článku a pro krystalické články dosahuje hodnot asi 0.7. Nejdůležitější charakteristikou článku je jeho energetická účinnost označovaná η . Pro komerční křemíkové sluneční články bývá η okolo 15 %. Takto malá účinnost je způsobená mnoha faktory. Ve slunečním svitu jsou zastoupeny fotony o různých vlnových délkách a fotovoltaické přeměny se účastní jen ty z nich, které mají energii větší než je zakázaný pás polovodiče (1.14 eV pro křemík). Fotony s dostatečnou energií mohou excitovat elektron z valenčního pásu do vodivostního pásu. Vzniklý elektron relaxuje na dno vodivostního pásu a díra po elektronu na vrchol valenčního pásu. Při tom se přebytek energie fotonu nad šířku zakázaného pásu mění na teplo. PN přechod rozděluje elektrony a díry, které tak rekombinují průchodem vnějším obvodem, ve kterém mohou konat užitečnou práci. Ztráty fotonů s energií menší, než je zakázaný pás, a termalizace fotogenerovaných elektronů a děr jsou hlavní důvody, proč účinnost fotovoltaické přeměny pro křemík nemůže být větší než asi 27 %.

4. VLIV ZASTÍNĚNÍ

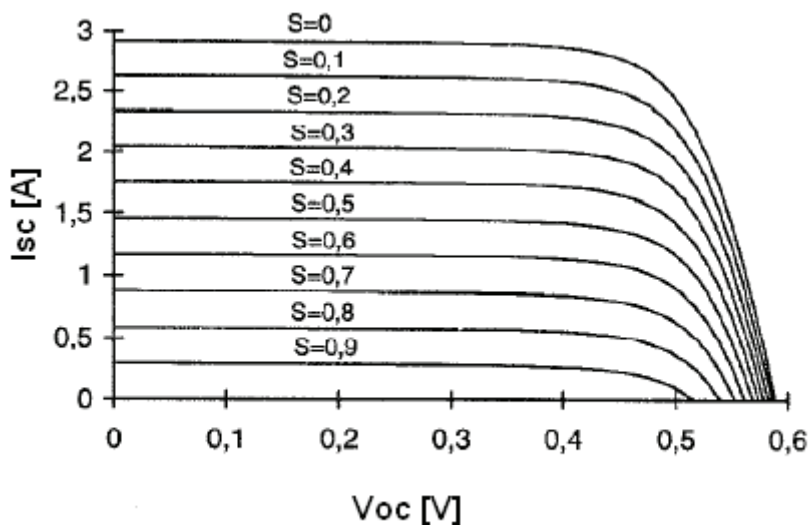
Výsledná podoba výstupních charakteristik fotovoltaických článků je značně ovlivněna, pokud jsou jednotlivé články ozářeny různou intenzitou světla. Výstupní výkon ovlivní nejen zastínění fotovoltaického článku, ale také mění hodnotu napětí naprázdno U_{OC} , hodnotu proudu nakrátko I_{SC} a dále také faktor plnění FF a samozřejmě i výslednou účinnost panelu. Při lokálním zastínění některého z článků je ovlivněn ve výsledku výstup z celého panelu.

Při teoretických výpočtech se zavádí takzvaný faktor stínění S . Tento faktor se vypočítá z následujícího vztahu (3).

$$S = S_S/S_C \quad (3)$$

kde je S_S plocha zastíněné části a S_C plocha celková.

Voltampérové charakteristiky článku s různým faktorem stínění S při teplotě 300 K a intenzitě záření 1000 W/m^2 jsou znázorněny (viz. **obr. 4.1**).



Obr. 4.1: Voltampérová charakteristika fotovoltaického článku při různém zastínění

[5]

Jakmile je zastíněn jeden nebo více článků, postižený fotovoltaický článek se přestane dále chovat jako zdroj proudu a naopak se stává spotřebičem. Nezasťíněné články vnutí

proud skrze tyto články a dochází k velkým ztrátám. Nežádoucím faktorem, který v tuto chvíli nastává, je zahřívání, které může panel poškodit nebo úplně zničit.

Aby se zabránilo tomuto problému, připojují se do řetězce fotovoltaických článků antiparalelně přemostovací (bypass) diody.

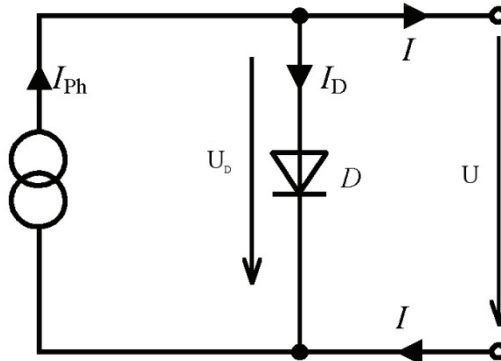
Stejně jako každá jiná polovodičová součástka, tak i použité přemostovací diody způsobují určitý ztrátový proud v závěrném směru. V normálních podmínkách se to projeví snížením výsledného proudu dodávaného fotovoltaickými články. Ve výsledku tedy snižují účinnost fotovoltaického modulu. Tento ztrátový proud by měl být především při plném ozáření fotovoltaických článků co nejmenší. Částečné zastínění je výjimečný jev, kterému by mělo být pokud možno kompletně zabráněno nebo alespoň jeho průběh zredukován na co nejkratší časové periody. Přemostovací diody musí být odolné taky vůči přepětovým špičkám. Takovéto špičky se mohou objevit při montáži systému, když dojde například k odpojení kabelů nebo při zásahu bleskem.

Existují určitá doporučení, která by měly přemostovací diody splňovat. Konečný výběr však hlavně záleží na typu fotovoltaických článků a provozních podmínkách, ve kterých se bude panel vyskytovat.

5. EKVIVALENTNÍ OBVODY [5]

5.1 JEDNODUCHÝ EKVIVALENTNÍ OBVOD

Fotovoltaický článek je velkoplošná dioda. Je složena z dotovaného N-typu a P-typu polovodiče s výsledně nabitou vrstvou. Z pravidla platí, že neozářené fotovoltaické články mají skoro stejné vlastnosti jako dioda.

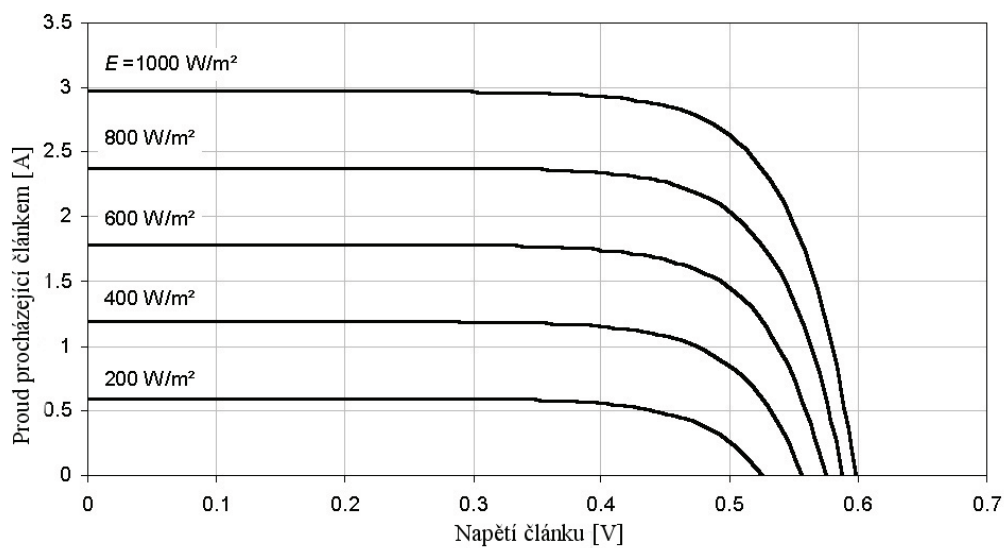


Obr. 5.1: Jednoduchý ekvivalentní obvod fotovoltaického článku [5]

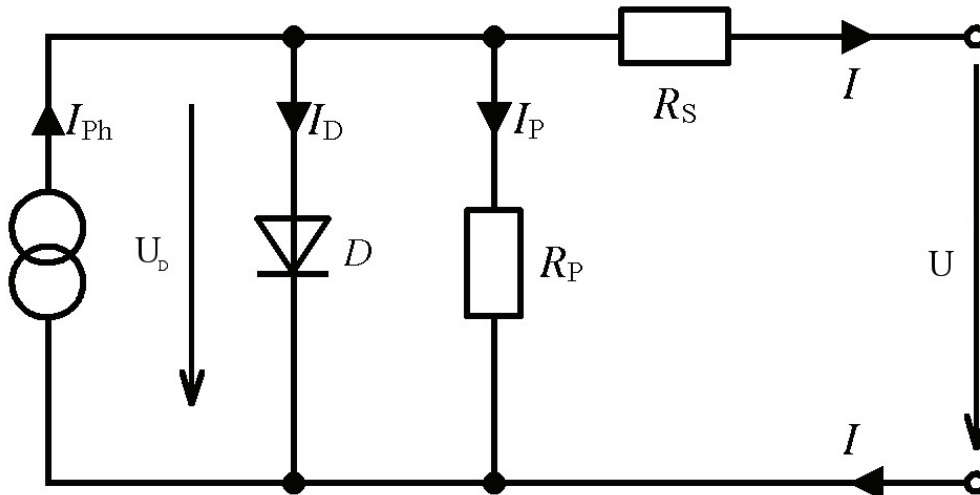
Proto může jednoduchá dioda vyjádřit ekvivalentní obvod (kde $U=U_D$) se saturačním proudem I_S a faktorem m :

$$I = -I_D = -I_S \cdot \left(\exp\left(\frac{U_D}{m \cdot V_T}\right) - 1 \right) \quad (4)$$

Teplotní napětí U_T o teplotě 25°C je $U_T = 25.7 \text{ mV}$. Velikost saturačního proudu I_S je v rozmezí $10^{-10} - 10^{-5} \text{ A}$.



Obr. 5.2: Vliv osvětlení E na $I - U$ charakteristiky fotovoltaického článku [5]



Obr. 5.3: Rozšířený ekvivalentní obvod fotovoltaického článku (jedno – diodový model) [5]

Faktor m ideální diody je roven 1; ale faktor mezi 1 a 5 je lepší pro vlastnosti fotovoltaického článku.

Proudový zdroj připojený paralelně k diodě vytváří jednoduchý ekvivalentní obvod ozářeného fotovoltaického článku. Proudový zdroj generuje foto-proud I_{ph} , který závisí na ozáření E a koeficientu c_0 :

$$I_{Ph} = c_0 \cdot E \quad (5)$$

Kirchhoffův první zákon stanovuje proudovo – napěťové charakteristiky jednoduchého fotovoltaického článku ekvivalentního obvodu, který je znázorněn na **obr. 5.1**, a **obr. 5.2** znázorňuje charakteristické křivky při různém osvětlení;

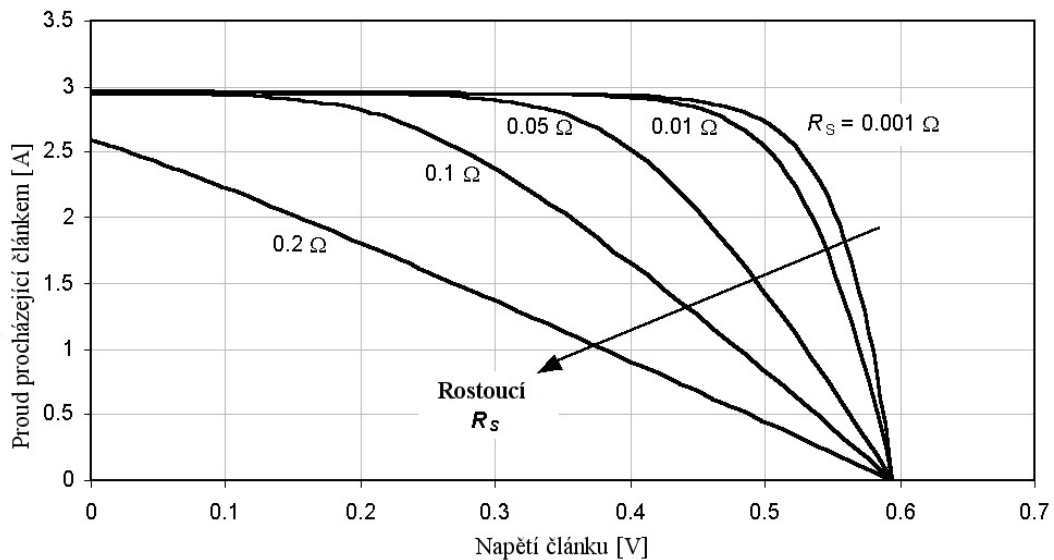
$$I = I_{Ph} - I_D = I_{Ph} - I_S \cdot \left(\exp\left(\frac{U}{m \cdot U_T}\right) - 1 \right) \quad (6)$$

5.2 ROZŠÍŘENÝ EKVIVALENTNÍ OBVOD (JEDNO – DIODOVÝ MODEL)

Jednoduchý ekvivalentní obvod je vhodný pro většinu aplikací. Rozdíly mezi vypočtenými a naměřenými charakteristikami skutečného fotovoltaického článku jsou pouze několik málo procent. Avšak pouze rozšířené ekvivalentní obvody znázorňují přesné chování elektrického fotovoltaického článku, obzvláště když široký rozsah provozních podmínek musí být vyšetřen. Náboj nosičů v reálném fotovoltaickém článku prodělává pokles napětí na jejich cestě skrze polovodičové spojení na externí kontakty. Sériový odpor

R_S vyjadřuje pokles napětí. Přidaný paralelní odpor R_P popisuje svodové proudy na hranách článku. **Obr. 5.3** ukazuje upravený ekvivalentní obvod včetně obou rezistorů.

Sériový odpor R_S reálného článku je v rozsahu několik miliohmů ($m\Omega$), paralelní odpor R_P je obvykle vyšší než 10Ω . **Obr. 5.4** a **5.5** ukazují vliv obou odporů na $I - U$ charakteristiky článku.



Obr. 5.4: Vliv sériového odporu R_S na $I - U$ charakteristiky fotovoltaického článku [5]

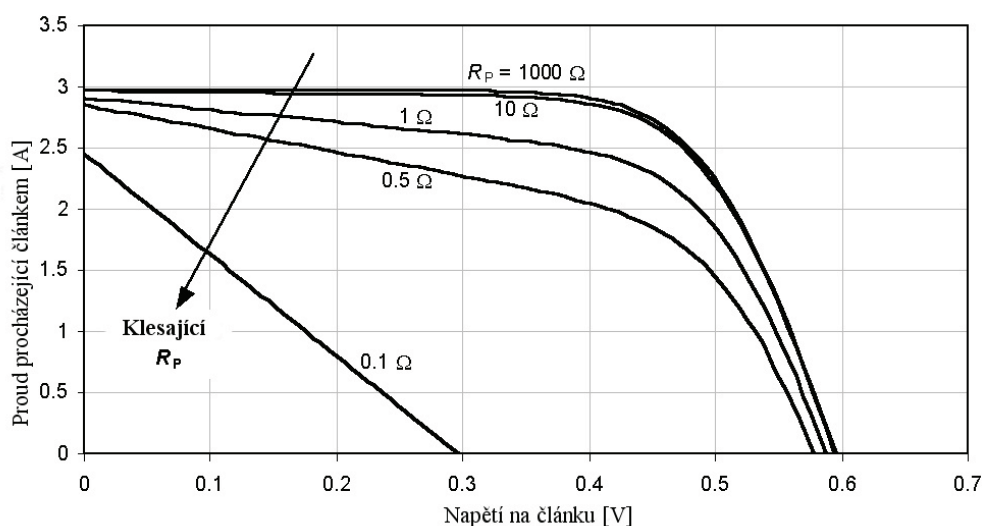
Kirchhoffův uzlový zákon, $0 = I_{ph} - I_D - I_P - I_S$ s $I_P = \frac{U_D}{R_P} = \frac{U + I \cdot R_S}{R_P}$, poskytuje rovnici pro $I - U$ charakteristiky rozšířeného ekvivalentního obvodu fotovoltaického článku:

$$0 = I_{ph} - I_S \cdot \left(\exp\left(\frac{U + I \cdot R_S}{m \cdot V_T}\right) - 1 \right) - \frac{U + I \cdot R_S}{R_P} - I \quad (7)$$

Tato implicitní rovnice nemůže být vyřešena tak snadno jako rovnice (6) pro proud I nebo napětí U . Proto je nutné použít numerické metody.

Jeden společný postup pro řešení této rovnice je takzvaný postup hledání kořenu, při kterém se zmiňovaná rovnice rovná nule. Jedná se o Newtonovu metodu. $I - U$ charakteristika fotovoltaického článku je:

$$f(U, I) = 0 \quad (8)$$



Obr. 5.5: Vliv paralelního odporu R_p na $I - U$ charakteristiky fotovoltaického článku [5]

Odpovídající proud I nebo napětí U by mělo být stanoveno pro dané napětí U nebo daný proud I_g . Jakékoliv řešení bude pro funkci $f(U, I)$ nulové. Následující iterací je vhodné nalézt toto řešení:

$$U_{i+1} = U_i - \frac{f(U_i, I_g)}{\frac{df(U_i, I_g)}{dU}} \text{ nebo } I_{i+1} = I_i - \frac{f(U_g, I_i)}{\frac{df(U_g, I_i)}{dI}} \quad (9)$$

Počáteční hodnoty U_0 nebo I_0 implicitní rovnice s daným proudem I_g nebo napětím U_g budou zjištěny, jestliže je iterace provedena do té doby, než je rozdíl mezi dvěma iteračními kroky menší než předdefinovaný limit ε . Podmínky k ukončení iterace jsou:

$$|U_i - U_{i-1}| < \varepsilon \text{ nebo } |I_i - I_{i-1}| < \varepsilon.$$

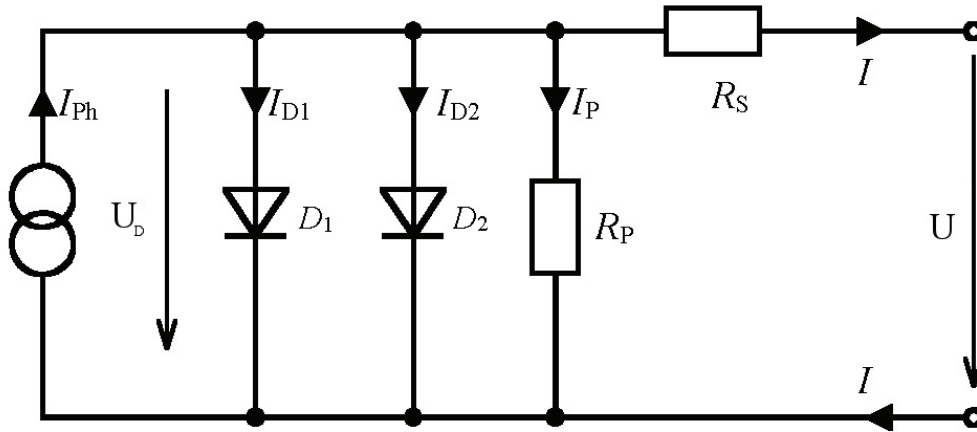
Newtonova metoda má tendenci konvergovat velmi rychle, ale rychlost konvergence silně závisí na zvolené počáteční hodnotě U_0 nebo I_0 . První iterace s užitím jiné metody může být užitečná pro pokles napětí na diodě.

Iterace pro odhad proudu I fotovoltaického článku pro dané napětí U_g podle rovnice (9) je:

$$I_{i+1} = I_i - \frac{I_{ph} - I_s \cdot \left(\exp\left(\frac{V_g + I_i \cdot R_s}{m \cdot V_T}\right) - 1 \right) - \frac{V_g + I_i \cdot R_s}{R_p} - I_i}{-\frac{I_s \cdot R_s}{m \cdot V_T} \cdot \exp\left(\frac{V_g + I_i \cdot R_s}{m \cdot V_T}\right) - \frac{R_s}{R_p} - 1} \quad (10)$$

5.3 DVOU – DIODOVÝ MODEL

Dvou – diodový model (obr. 5.6) poskytuje v mnoha případech ještě lepší znázornění fotovoltaického článku. Druhá dioda je proto připojena paralelně k první diodě. Obě diody mají rozdílné saturační proudy a faktory.



Obr. 5.6: Dvou – diodový model fotovoltaického článku [5]

Tab. 5.1: Parametry pro různé dvou – diodové fotovoltaické moduly [5]

Parametr	c_0	I_{S1}	I_{S2}	m_1	m_2	R_S	R_P
Jednotka	m^2/V	nA	μA	-	-	$m\Omega$	Ω
AEG PQ 40/50	$2.92 \cdot 10^{-3}$	1.082	12.24	1	2	13.66	34.9
Siemens M50	$3.11 \cdot 10^{-3}$	0.878	12.71	1	2	13.81	13.0
Kyocera LA441J59	$3.09 \cdot 10^{-3}$	1.913	8.25	1	2	12.94	94.1

Tedy implicitní rovnice pro dvou – diodový model je:

$$0 = I_{Ph} - I_{S1} \cdot \left(\exp \left(\frac{V+I \cdot R_S}{m_1 \cdot V_T} \right) - 1 \right) - I_{S2} \cdot \left(\exp \left(\frac{V+I \cdot R_S}{m_2 \cdot V_T} \right) - 1 \right) - \frac{V+I \cdot R_S}{R_P} - I \quad (11)$$

První dioda je obvykle ideální dioda ($m_1 = 1$). Faktor druhé diody je $m_2 = 2$. **Tabulka 5.1** shrnuje parametry, které prokázaly dobré výsledky simulace pro některé moduly.

5.4 DVOU – DIODOVÝ MODEL S ROZVINUTÝM ČLENEM

Ekvivalentní obvod fotovoltaického článku musí být rozšířen pro znázornění negativního poklesu charakteristik při vysokém záporném napětí, abychom byli schopni vytvořit kompletní I – U charakteristiky. Další zdroj proudu $I(U_D)$ v **obr. 5.7** vyjadřuje prodlouženou dobu, která popisuje pokles záporného napětí na diodě.

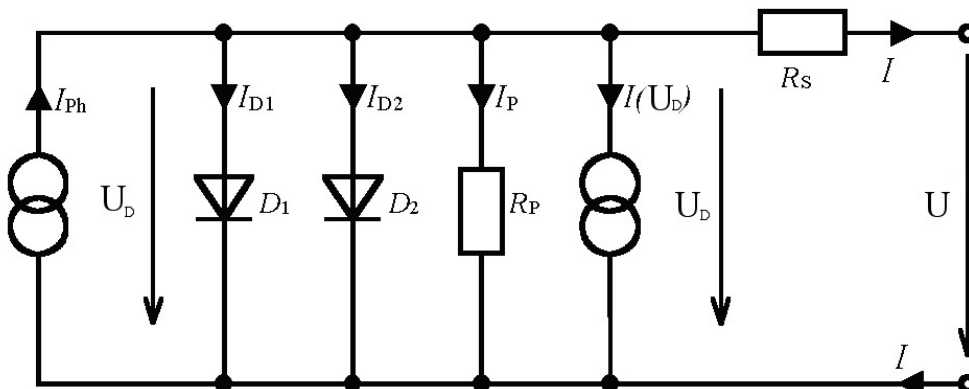
Tento zdroj proudu generuje proud závisící na napětí diody U_D . Tento proud popisuje chování fotovoltaického článku při záporném napětí. Díky poklesu napětí U_{Br} je rovnice pro I – U charakteristiky:

$$0 = I_{Ph} - I_{S1} \cdot \left(\exp\left(\frac{V+I \cdot R_S}{m_1 \cdot V_T}\right) - 1 \right) - I_{S2} \cdot \left(\exp\left(\frac{V+I \cdot R_S}{m_2 \cdot V_T}\right) - 1 \right) - \frac{V+I \cdot R_S}{R_P} - \underbrace{-b \cdot (V + I \cdot R_S) \cdot \left(1 - \frac{V+I \cdot R_S}{V_{Br}}\right)^{-n}}_{\text{Rozvinutý člen}} \quad (12)$$

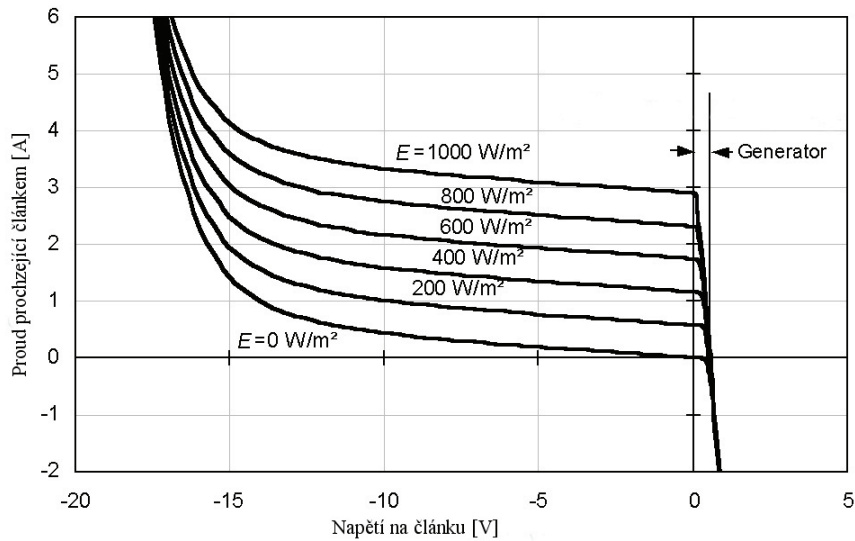
Rozvinutý člen

n lavinový pokles

b korekční vodivost



Obr. 5.7: Dvou – diodový ekvivalentní obvod s druhým proudovým zdrojem charakterizujícím pokles negativního napětí fotovoltaického článku [5]



Obr. 5.8: I–U charakteristiky polykrystalického fotovoltaického článku při plném rozsahu napětí [5]

Obrázek 5.8 ukazuje I –U charakteristiky polykrystalického fotovoltaického článku při plném rozsahu napětí s parametry $I_{S1} = 3 \cdot 10^{-10}$ A, $m_1 = 1$, $I_{S2} = 6 \cdot 10^{-6}$ A, $m_2 = 2$, $R_S = 0.13 \Omega$, $R_P = 30 \Omega$, $U_{Br} = -18$ V, $b = 2.33$ mS a $n = 1.9$. V tomto případě je sériový odpor relativně vysoký. Na výše uvedeném obrázku článek generuje energii pouze v kladném kvadrantu. Pokud je napětí článku nebo proud záporný, fotovoltaický článek je zatížen. Proto externí zdroj napětí nebo ostatní fotovoltaické články musí vytvářet požadovanou elektrickou energii.

5.5 OSTATNÍ ELEKTRICKÉ PARAMETRY FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ

Kromě výše popsaných vzájemných vztahů napětí a proudu mohou být definovány další parametry.

Napětí naprázdno fotovoltaického článku je rovno nule, a to v případě, že proud nakrátko I_{SC} je přibližně roven fotoproudu I_{Ph} . Přestože fotoproud je úměrný ozáření E , proud nakrátko také závisí na ozáření:

$$I_{SC} \approx I_{Ph} = c_0 \cdot E \quad (13)$$

Proud nakrátko se zvyšuje s rostoucí teplotou. Standardní teplota udávaná pro proud nakrátko je obvykle $\Theta = 25^\circ\text{C}$. Teplotní koeficient α_{ISC} proudu nakrátko umožňuje odhadnout její hodnotu i při jiné teplotě:

$$I_{SC}(\theta_2) = I_{SC}(\theta_1) \cdot (1 + \alpha_{ISC} \cdot (\theta_2 - \theta_1)) \quad (14)$$

U křemíkových fotovoltaických článků je teplotní koeficient proudu nakrátko obvykle mezi $\alpha_{ISC} = +10^{-3}/^\circ\text{C}$ a $\alpha_{ISC} = +10^{-4}/^\circ\text{C}$.

Pokud je článkový proud I roven nule, fotovoltaický článek je v otevřeném okruhu. Článkové napětí se stává napětím naprázdno U_{OC} . Rovnice $I - U$ jednoduchého ekvivalentního obvodu (6) poskytuje U_{OC} při nastavení I na nulu:

$$V_{OC} = m \cdot U_T \cdot \ln\left(\frac{I_{SC}}{I_S} + 1\right) \quad (15)$$

Zatímco proud nakrátko I_{SC} je úměrný ozáření E , tak napětí otevřeného okruhu je závislé na:

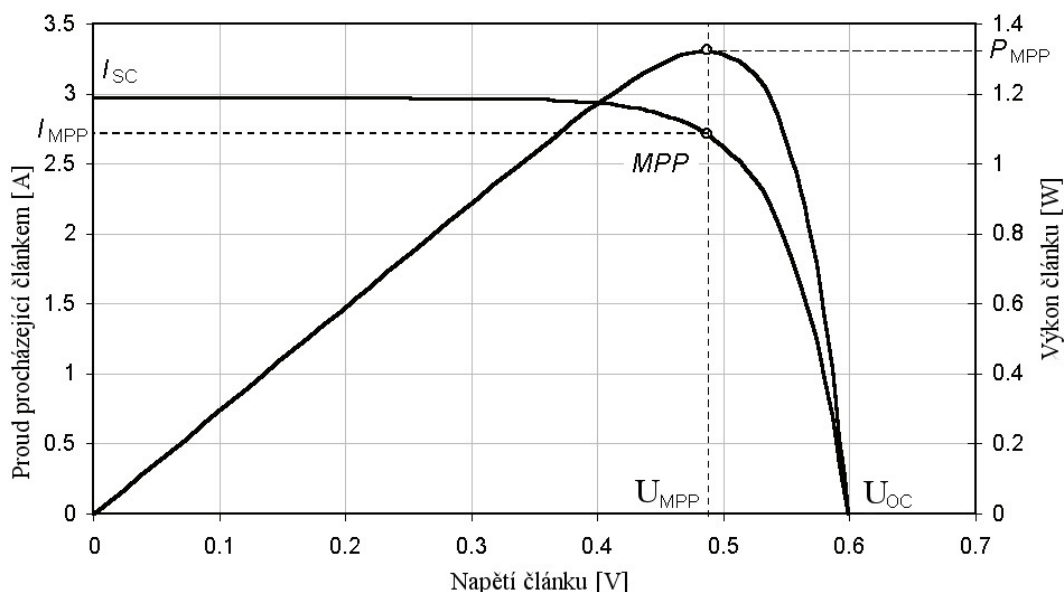
$$V_{OC} = \sim \ln(E) \quad (16)$$

Teplotní koeficient α_{VOC} při napětí naprázdno je získáván podobně jako u proudu nakrátko. Obvykle má záporné znaménko. Pro křemíkové fotovoltaické články je teplotní koeficient mezi $\alpha_{VOC} = -3 \cdot 10^{-3}/^\circ\text{C}$ a $\alpha_{VOC} = -5 \cdot 10^{-3}/^\circ\text{C}$. Jinými slovy se proud nakrátko zvyšuje. Protože záporný teplotní koeficient napětí je vyšší než kladný koeficient proudu, teplotní koeficient α_{PMPP} MPP výkonu je také záporný. Pro křemíkové fotovoltaické články je mezi $\alpha_{PMPP} = -3 \cdot 10^{-3}/^\circ\text{C}$ a $\alpha_{PMPP} = -6 \cdot 10^{-3}/^\circ\text{C}$. Teplota stoupající nad 25°C způsobuje pokles napětí až o 10%.

Fotovoltaický článek generuje maximální výkon při určitém napětí. **Obr. 5.9** ukazuje proudovo – napěťovou stejně jako výkonově – napěťovou charakteristiku. To jasně potvrzuje, že výkonová křivka dosahuje bodu maximálního výkonu. Tento bod je nazýván jako *maximální výkonový bod (maximum power point (MPP))*.

Napětí při MPP je značené U_{MPP} , a je nižší než napětí naprázdno U_{OC} , a proud I_{MPP} je nižší než proud nakrátko I_{SC} . MPP proud a napětí mají stejné vztahy pro ozáření a teplotu jako pro proud nakrátko a napětí naprázdno. Maximální výkon P_{MPP} je:

$$P_{MPP} = U_{MPP} \cdot I_{MPP} < V_{OC} \cdot I_{SC} \quad (17)$$



Obr. 5.9: I – U a P – U charakteristika fotovoltaického článku s bodem maximálního výkonu (MPP) [5]

Ve snaze umožnit porovnání mezi fotovoltaickými články a moduly MPP je výkon měřen při *standardních zkušebních podmínkách* (STC) ($E = 1000 \text{ W/m}^2$, $\Theta = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, AM 1.5). Generovaný výkon fotovoltaických modulů při skutečných povětrnostních podmínkách je obvykle nižší. Z toho důvodu se STC výkon udává v jednotkách W_p (Watt – peak).

Pokud vezmeme na vědomí závislost ozáření, proud udává chování zařízení, takže MPP výkon je téměř úměrný ozáření E .

Dalším parametrem je již zmiňovaný faktor plnění (*fill factor (FF)*), který je definován:

$$FF = \frac{P_{MPP}}{U \cdot I_{SC}} = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{U_{OC} \cdot I_{SC}} \quad (18)$$

Faktor plnění je tak kvalitní kritérium fotovoltaických článků, že popisuje, jak dobře se I – U křivky shodují s U_{OC} a I_{SC} . Hodnota je vždy menší než 1 a obvykle je mezi 0.75 a 0.85.

MPP výkon P_{MPP} , ozáření a solární plocha A vyjadřují účinnost fotovoltaických článků η :

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{E \cdot A} = \frac{FF \cdot V_{OC} \cdot I_{SC}}{E \cdot A} \quad (19)$$

Užití je obvykle podřízeno standardním zkušebními podmínkám. **Tab. 5.2** shrnuje ostatní parametry fotovoltaických článků.

Tab. 5.2: Elektrické parametry fotovoltaických článků [5]

Název	Označení	Jednotka	Poznámka
Napětí naprázdno	U_{OC}	V	$U_{OC} \sim \ln E$
Proud nakrátko	I_{SC}	A	$I_{SC} \approx I_{Ph} \sim E$
MPP napětí	U_{MPP}	V	$U_{MPP} < U_{OC}$
MPP proud	I_{MPP}	A	$I_{MPP} < I_{SC}$
MPP výkon	P_{MPP}	W	$P_{MPP} = U_{MPP} \cdot I_{MPP}$
Faktor plnění	FF	-	$FF = P_{MPP} / (U_{OC} \cdot I_{SC}) < 1$
Účinnost	η	%	$\eta = P_{MPP} / E \cdot A$

5.6 TEPLOTNÍ ZÁVISLOST

Konstantní teplota 25 °C byla předpokládána pro všechny rovnice v předchozí části. Charakteristiky se mění s teplotou. Tato kapitola popisuje, jak se mění rovnice fotovoltaického článku tak, aby to zahrnovalo teplotní závislost.

Teplotní napětí U_T musí být počítáno pro danou teplotu s Boltzmannovou konstantou $k = 1.380658 \cdot 10^{-23}$ J/K, absolutní teplotou T v Kelvinech ($T = \Theta \text{ K}^\circ\text{C} + 273.15 \text{ K}$) a elementárního náboje $e = 1.60217733 \cdot 10^{-19}$ C, teplotní napětí je dáno:

$$U_T = \frac{k \cdot T}{e} \quad (20)$$

Teplotní závislost saturačního proudu I_{S1} a I_{S2} s koeficienty c_{S1} a c_{S2} a šířka pásma E_g :

$$I_{S1} = c_{S1} \cdot T^3 \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{k \cdot T}\right) \quad (21)$$

$$I_{S2} = c_{S2} \cdot T^{5/2} \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2 \cdot k \cdot T}\right) \quad (22)$$

Zvýšení saturačního proudu s rostoucí teplotou vysvětluje pokles napětí v otevřeném obvodu. Teplota závisí na sériovém odporu R_S , paralelním odporu R_P a diodový faktor může být zanedbaný.

Rovnice (21) a (22) ignoruje teplotní závislost šířky zakázaného pásu. I když to významně neovlivňuje saturační proud, její teplotní závislost je rozhodující pro foto – proud I_{Ph} . Díky poklesu v zakázaném pásu se zvyšující se teplotou mohou fotony s nižší energií povýšit elektrony do valenčního pásu se zvýšením foto – proudu. Použitím koeficientu C_1 a C_2 teplotní závislosti foto – proudu je dána rovnice:

$$I_{Ph}(T) = (c_1 + c_2 \cdot T) \cdot E \quad (23)$$

Tab. 5.3: Parametry pro teplotní závislost různých fotovoltaických modulů [5]

Parametr	C_{S1}	C_{S2}	C_1	C_2
Jednotka	A/K ³	A/K ^{-5/2}	m ² /V	m ² /(V K)
AEG PQ 40/50	210.4	18.1·10 ⁻³	2.24·10 ⁻³	2.286·10 ⁻⁶
Siemens M50	170.8	18.8·10 ⁻³	3.06·10 ⁻³	0.179·10 ⁻⁶
Kyocera LA441J59	371.9	12.2·10 ⁻³	2.51·10 ⁻³	1.932·10 ⁻⁶

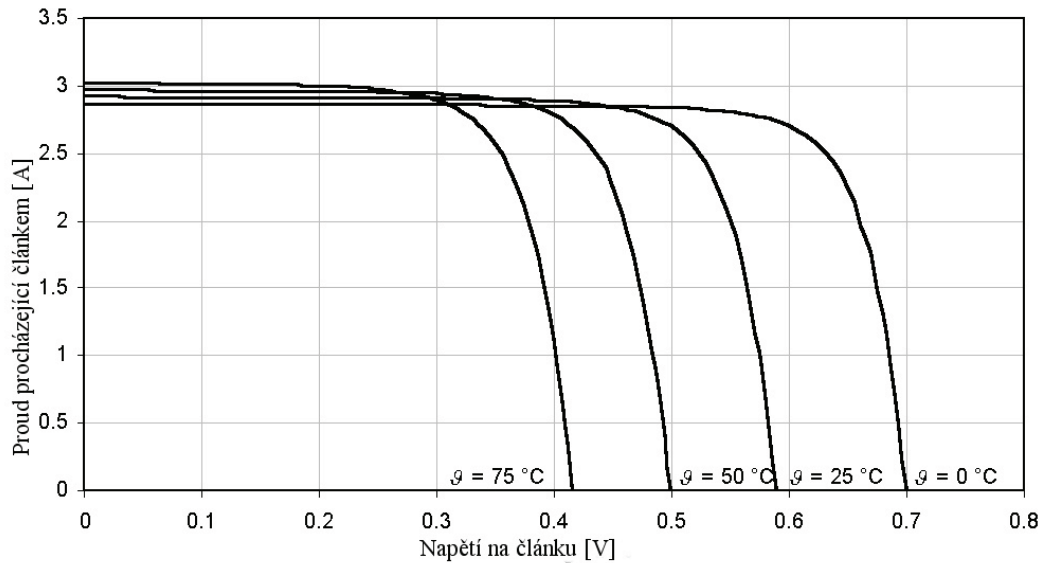
Tabulka 5.3 uvádí parametry pro výpočet teplotní závislosti různých fotovoltaických modulů.

Obr. 5.10 ukazuje I – U charakteristiku fotovoltaického článku se zvyšující se teplotou Θ . Jasně to ukazuje, že napětí naprázdno znatelně klesá, když teplota stoupá. Na druhé straně proud nakrátko se pouze málo zvyšuje. Výsledkem toho je zvyšování MPP výkonu při snižující se teplotě.

5.7 ODHAD PARAMETRŮ

Pro simulaci reálného fotovoltaického článku (např. s jednoduchým ekvivalentním obvodem) musí být parametry článku (I_{Ph} a I_S) odhadnuty z měřených charakteristik článku. Pro zjednodušení procesu lze předpokládat, že foto – proud I_{Ph} je roven proudu nakrátko I_S . Diodový faktor m ideální diody je roven 1. Proto jsou už dva parametry

odhadnuty ($I_{ph} = I_S$ a $m = 1$). Saturační proud diody I_S může být vypočítán z rovnice (6) za podmínky pro napětí naprázdno:



Obr. 5.10: Charakteristika teplotní závislosti fotovoltaického článku [5]

$$I_S = \frac{I_{SC}}{\exp\left(\frac{U_{OC}}{U_T}\right) - 1} \approx I_{SC} \cdot \exp\left(-\frac{U_{OC}}{U_T}\right) \quad (24)$$

S tímto jsou stanoveny všechny parametry jednoduchého ekvivalentního obvodu. Nicméně tento model může poskytovat velmi hrubý odhad s měřenými charakteristikami. Diodový faktor větší než 1 ($m > 1$) je používán pro neideální diodu. Jednoduchý ekvivalentní obvod s reálnou diodou poskytuje shodu mezi simulací a skutečným měřením.

Stanovení dalších parametrů R_S a R_P rozšířeného jednodiodového článku je složitější. Původní hodnoty musí být pečlivě vybrány pro dobrou konvergenci stanovení parametrů. Nicméně stanovení počátečních hodnot pro R_P a R_S je relativně jednoduché.

Paralelní odpor R_P může být stanoven ze záporné oblasti I – U charakteristiky při podmínkách zkratu. Oblast I – U charakteristiky okolo nebo za napětím naprázdno poskytuje sériový odpor R_S :

$$R_P \approx \frac{\partial U}{\partial I} \Big|_{U=0} \quad (25)$$

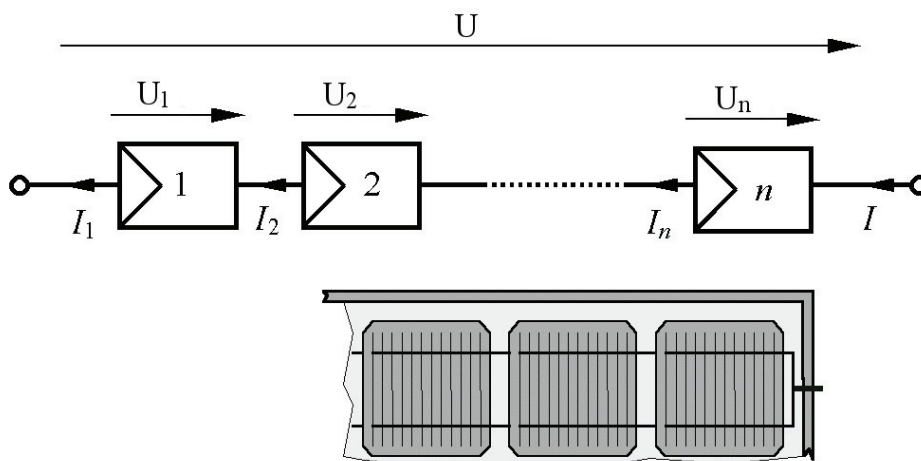
$$R_S \approx \frac{\partial U}{\partial I} \Big|_{U \gg U_{OC}} \quad (26)$$

6. ELEKTRICKÝ POPIS FOTOVOLTAICKÉHO MODULU [5]

6.1 SÉRIOVÉ ZAPOJENÍ FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ

Fotovoltaické články nejsou většinou využívány individuálně díky jejich nízkému napětí. Ve fotovoltaických modulech jsou články většinou sériově zapojeny. Zapojení těchto článků v sériových, paralelních nebo sériovo – paralelních kombinacích vytváří fotovoltaický systém.

Mnoho modulů je určeno pro provoz s 12 V olověnými nabíjecími bateriemi, kde sériové zapojení 32 – 40 křemíkových článků je optimální. Moduly pro síťové připojení mohou mít daleko více připojených článků v sérii za účelem získání vyššího napětí.



Obr. 6.1: Sériové spojení fotovoltaických článků (nahore: elektrické schéma; dole: pohled shora na modul s krystalickou buňkou [5])

Proud I_i ve všech člancích i v sériovém zapojení článků n je identický dle Kirchhoffova zákona (**obr. 6.1**). Čláková napětí U_i jsou přidána, aby získala celkové napětí U :

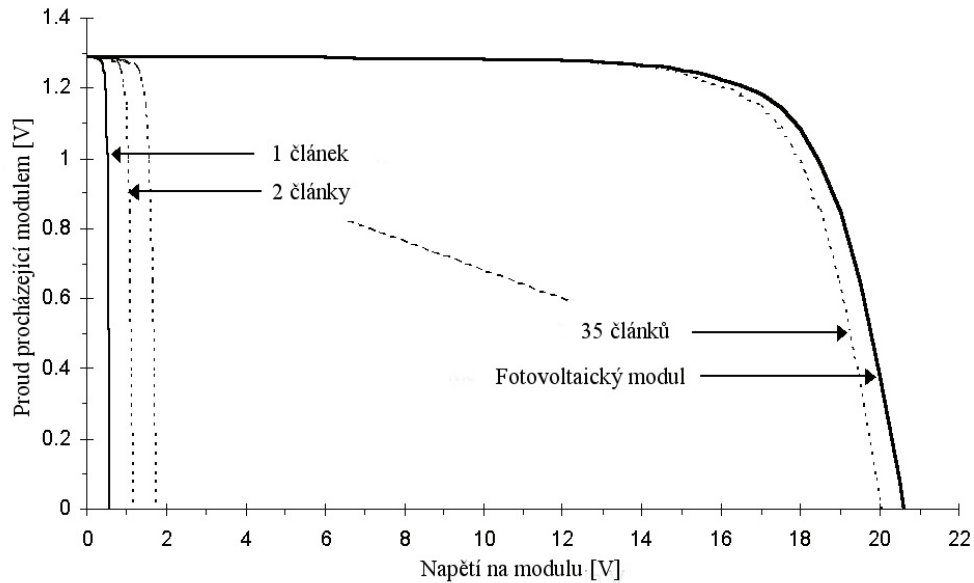
$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad (27)$$

$$U = \sum_{i=1}^n U_i \quad (28)$$

Vzhledem k tomu, že všechny články jsou identické a zaznamenávají stejné ozáření a teplotu, celkové napětí je dáno:

$$U = n \cdot U_i \quad (30)$$

Charakteristiky jednoduchého článku jednoduše poskytují I – U charakteristiku pro jakékoliv sériové zapojení tak, jak je ukázáno na **obr. 6.2**.



Obr. 6.2: Charakteristika 36 článkového modulu (při osvětlení $E = 400 \text{ W/m}^2$, $T = 300 \text{ K}$) [5]

Datasheet publikovaný výrobcem modulů často poskytuje pouze limitovaná čísla parametrů jako je napětí otevřeného obvodu U_{OC0} , proudu nakrátko I_{SC0} , napětí U_{MPP0} a proud I_{MPP0} při bodu MPP a ozáření $E_{1000} = 1000 \text{ W/m}^2$ a teplotě $\Theta_{25} = 25^\circ \text{C}$ stejně tak jako teplotní koeficient α_U a α_I pro napětí a proud. Dané rovnice:

$$U = U_{OC0} \cdot \ln(E)/\ln(E_{1000}) \cdot (1 + \alpha_U(\theta - \theta_{25})) \quad (31)$$

$$U_{MPP} = U_{MPP0} \cdot \ln(E)/\ln(E_{1000}) \cdot (1 + \alpha_U(\theta - \theta_{25})) \quad (32)$$

$$I_{MPP} = I_{MPP0} \cdot E/E_{1000} \cdot (1 + \alpha_I(\theta - \theta_{25})) \quad (33)$$

$$I_{SC} = I_{SC0} \cdot E/E_{1000} \cdot (1 + \alpha_I(\theta - \theta_{25})) \quad (34)$$

$$c_1 = I_{SC} \cdot \exp(-c_2 \cdot U_{OC}) \quad (35)$$

$$c_2 = \ln(1 - I_{MPP}/I_{SC}) / (U_{MPP} - U_{OC}) \quad (36)$$

Vztah mezi proudem modulu I a napětím modulu U bude nalezen přibližně jako:

$$I = I_{SC} - c_1 \cdot \exp(c_2 \cdot U) \quad (37)$$

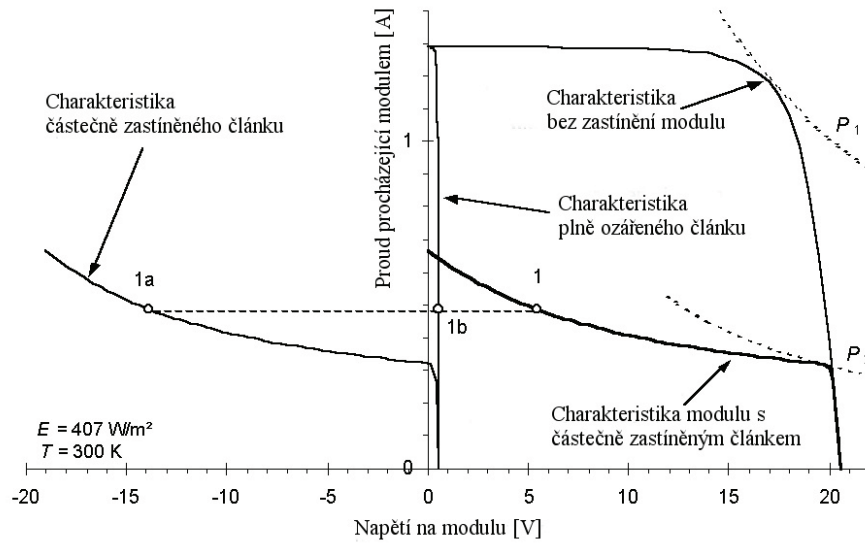
6.2 SÉRIOVÉ ZAPOJENÍ DLE NEHOMOGENNÍCH PODMÍNEK

Během reálných operací ne všechny fotovoltaické články sériového zapojení vykazují stejné vlastnosti. Znečištění listím, ptačími exkrementy nebo klimatickými vlivy jako je pokrývka sněhu nebo hmotnými překážkami okolí může zastínit několik buněk. Toto má vysoký vliv na charakteristiky modulu.

Modelování modulů s neidentickými $I - U$ charakteristikami článků je podstatně obtížnější. Následující příklad předpokládá, že 35 článků modulu, který se skládá z 36 sériově zapojených článků, je shodně ozářeno. Zbývající článek zaznamenává pokles ozáření o 75%. I v tomto případě je proud ve všech člancích stejný. Charakteristiky modulu mohou být nalezeny určením rozsahu proudu od 0 až do bodu proudu nakrátko, kdy je článek nezastíněný. Napětí plně ozářených článků U_F a zastíněných článků U_S jsou určeny a přidány:

$$V = U_S(I) + 35 \cdot U_F(I) \quad (38)$$

Charakteristika modulu může být získána při zastavení na hodnotě proudu nakrátko částečně zastíněného článku. Nicméně tyto charakteristiky se týkají pouze malého rozsahu napětí poblíž hranice otevřeného okruhu napětí.



Obr. 6.3: Charakteristika modulu se zastíněním 75% článku [5]

Nižší rozsah napětí těchto charakteristik se vyskytuje pouze tehdy, je-li proud v částečně zastíněném článku vyšší než proud nakrátko. Tohle je možné pouze v záporném rozsahu napětí zastíněného článku a tento článek poté funguje jako zátěž, která může být popsána rovnicí obvodu, jak je znázorněno na **obr. 5.7**

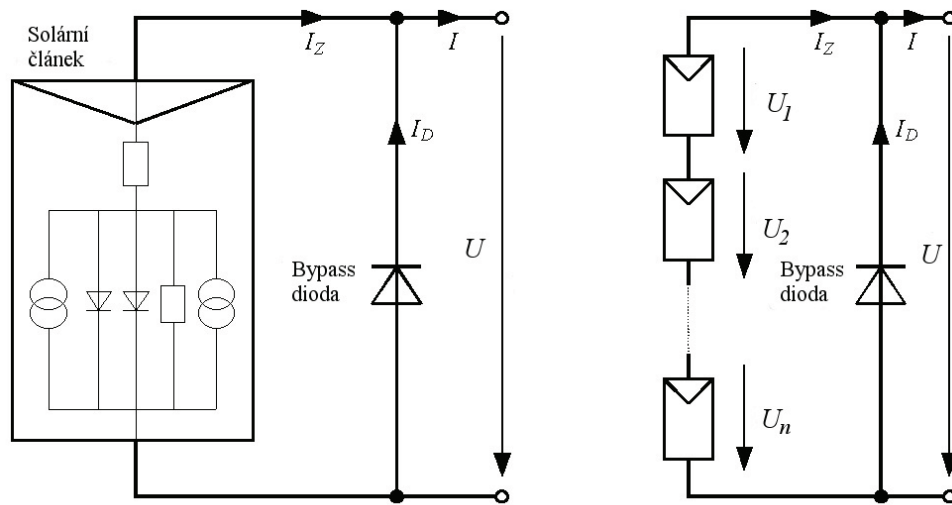
Obr. 6.3 ukazuje určení bodu charakteristiky (1). Napětí modulu pro daný proud je součet napětí částečně zastíněného článku (1a) a 35x napětí ozářeného článku (1b). Celková charakteristika modulu při zastínění je vypočítána postupně pro rozdílné proudy.

Je zřejmé, že zastínění článku snižuje drasticky výkonost celého modulu. Maximální výkon modulu se snižuje z $P_1 = 20.3 \text{ W}$ na $P_2 = 6.3 \text{ W}$, tj. asi o 70 %, avšak pouze 2 % modulu jsou zastíněna. Částečně zastíněné fotovoltaické články se v tomto případě chovají jako zátěž. Ztrátový výkon zastíněného článku je 12.7 W a je získán, když je modul ve zkratu.

Další situace zastínění při vyšším ozáření může zvýšit ztrátový výkon zastíněného článku až na 30 W. Bude článek výrazně zahřívat a může ho dokonce i zničit. Tyto tzv. horké body, tj. horké oblasti o velikosti 1mm, se mohou objevit tam, kde se materiál článku rozpouští nebo kde je obal článku poškozen.

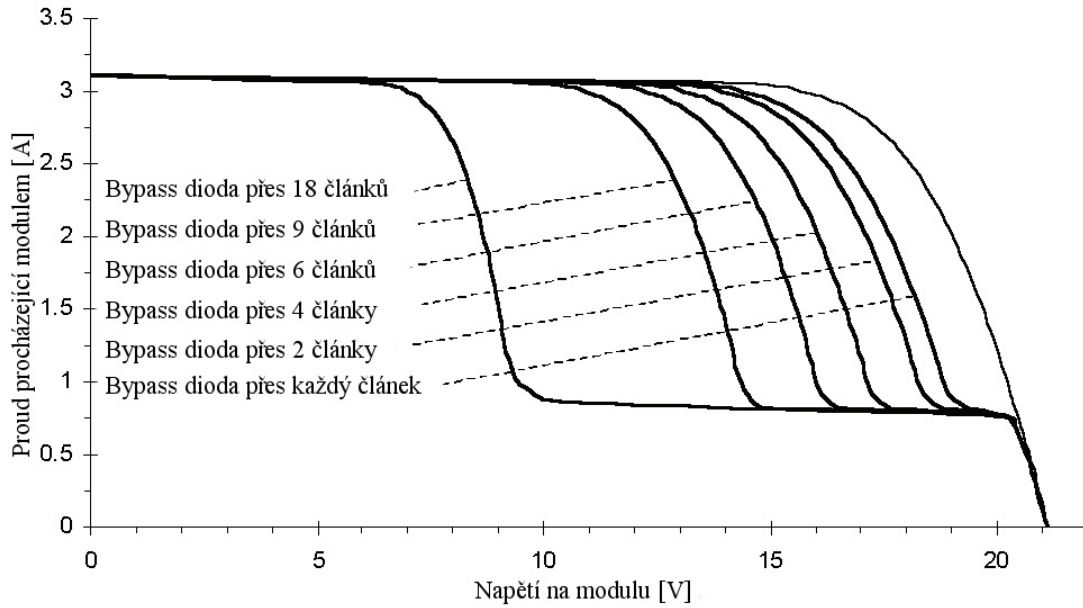
Abychom ochránili jednotlivé články od těchto bodů, které souvisí s tepelným poškozením, zařazujeme tzv. bypassové diody do fotovoltaického modulu paralelně k fotovoltaickému článku. Tyto diody nejsou aktivní během běžného používání,

ale jakmile se vyskytne zastínění, diodami protéká proud. Proto integrace bypassových diod eliminuje možnost vysokého záporného napětí a v procesu eliminuje navýšení teploty zastíněných fotovoltaických článků.

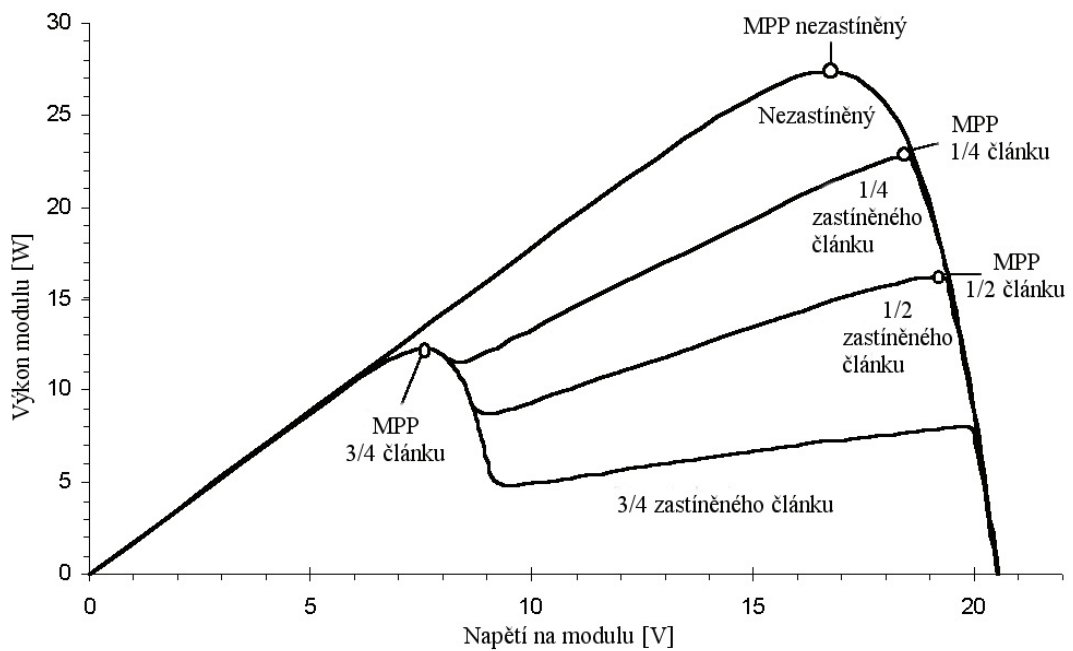


Obr. 6.4: Integrace bypass diody [5]

Bypassové diody jsou obvykle připojeny přes 18 – 24 článků. Důvod tohoto zapojení je hlavně ekonomický. Dvě bypassové diody jsou vhodné pro fotovoltaický modul s výkonem o velikosti okolo 50 W složeného z 36 – 40 článků. Diody mohou být integrovány do rámu modulu. Nicméně tyto diody nemohou plně ochránit každý článek, pouze použití jedné bypass diody pro každý článek může poskytnout dostačující ochranu. Polovodičové technologie mohou přímo integrovat bypassové diody do článků. Moduly snášejí zastínění s integrovanými bypassovými diodami, které byly poprvé vyrobeny firmou Sharp, výrazně vykazují nižší ztráty, když jsou nehomogenně osvětlovány.



Obr. 6.5: Charakteristika simulovaného modulu s bypass diodami přes různý počet článků (při osvětlení $E = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 300 \text{ K}$) [5]



Obr. 6.6: P – U charakteristika modulu s 36 články a 2 bypass diodami. Jeden článek je s různým zastíněním, všechny ostatní články jsou plně osvětleny (při osvětlení $E = 574 \text{ W/m}^2$, $T = 300 \text{ K}$) [5]

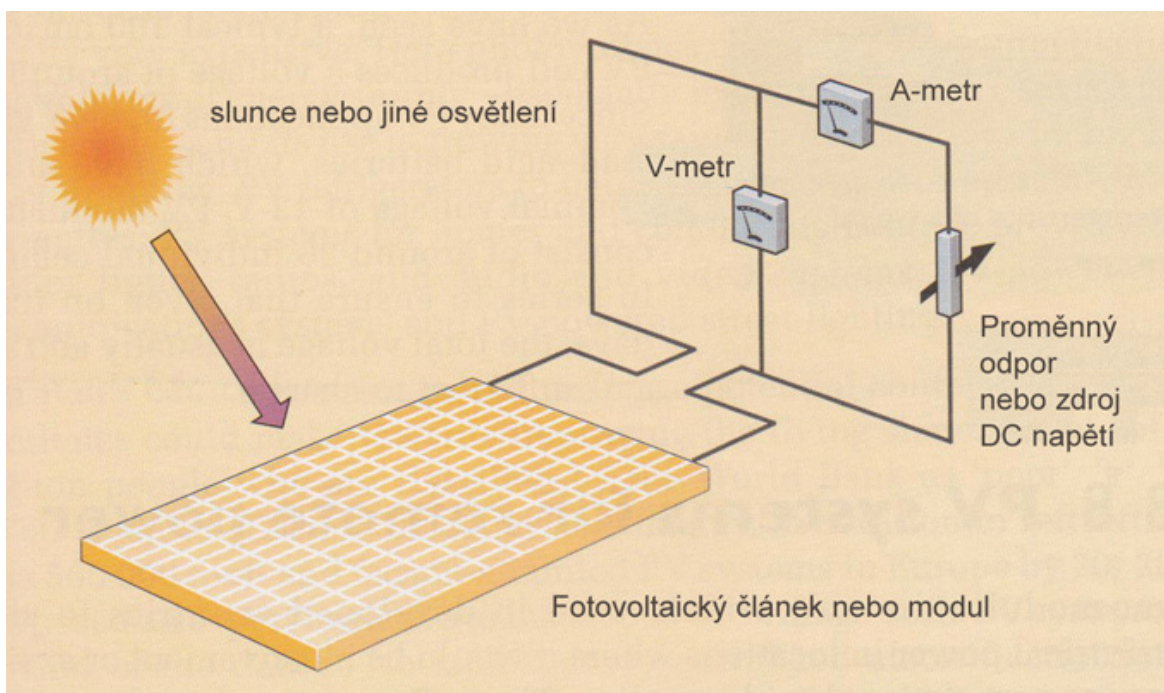
Obrázek 6.4 znázorňuje integraci bypassové diody přes články. Bypassová dioda se přepne, jakmile je záporné napětí okolo -0.7 V, záleží na druhu diody. Toto záporné napětí se vyskytuje, pokud napětí zastíněného článku je rovno součtu napětí ozářených článků a článku bypassové diody.

Obrázek 6.5 ukazuje tvar $I - U$ charakteristiky s bypassovými diodami napříč různým počtem článků. V tomto případě je jeden článek zastíněn na 75%. Se snižujícím se počtem článků na bypass diodu dochází ke změně charakteristiky. Větší počet bypassových diod v panelu snižuje ztráty energie a napětí na jednotlivých člancích.

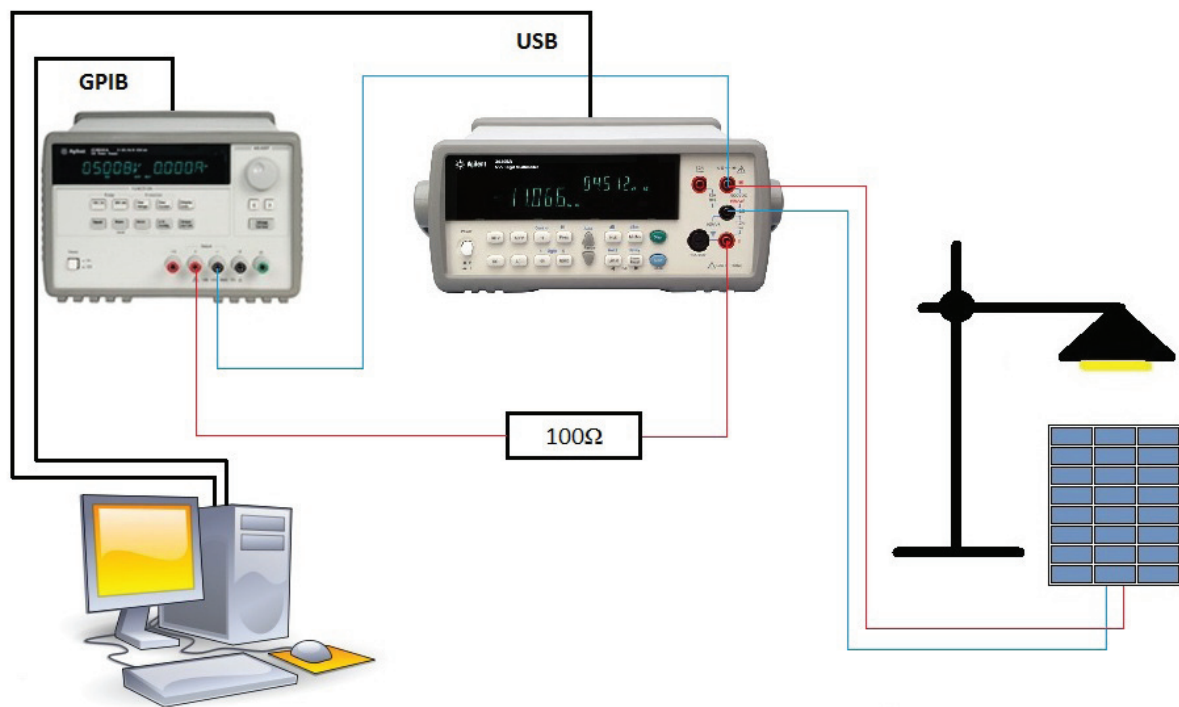
Obrázek 6.6 ukazuje $P - U$ charakteristiky 36 článkového modulu se dvěma bypassovými diodami napříč 18 články při různých situacích zastínění. V závislosti na stupni zastínění se maxima bodu MPP přesouvají.

7. PRAKTICKÉ MĚŘENÍ

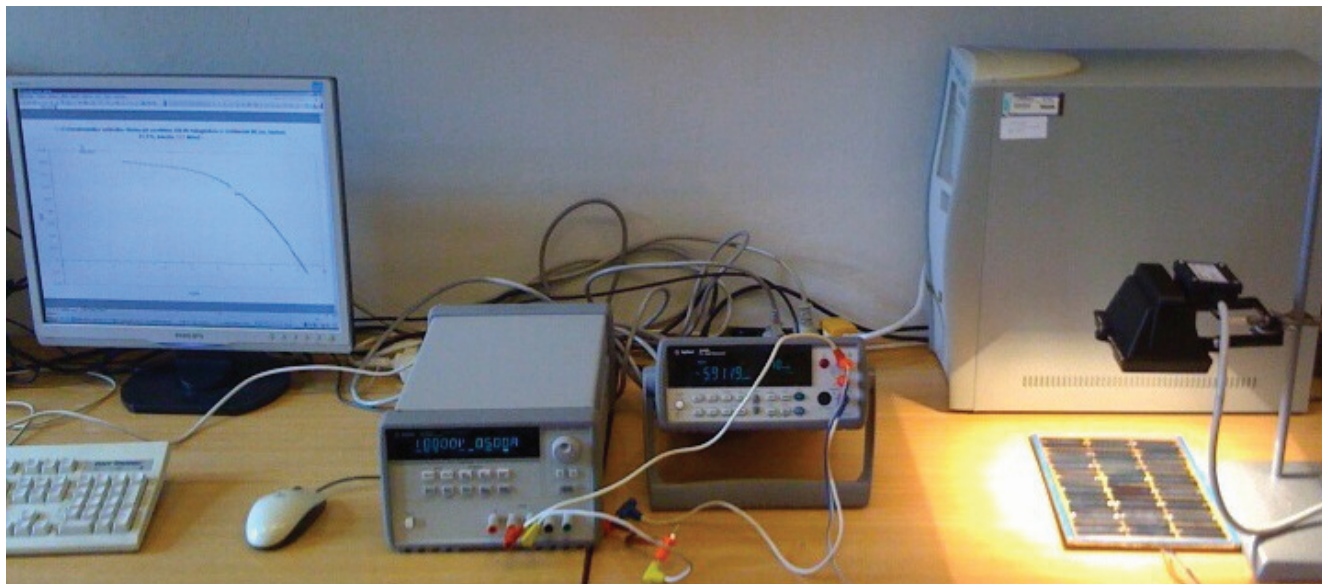
V této části práce bude popsáno měření na reálném fotovoltaickém panelu. Výsledkem měření budou $I - U$ charakteristiky reálného fotovoltaického panelu. Při měření je nutné použít 100Ω odpor jako zátěž, který je sériově zapojen ke zdroji. Tento odpor je nutné použít, aby bylo možné na zdroji nastavit vyšší napětí. Napětí je nastavováno v rozsahu od 0 do U_{OC} dle potřeb k aktuálně použitému fotovoltaickému článku. Napětí se pro větší přesnost nastavuje pomocí počítače a programu, který měření řídí. Napájecí zdroj je s počítačem propojen pomocí GPIB kabelu. Během měření se musí přepólovat napájecí svorky. Na tento proces je možné v programu nastavit dobu prodlevy v měření. V mém případě je nastaveno 15s, což je doba dostatečně dlouhá na přepólování konektorů. Výsledkem měření jsou hodnoty proudu I , který je fotovoltaickém panelu odebírán a napětí U na fotovoltaickém panelu. Naměřené hodnoty jsou pomocí USB kabelu převedeny do počítače do programu MS Excel a v něm následně zpracovány do grafu. **Obr. 7.1** ukazuje schéma zapojení měřícího obvodu. Na **obr. 7.2** je znázorněno zapojení měřícího pracoviště. Na **obr. 7.3** je fotodokumentace zapojení měřícího pracoviště.



Obr. 7.1: Schéma zapojení měřícího obvodu [6]



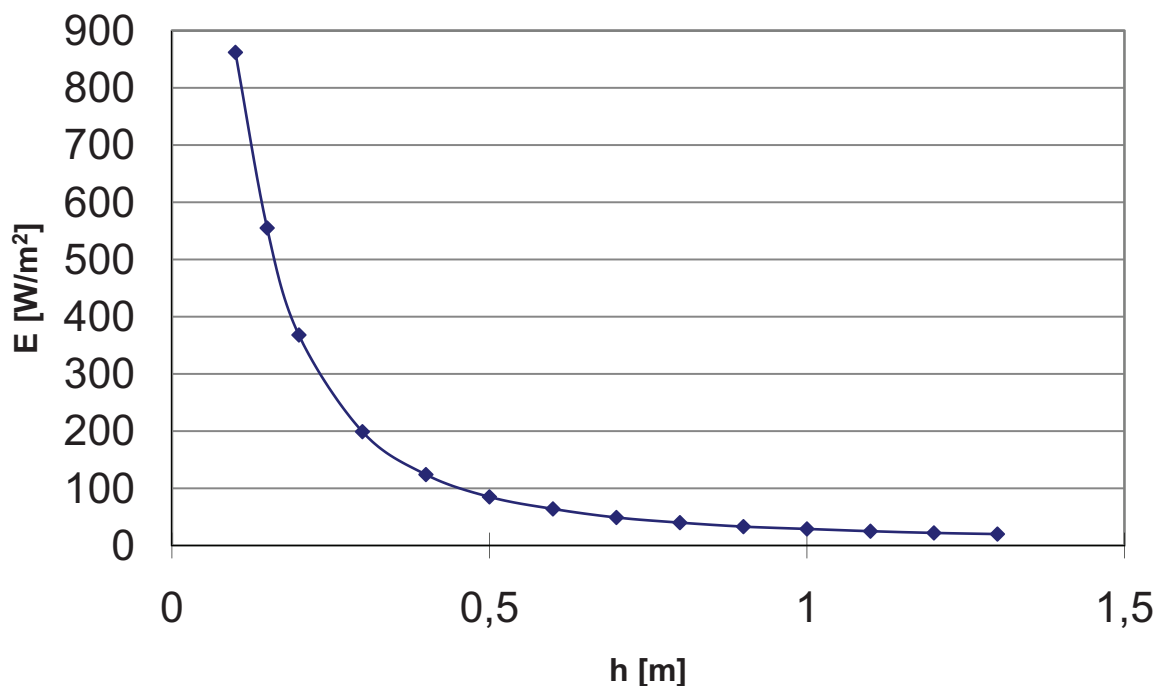
Obr. 7.2: Zapojení měřícího pracoviště



Obr. 7.3: Fotodokumentace zapojení měřícího obvodu

7.1 OSVĚTLENÍ FOTOVOLTAICKÉHO PANELU

Osvětlení fotovoltaického panelu bylo provedeno pomocí lampy na posuvném stojanu. Zdrojem světla je halogenová 150W žárovka. Naskýtá se problém s intenzitou světla v závislosti vzdálenosti lampy a fotovoltaického panelu. Na **obr. 7.4** je znázorněna závislost intenzity světla na vzdálenosti od panelu. Z tohoto grafu je patrné, že intenzita světla se vzdáleností exponenciálně klesá.



Obr. 7.4: Závislost intenzity světla na vzdálenosti halogenové 150 W lampy

7.2 REÁLNÝ FOTOVOLTAICKÝ PANEL

Zkoumaný fotovoltaický panel je tvořen sériovým spojením 24 fotovoltaických článků. Panel je znázorněn na **obr. 7.5**. Jednotlivé články jsou z polykrystalického křemíku. Rozměr dílčího článku je $5,2 \cdot 10^{-2}$ m a $3,0 \cdot 10^{-2}$ m. Celková plocha článku je $1,56 \cdot 10^{-3}$ m². Plocha všech 24 článků je $3,744 \cdot 10^{-2}$ m². Fotovoltaický panel je uchycen v rámečku o rozměrech $1,8 \cdot 10^{-1}$ m a $2,7 \cdot 10^{-1}$ m. Celková plocha fotovoltaického panelu je $4,86 \cdot 10^{-2}$ m².

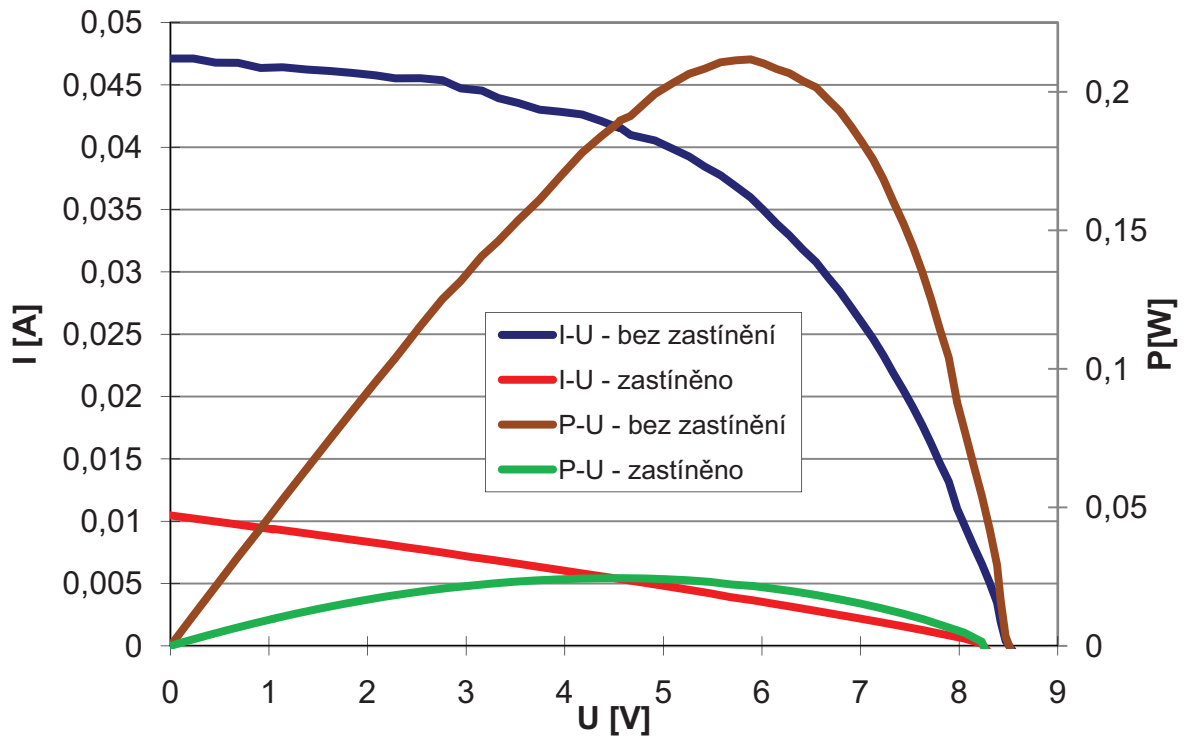
Osvětlování panelu bylo prováděno ve dvou různých vzdálenostech 150 W halogenovou lampou. Vzdálenosti byly $15 \cdot 10^{-2}$ m a $30 \cdot 10^{-2}$ m. Před každým měřením bylo nutné počkat na ustálení teploty, která působí z použité lampy. Na ustálení se čekalo přibližně 45 minut.

Pro každou vzdálenost bylo simulováno různé zastínění. V prvním případě bylo osvětlováno bez zastínění, ve druhém byl zastíněn jeden článek a ve třetím případě bylo zastíněno 6 článků.



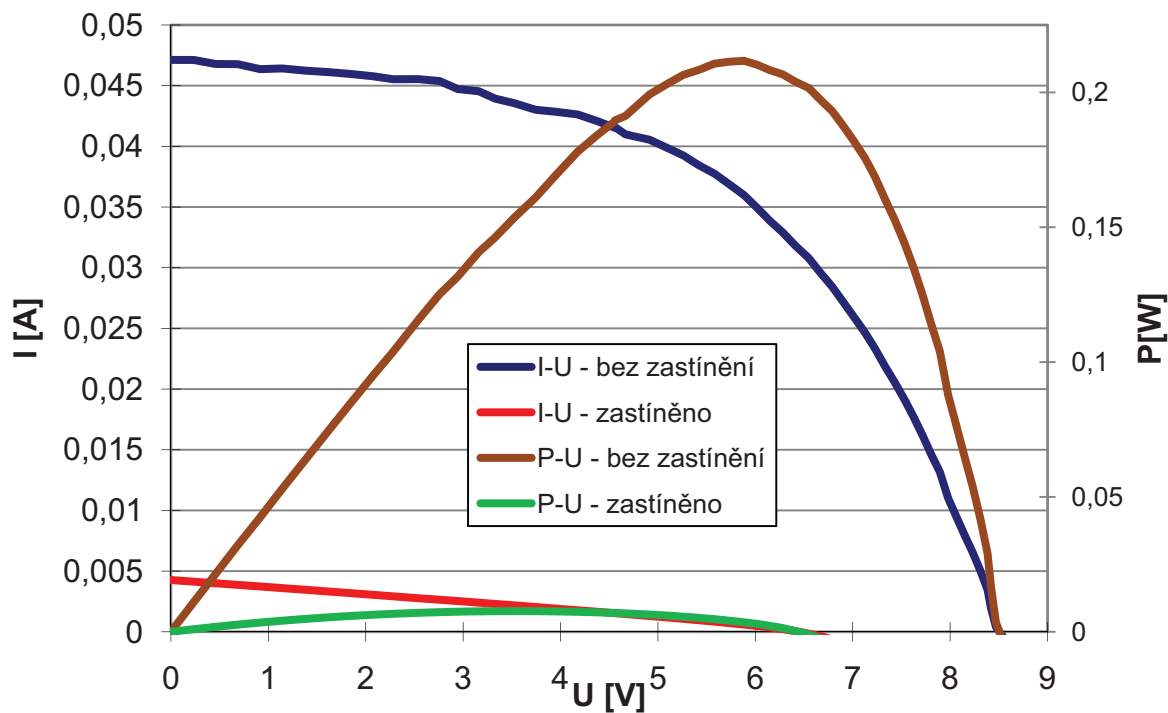
Obr. 7.5: Reálný fotovoltaický panel (24 sériově zapojených článků)

7.2.1 I-U a P-U charakteristiky reálného fotovoltaického panelu ($h = 30 \cdot 10^{-2}$ m)



Obr. 7.6: I – U a P – U charakteristiky fotovoltaického článku bez zastínění a při zastínění 1 článku ze vzdálenosti $h = 30 \cdot 10^{-2}$ m

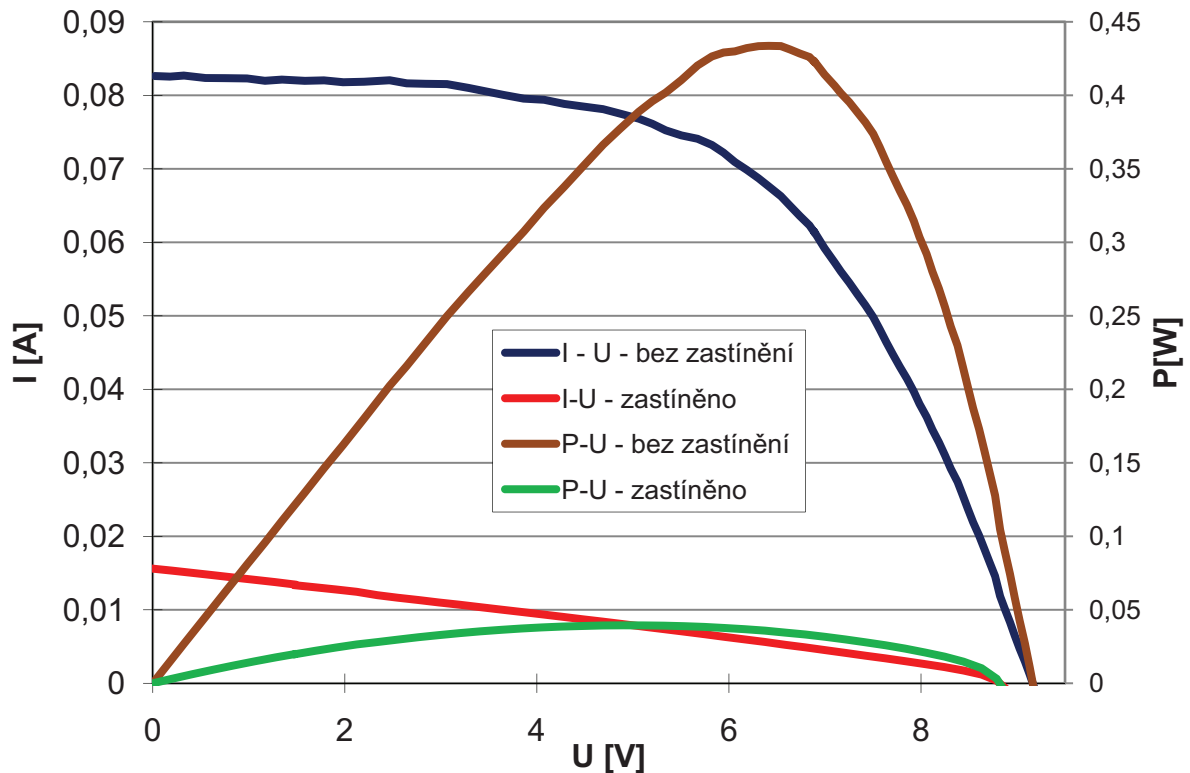
Na **obr. 7.6** jsou znázorněny I-U a P-U charakteristiky reálného fotovoltaického panelu při $h = 30 \cdot 10^{-2}$ m. Průběh „bez zastínění“ odpovídá plně ozářenému panelu s intenzitou světla $E = 199 \text{ W/m}^2$. Průběh „zastíněno“ je výsledná charakteristika s 1 zastíněným článkem na 24 článkovém fotovoltaickém panelu při intenzitě světla $E = 199 \text{ W/m}^2$.



Obr. 7.7: I - U a P – U charakteristiky fotovoltaického článku bez zastínění a při zastínění 6ti článků ze vzdálenosti $h = 30 \cdot 10^{-2}$ m

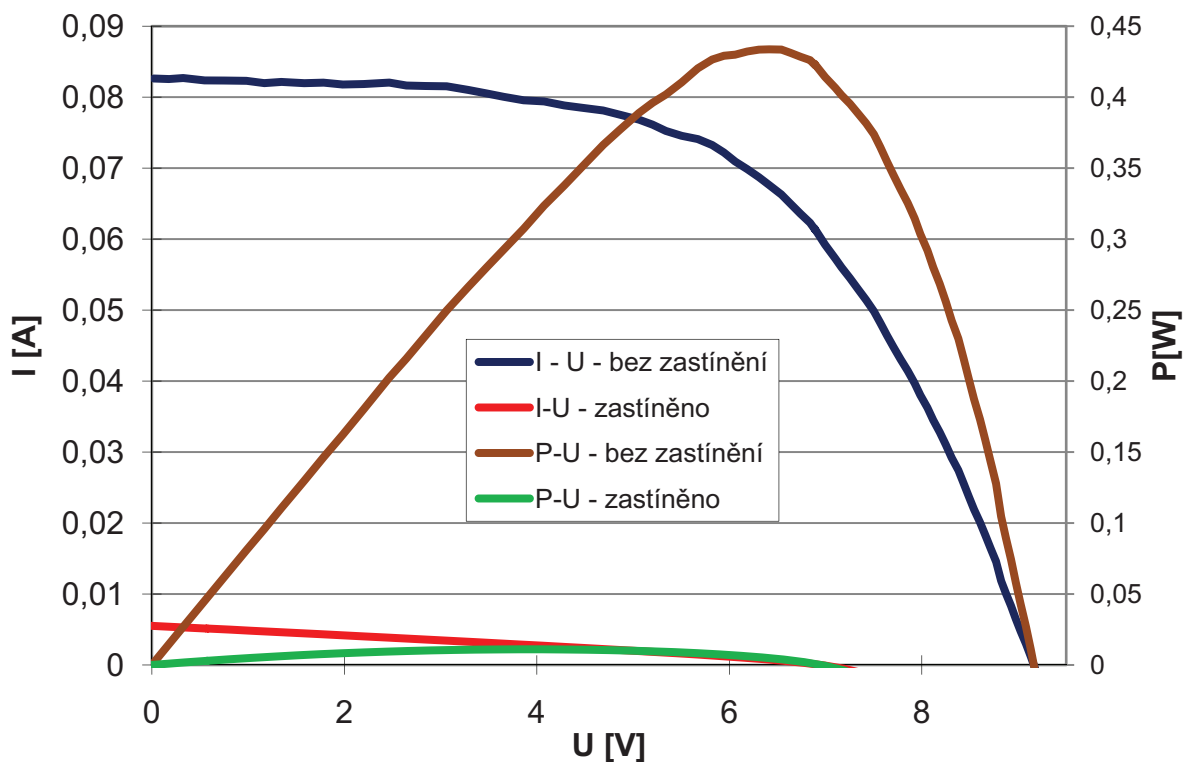
Na **obr. 7.7** jsou znázorněny I-U a P-U charakteristiky reálného fotovoltaického panelu při $h = 30 \cdot 10^{-2}$ m. Průběh „bez zastínění“ odpovídá plně ozářenému panelu s intenzitou světla $E = 199 \text{ W/m}^2$. Průběh „zastíněno“ je výsledná charakteristika s 6ti zastíněnými články na 24 článkovém fotovoltaickém panelu při intenzitě světla $E = 199 \text{ W/m}^2$.

7.2.2 I-U a P-U charakteristiky reálného fotovoltaického panelu ($h = 15 \cdot 10^{-2}$ m)



Obr. 7.8: I-U a P-U charakteristiky fotovoltaického článku bez zastínění a při zastínění 1 článku ze vzdálenosti $h = 15 \cdot 10^{-2}$ m

Na **obr. 7.8** jsou znázorněny I-U a P-U charakteristiky reálného fotovoltaického panelu při $h = 15 \cdot 10^{-2}$ m. Průběh „bez zastínění“ odpovídá plně ozářenému panelu s intenzitou světla $E = 555 \text{ W/m}^2$. Průběh „zastíněno“ je výsledná charakteristika s 1 zastíněným článkem na 24 článkovém fotovoltaickém panelu při intenzitě světla $E = 555 \text{ W/m}^2$.



Obr. 7.9: I – U a P - U charakteristiky fotovoltaického článku bez zastínění a při zastínění 6ti článků ze vzdálenosti $h = 15 \cdot 10^{-2}$ m

Na **obr. 7.9** jsou znázorněny I-U a P-U charakteristiky reálného fotovoltaického panelu při $h = 15 \cdot 10^{-2}$ m. Průběh „bez zastínění“ odpovídá plně ozářenému panelu s intenzitou světla $E = 555 \text{ W/m}^2$. Průběh „zastíněno“ je výsledná charakteristika s 6ti zastíněnými články na 24 článkovém fotovoltaickém panelu při intenzitě světla $E = 555 \text{ W/m}^2$.

Tab. 7.1: Hodnoty proudu, napětí a výkonu u reálného fotovoltaického panelu

Úroveň zastínění	P_{MPP}	U_{MPP}	I_{MPP}	I_{SC}	U_{OC}
	[W]	[V]	[A]	[A]	[V]
Bez zastínění	0,2117	5,8854	0,0359	0,0471	8,4705
1 článek zastíněn	0,0244	4,5931	0,0053	0,0105	8,0532
6 článků zastíněno	0,0076	3,4935	0,0022	0,0041	6,7025

Tab. 7.1 uvádí souhrn hodnot P_{MPP} , U_{MPP} , I_{MPP} , I_{SC} , U_{OC} reálného fotovoltaického panelu pro panel bez zastínění, se zastíněným 1 článkem a zastíněnými 6 články.

8. SIMULAČNÍ PROGRAM

8.1 PROGRAMOVACÍ PROSTŘEDÍ

Simulace je navržena v programu VEE Pro 8.0, což je grafický programovací software společnosti Agilent. Tento program usnadňuje programování, snižuje počet řádek programu a má méně složité obrazovky pro tvorbu programu. Jedná se o programovací jazyk vysoké úrovně používající grafické zobrazení podobné vývojovému diagramu.

Struktura tohoto programu je otevřená, a proto není příliš problémů s kompatibilitou softwaru a hardwaru jiných výrobců.

V programu VEE Pro 8.0 je simulováno různé zastínění fotovoltaického článku. Výsledným jevem jsou I – U charakteristiky článků. Při simulaci je možné nastavit několik parametrů, které charakteristiky ovlivňují:

- **Vliv teploty.** S rostoucí teplotou výkon článku klesá. Procházející proud nepatrně klesá, ale zejména se podstatně zvyšuje napětí.
- **Intenzita světla.** Se zvyšující intenzitou světla stoupá výstupní výkon článku. Roste proud i napětí. Avšak existuje určité hraniční omezení, při kterém už se další zvyšování výkonu nestává.
- **Plocha článku.** Při větší ploše článku je dosahováno větších výkonů. Stoupá napětí a především proud.
- **Diodový faktor.** V jedno-diodovém modelu je diodový faktor nastavitelný v rozmezí 1 až 5. Čím větší je tato hodnota, tím lepší výsledky jsou k dispozici. Ve dvou-diodovém modelu je jedna dioda nastavitelná v intervalu 1 až 5 a druhá dioda v intervalu 2 až 5. Tímto modelem je lépe popsáno chování reálných fotovoltaických článků než u jedno-diodového modelu.
- **Sériový odpor.** S rostoucím sériovým odporem klesá výkon článku a zhoršuje se fill faktor (FF). Čím menší je sériový odpor, tím lepší charakteristiky docílíme.
- **Paralelní odpor.** U tohoto odporu není jeho vliv tolik patrný jako při zapojení sériového odporu. S klesajícím odporem klesá výkon. Lze říci, že čím větší paralelní odpor, tím lépe a lepších výsledků dosáhneme.

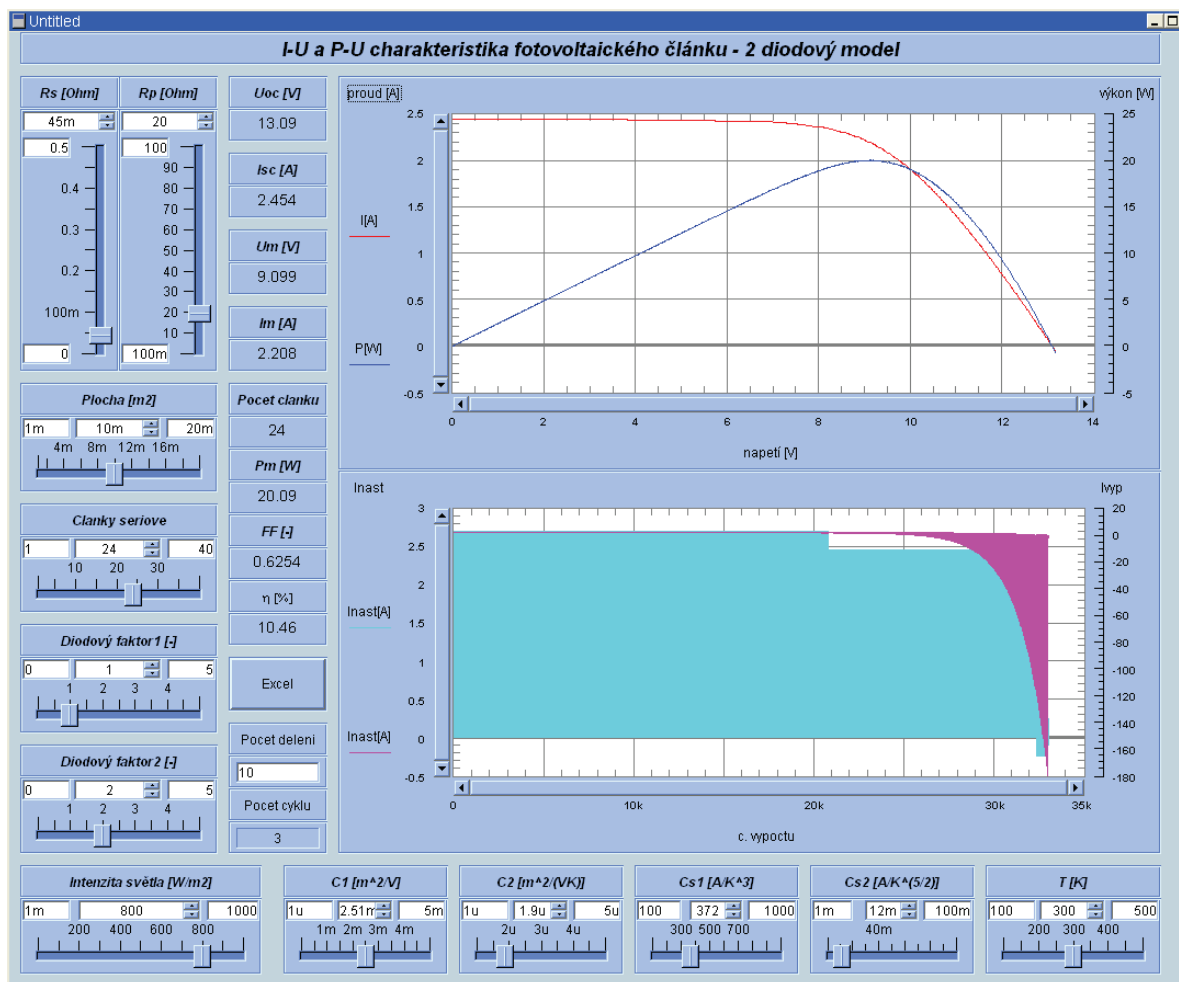
8.2 METODA VÝPOČTU

Principem simulačního programu je výpočet pomocí tzv. intervalové metody. Pomocí intervalové metody je počítán procházející proud, který je v intervalu od 0 do I_{Ph} rozdělen a dosazen do již zmíněné rovnice (11) z teoretického rozboru v kapitole 4.3. Dále je hledán nejmenší možný rozdíl mezi vstupní dosazenou hodnotou a výstupní vypočtenou hodnotou proudu. Pro výpočet je zvoleno rozdělení do 30 intervalů, které se 4 krát opakují. Tento počet je zvolen vzhledem k určitému kompromisu mezi přesností daného výpočtu a potřebnou dobou pro výpočet. Z tohoto plyne, že pro každou hodnotu napětí je provedeno 120 výpočtů pro proud.

Avšak před použitím intervalové metody byl výpočet proudu prováděn pomocí Newtonovy iterační metody. Při této metodě byl nastaven počet iterací na 50. Hlavním problémem této metody byl fakt, že pokud se nedosáhlo konvergence po těchto 50ti iteracích, tak byla za výsledek brána průměrná hodnota z prvních 2 vypočítaných hodnot proudu, což vedlo k velké nepřesnosti a nebylo možné tuto metodu dále používat. Dalším problémem této metody je nefunkčnost při zadání extrémní hodnoty např. u sériového odporu. A v případě, že napětí stoupá, tak vypočtený proud přestává konvergovat a tím pádem nelze zjistit skutečná hodnota proudu.

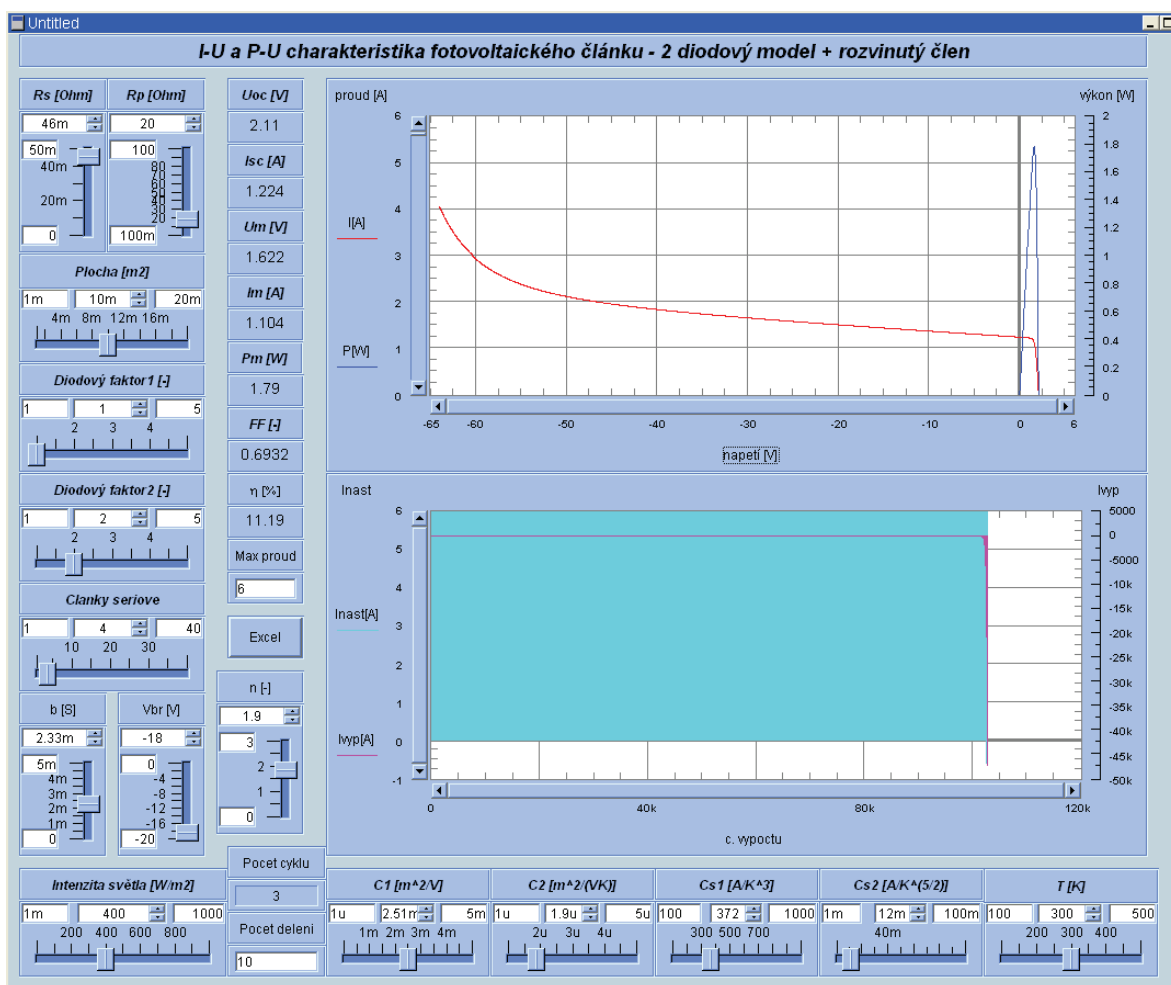
Po porovnání těchto dvou metod je v simulačním programu pro simulaci I-U a P-U charakteristik fotovoltaických panelů zvolena metoda intervalová, která je přesnější a má širší spektrum použití, např. pro zadávání již zmíněného sériového odporu.

8.3 SIMULAČNÍ PROSTŘEDÍ



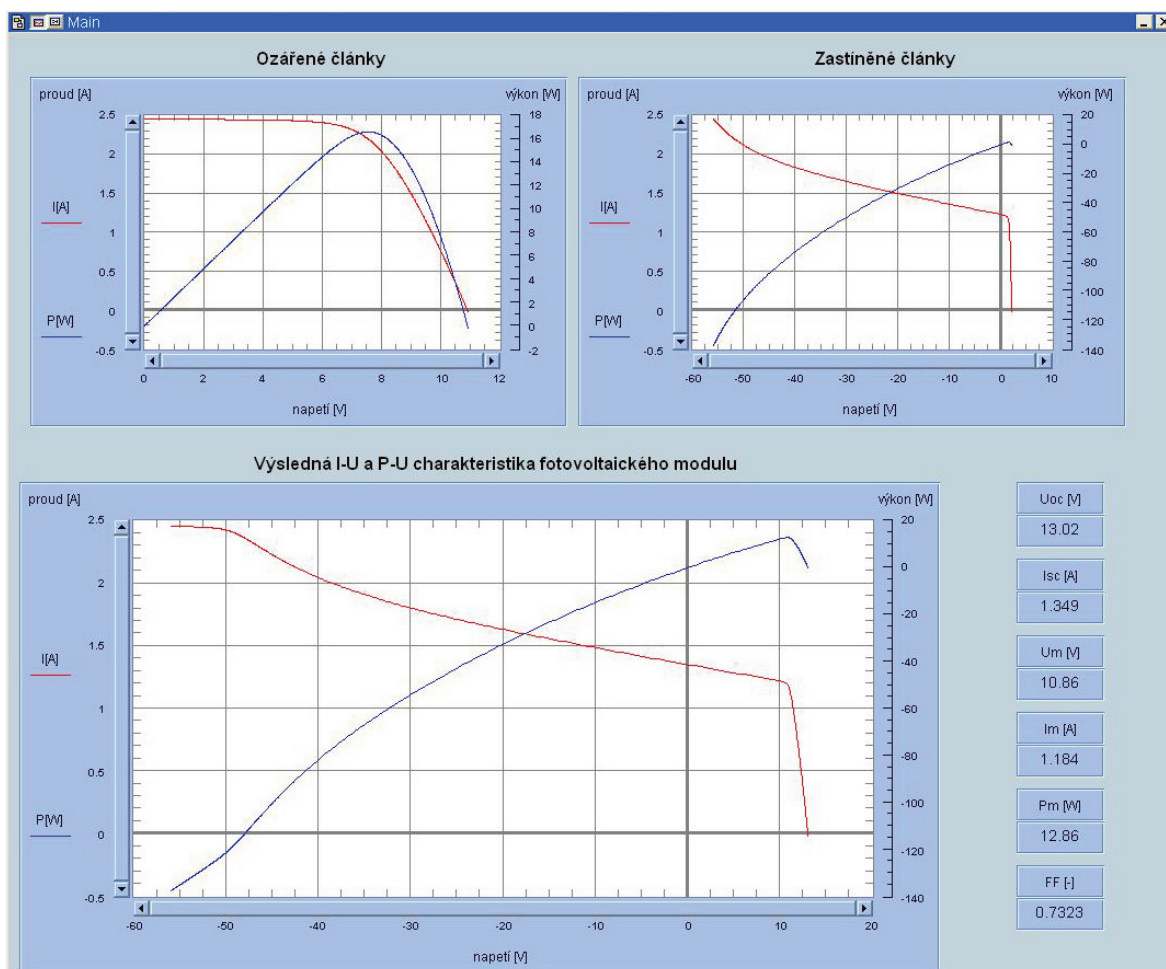
Obr. 8.1: Simulační prostředí – nasimulování ozáření všech článků v panelu

Na **obr. 8.1** je znázorněna první část simulačního programu, kde se simuluje celý 24 článkový fotovoltaický panel bez zastínění ($E = 800 \text{ W/m}^2$). Na grafu v horní části obrazovky jsou vidět I-U a P-U charakteristiky fotovoltaického panelu. Ve spodní části obrazovky je druhý graf, jenž zobrazuje hodnoty proudů při jednotlivých vypočtených krocích.



Obr. 8.2: Simulační prostředí – nasimulování zastínění 4 článků v panelu 50% intenzitou světla ($E = 400 \text{ W/m}^2$)

Na **obr. 8.2** je znázorněno zastínění 4 článků 50% intenzitou světla ($E = 400 \text{ W/m}^2$). Je zde vidět obrovský pokles výkonu a posun celé charakteristiky.



Obr. 8.3: Simulační prostředí – nasimulování výsledného vlivu zastínění

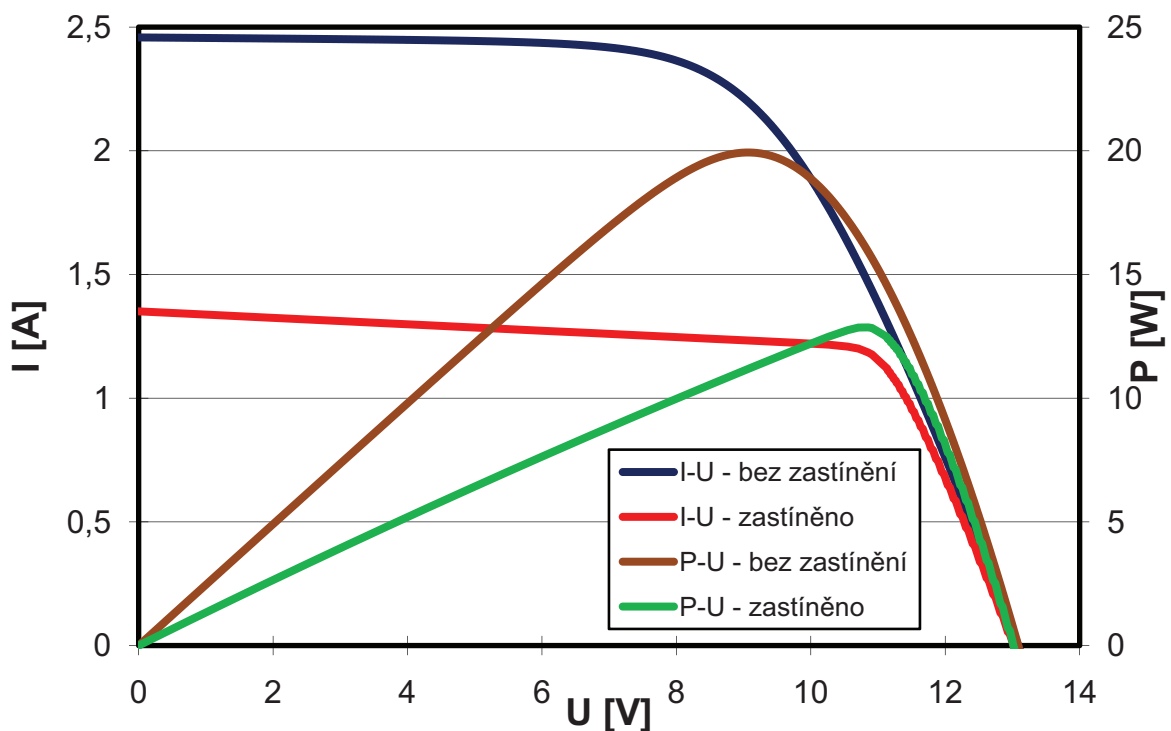
Na **obr. 8.3** je znázorněna výsledná charakteristika po ovlivnění zastíněním 4 článků na 24 článkovém panelu.

8.3.1 Simulace

Pro názornou ukázkou byl nasimulován fotovoltaický panel s náhodně vybranými parametry. Byl zvolen 24 článkový panel, u kterého byly zastíněny 4 články s 50% intenzitou světla. Nastavené parametry jsou uvedeny v **tab. 8.1**.

Tab. 8.1: Parametry pro nastavení simulačního programu

R_S	R_P	S	E	C_1	C_2	C_{S1}	C_{S2}	T
[Ω]	[Ω]	[m^2]	[W/m^2]	[m^2/V]	[m^2/VK]	[A/K^3]	[$A/K^{(5/2)}$]	[K]
$46 \cdot 10^{-3}$	20	$10 \cdot 10^{-3}$	800	$2,51 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-6}$	372	$12 \cdot 10^{-3}$	300



Obr. 8.4: I-U a P-U charakteristiky 24 článkového panelu. Charakteristika bez zastínění a výsledná charakteristika se 4 zastíněnými články na 50%

Na **obr. 8.4** jsou znázorněny I-U a P-U charakteristiky nasimulovaného fotovoltaického panelu. Průběh „bez zastínění“ odpovídá plně ozářenému panel s intenzitou světla $E = 800 \text{ W/m}^2$. Průběh „zastíněno“ je výsledná charakteristika se 4 zastíněnými články s intenzitou světla $E = 400 \text{ W/m}^2$ na 24 článkovém fotovoltaickém panelu.

8.4 HLEDÁNÍ CHARAKTERISTICKÝCH KONSTANT

Charakteristické konstanty je potřeba nalézt pro vhodné nastavení simulačního programu, aby bylo možno nasimulovat totožné I-U charakteristiky, jako má reálný fotovoltaický článek. U reálného fotovoltaického článku známe parametry jako jsou plocha panelu, teplota a intenzita světla, díky nimž je možné vytvořit I-U charakteristiku fotovoltaického článku. Pro nasimulované charakteristiky je nutné znát koeficienty C_1 , C_2 , C_{S1} , C_{S2} , R_S , R_P (platí pro dvou diodový model). Pokud dojde ke správnému nastavení těchto konstant, tak jsou výsledkem téměř totožné nasimulované a reálné I-U charakteristiky fotovoltaických článků.

Proměnné C_1 , C_2 slouží pro nastavení hodnoty proudu. Pokud jsou hodnoty těchto konstant správně nastaveny, dosáhneme přesného určení proudu I_{SC} . Z naměřených hodnot je nám známa hodnota intenzity osvětlení a teploty, a proto je možné tyto konstanty dopočítat pomocí rovnice (23). Postupem je vyřešení dvou rovnic o dvou neznámých. Do rovnic jsou dosazovány hodnoty z reálného měření, které bylo provedeno pro vzdálenosti $15 \cdot 10^{-2}$ m a $30 \cdot 10^{-2}$ m. Každou rovnicí (23) je nutné vynásobit ještě hodnotou plochy článku S . Fotelektrický proud I_{ph} je při nulovém napětí U roven proudu nakrátko I_{SC} . Pro numerický výpočet rovnic je z hodnot reálného měření odečtena hodnota proudu I_{SC} , která se do rovnic dosadí.

Koeficienty C_{S1} , C_{S2} slouží ke změně nastavení napětí naprázdno U_{OC} . Se zvyšujícím se koeficientem C_{S1} se napětí naprázdno U_{OC} snižuje. Další možností, jak změnit hodnotu napětí naprázdno U_{OC} , je možné nastavení diodového faktoru. Výstupní napětí je ovlivňováno také paralelním odporem R_P .

V **tab. 8.2** jsou uvedeny hodnoty, které nám jsou známy z měření reálného fotovoltaického článku.

Tab. 8.2: Vybrané naměřené hodnoty reálného fotovoltaického článku

Měření	h [m]	E [V/m ²]	I _{SC} [A]	U _{OC} [V]	T [K]	S _{článek} [m ²]	S _{panelu} [m ²]
1.	$3,0 \cdot 10^{-2}$	199	$47,12 \cdot 10^{-3}$	8,55	318	$1,56 \cdot 10^{-3}$	$3,744 \cdot 10^{-2}$
2.	$1,5 \cdot 10^{-2}$	555	$82,15 \cdot 10^{-3}$	9,13	351	$1,56 \cdot 10^{-3}$	$3,744 \cdot 10^{-2}$

8.4.1 Příklad výpočtu charakteristických konstant C_1 , C_2

$$I_{Ph}(T) = (C_1 + C_2 \cdot T) \cdot E \cdot S_{\text{článek}} \quad (39)$$

$$47,12^{-3} = (C_1 + C_2 \cdot 318) \cdot 199 \cdot 0,156$$

$$82,15^{-3} = (C_1 + C_2 \cdot 351) \cdot 555 \cdot 0,156$$

$$-88697,06 \cdot C_1 = -620,97$$

$$C_1 = \frac{-620,97}{-88697,06} \Rightarrow C_1 = \underline{7,0011 \cdot 10^{-3} m^2/V}$$

$$9871,98 \cdot C_2 = -0,17$$

$$C_2 = \frac{-0,17}{9871,98} \Rightarrow C_2 = \underline{-1,7243 \cdot 10^{-5} m^2/VK}$$

Po vyřešení dvou rovnic o dvou neznámých je možné do simulačního programu zadat námi zjištěné koeficienty kde $C_1 = 7,0011 \cdot 10^{-3} m^2/V$ a $C_2 = -1,7243 \cdot 10^{-5} m^2/VK$.

Pozn. Plocha článku není do rovnice zadána v základních jednotkách (m^2), ale v jednotkách upravených (dm^2). Důvodem je nastavení simulačního programu, kde se tato hodnota převádí na jednotku základní (m^2).

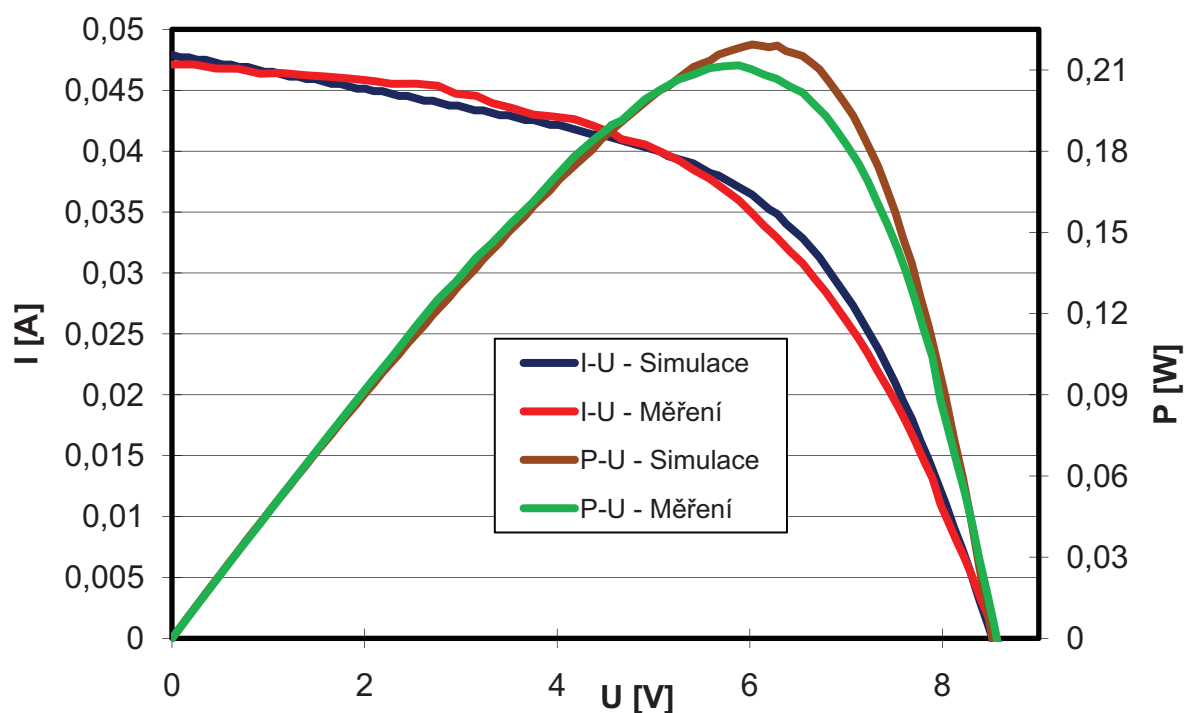
Hodnoty koeficientů C_{S1} a C_{S2} byly zjištěny dle charakteristiky reálného článku.

8.5 SIMULACE REÁLNÉHO FOTOVOLTAICKÉHO PANELU

Zjištěné charakteristické koeficienty jsou uvedeny v **tab. 8.3**. Tyto hodnoty je možné dosadit do simulačního prostředí programu VEE a v něm nasimulovat I-U a P-U charakteristiky totožné s těmi, které nám jsou známy z reálného měření.

Tab. 8.3: Vybrané naměřené hodnoty reálného fotovoltaického článku

R_S	R_P	S	E	C_1	C_2	C_{S1}	C_{S2}	T
[Ω]	[Ω]	[m^2]	[W/m^2]	[m^2/V]	[m^2/VK]	[A/K^3]	[$A/K^{5/2}$]	[K]
$46 \cdot 10^{-3}$	20	$1,56 \cdot 10^{-3}$	199	$7,001 \cdot 10^{-3}$	$-1,724 \cdot 10^{-5}$	1290	$1 \cdot 10^{-3}$	318

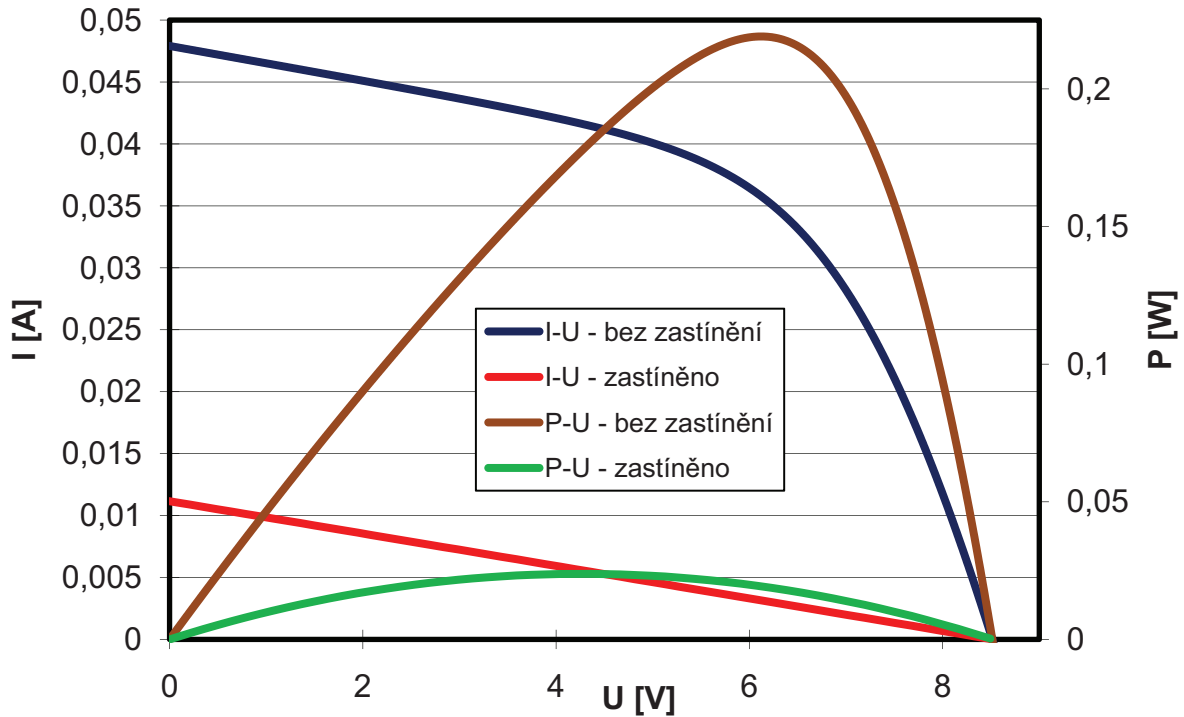


Obr. 8.5: I-U a P-U charakteristiky reálného a nasimulovaného fotovoltaického panelu při $E = 199 \text{ W/m}^2$, $h = 30 \cdot 10^{-2} \text{ m}$

Na **obr. 8.5** jsou zobrazeny reálné a nasimulované I-U a P-U charakteristiky fotovoltaického panelu bez zastínění při $E = 199 \text{ W/m}^2$, $h = 30 \cdot 10^{-2} \text{ m}$. Příčinou mírných odchylek je mechanické provedení zkoumaného fotovoltaického panelu (např. různé velikosti článků, stáří, pospojování článků v panelu, atd.).

8.6 SIMULACE VLIVU ZASTÍNĚNÍ

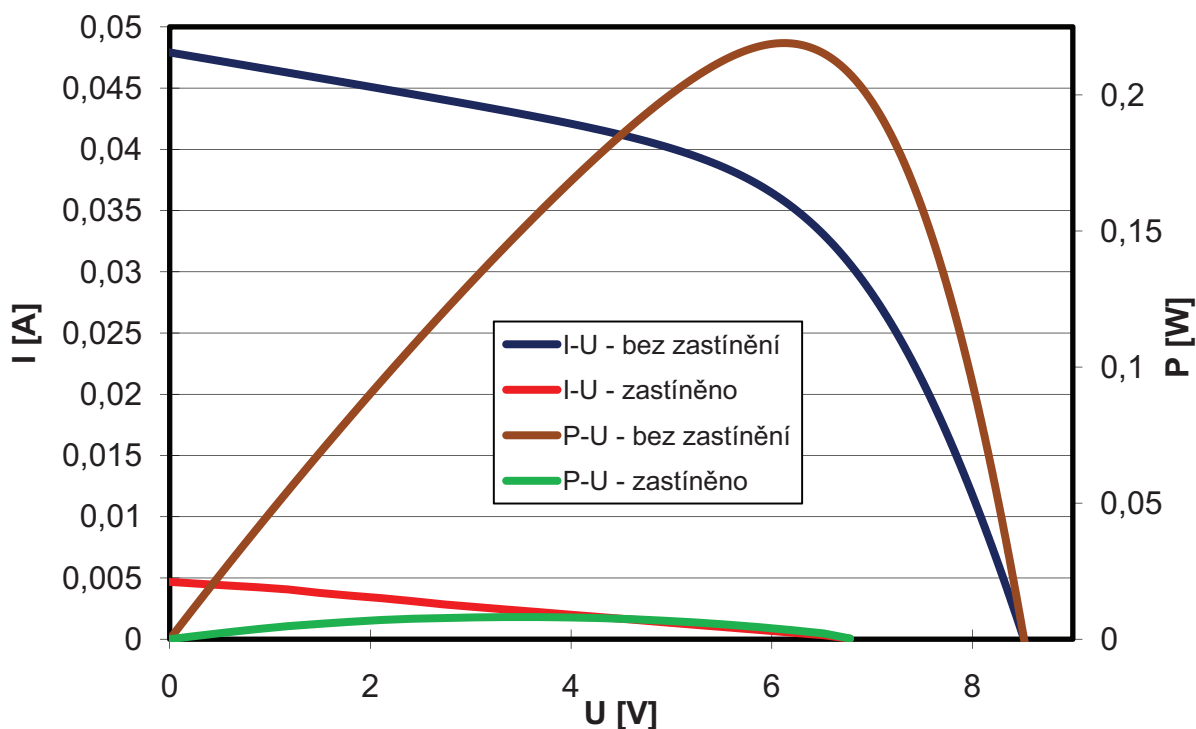
8.6.1 Simulace vlivu zastínění 1 článku na 24 – článkovém panelu



Obr. 8.6: Nasimulované I-U a P-U charakteristiky fotovoltaického panelu bez zastínění a při zastínění 1 článku ze vzdálenosti $h = 30 \cdot 10^{-2}$ m

Na **obr. 8.6** jsou znázorněny I-U a P-U charakteristiky nasimulovaného fotovoltaického panelu při $h = 30 \cdot 10^{-2}$ m. V simulačním programu bylo nasimulováno zastínění 1 článku na 24 – článkovém fotovoltaickém panelu. Průběh „bez zastínění“ odpovídá plně ozářenému panelu s intenzitou světla $E = 199 \text{ W/m}^2$. Průběh „zastíněno“ je výsledná charakteristika s 1 zastíněným článkem na 24 článkovém fotovoltaickém panelu při intenzitě světla $E = 199 \text{ W/m}^2$.

8.6.2 Simulace vlivu zastínění 6ti článků na 24 – článkovém panelu



Obr. 8.7: Nasimulované I-U a P-U charakteristiky fotovoltaického panelu bez zastínění a při zastínění 6ti článků ze vzdálenosti $h = 30 \cdot 10^{-2}$ m

Na **obr. 8.7** jsou znázorněny I-U a P-U charakteristiky nasimulovaného fotovoltaického panelu při $h = 30 \cdot 10^{-2}$ m. V simulačním programu bylo nasimulováno zastínění 6ti článků na 24 – článkovém fotovoltaickém panelu. Průběh „bez zastínění“ odpovídá plně ozářenému panelu s intenzitou světla $E = 199 \text{ W/m}^2$. Průběh „zastíněno“ je výsledná charakteristika s 6ti zastíněnými články na 24 článkovém fotovoltaickém panelu při intenzitě světla $E = 199 \text{ W/m}^2$.

Tab. 8.4: Nasimulované hodnoty proudu, napětí a výkonu

Úroveň zastínění	P_{MPP}	U_{MPP}	I_{MPP}	I_{SC}	U_{OC}
	[W]	[V]	[A]	[A]	[V]
Bez zastínění	0,2194	6,0244	0,0364	0,0479	8,4680
1 článek zastíněn	0,0238	4,3557	0,0055	0,0111	8,4927
6 článků zastíněno	0,0081	3,3530	0,0024	0,0045	6,7835

Tab. 8.4 uvádí souhrn nasimulovaných hodnot P_{MPP} , U_{MPP} , I_{MPP} , I_{SC} , U_{OC} pro články bez zastínění, se zastíněným 1 článkem a se zastíněnými 6ti články.

9. ZÁVĚR

Cílem této práce bylo vytvoření simulačního programu, pomocí něhož je možné nasimulovat vliv zastínění na I-U a také na P-U charakteristiky fotovoltaických panelů. Výsledkem jsou charakteristiky, které odpovídají charakteristikám z reálných fotovoltaických panelů.

Práce popisuje základní principy fungování fotovoltaických panelů a jednotlivé generace jejich vývoje. Dále je zaměřena na teoretické poznatky o ekvivalentních obvodech k fotovoltaickým panelům. Základním zaměřením práce je však návrh simulačního prostředí v programu Agilent VEE 8.0 a následné porovnání reálných fotovoltaických panelů s nasimulovanými průběhy.

Při návrhu simulačního programu byla použita Newtonova iterační metoda, která se ovšem ukázala jako nespolehlivá v určitých extrémních případech. Proto byla jako základní metoda použita intervalová metoda, která je přesnější a nedochází u ní k problémům při zadávání extrémních hodnot.

V programu lze nastavit několik charakteristických hodnot jako je sériový odpor, paralelní odpor, plocha článku, diodový faktor, počet paralelně a sériově řazených článků, intenzita světla, teplota a charakteristické konstanty C_1 , C_2 , C_{S1} , C_{S2} . Výstupem z programu jsou dva grafy přímo na uživatelském panelu a dále také možnost exportu dat do programu MS Excel, kde se vytvoří výsledná I-U charakteristika panelu.

Pro měření reálných fotovoltaických panelů bylo zhotoveno automatické měřicí pracoviště, díky němuž se dají rychle a pohodlně změřit charakteristiky reálných fotovoltaických panelů, které je možné okamžitě v simulačním programu nasimulovat.

Pro názornost je nasimulován náhodně zvolený fotovoltaický panel, na kterém je znázorněn vliv působícího zastínění a funkčnost samotného simulačního programu.

V poslední části jsou simulovány charakteristiky reálného fotovoltaického panelu, které byly naměřeny v laboratoři. Z výsledků je patrné, že reálný fotovoltaický panel má už velmi malou účinnost, ale pro ověření simulačního programu je dostačující. Nasimulované charakteristiky jsou velmi přesné a lze je pro laboratorní a školní potřeby využít.

Přínosem práce je zhotovený simulační program, který lze využít jako učební pomůcku při laboratorních měřeních. Program má velice široké možnosti nastavení pro různé druhy fotovoltaických panelů.

10. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] J. VANĚK, P. KŘIVÍK, V. NOVÁK: Alternativní zdroje energie, BRNO 2006.
- [2] *Photovoltaic*, [cit. 2009-04-01].
Dostupné z WWW:
<http://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaics>
- [3] *Sluneční energie*, [cit. 2009-06-02].
Dostupné z WWW:
http://www.fzu.cz/texty/brana/fotovoltaika/slunecni_energie.php
- [4] *Elektrina z fotovoltaických panelů*, [cit. 2009-07-03].
Dostupné z WWW:
<http://ekowatt.cz/uspory/elektrina-z-fotovoltaickych-panelu.shtml>
- [5] V. QUASCHNING: Understanding renewable energy systems, UK, s 131 – 147
- [6] G. BOYLE: Renewable energy power for a sustainable future, Oxford, s 83

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1:	Účinnost generace volných nosičů [1].....	12
Obr. 2.2:	Struktura PERL s účinností 24% [1]	12
Obr. 2.3:	Struktura současných článků z krystalického křemíku [1]	13
Obr. 2.4:	Tři generace fotovoltaiky [1]	15
Obr. 3.1:	Princip činnosti fotovoltaického článku [4].....	16
Obr. 3.2:	Volt-ampérová charakteristika slunečního článku ve tmě a při osvětlení (vlevo) a obvyklý způsob kreslení 4. kvadrantu s vyznačenými hodnotami proudu nakrátko (I_{SC}), napětí naprázdno (U_{OC}) a bodu max. výkonu P_{max}	17
Obr. 4.1:	Voltampérová charakteristika fotovoltaického článku při různém zastínění [5]	18
Obr. 5.1:	Jednoduchý ekvivalentní obvod fotovoltaického článku [5]	20
Obr. 5.2:	Vliv osvětlení E na I – U charakteristiky fotovoltaického článku [5]	20
Obr. 5.3:	Rozšířený ekvivalentní obvod fotovoltaického článku (jedno – diodový model) [5].....	21
Obr. 5.4:	Vliv sériového odporu R_S na I – U charakteristiky fotovoltaického článku [5].	22
Obr. 5.5:	Vliv paralelního odporu R_P na I – U charakteristiky fotovoltaického článku [5].....	23
Obr. 5.6:	Dvou – diodový model fotovoltaického článku [5]	24
Obr. 5.7:	Dvou – diodový ekvivalentní obvod s druhým proudovým zdrojem charakterizujícím pokles negativního napětí fotovoltaického článku [5]	25
Obr. 5.8:	I –U charakteristiky polykrystalického fotovoltaického článku při plném rozsahu napětí [5]	26
Obr. 5.9:	I –U a P – U charakteristika fotovoltaického článku s bodem maximálního výkonu (MPP) [5]	28
Obr. 5.10:	Charakteristika teplotní závislosti fotovoltaického článku [5]	31
Obr. 6.1:	Sériové spojení fotovoltaických článků (nahore: elektrické schéma; dole: pohled shora na modul s krystalickou buňkou [5].....	32
Obr. 6.2:	Charakteristika 36 článkového modulu (při osvětlení $E = 400 \text{ W/m}^2$, $T = 300$ K) [5]	33

Obr. 6.3:	Charakteristika modulu se zastíněním 75% článku [5]	35
Obr. 6.4:	Integrace bypass diody [5].....	36
Obr. 6.5:	Charakteristika simulovaného modulu s bypass diodami přes různý počet článků (při osvětlení $E = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 300 \text{ K}$) [5]	37
Obr. 6.6:	P – U charakteristika modulu s 36 články a 2 bypass diodami. Jeden článek je s různým zastíněním, všechny ostatní články jsou plně osvětleny (při osvětlení $E = 574 \text{ W/m}^2$, $T = 300 \text{ K}$) [5].....	37
Obr. 7.1:	Schéma zapojení měřícího obvodu [6]	39
Obr. 7.2:	Zapojení měřícího pracoviště	40
Obr. 7.3:	Fotodokumentace zapojení měřícího obvodu.....	40
Obr. 7.4:	Závislost intenzity světla na vzdálenosti halogenové 150 W lampy	41
Obr. 7.5:	Reálný fotovoltaický panel (24 sériově zapojených článků).....	42
Obr. 7.6:	I – U a P – U charakteristiky fotovoltaického článku bez zastínění a při zastínění 1 článku ze vzdálenosti $h = 30 \cdot 10^{-2} \text{ m}$	43
Obr. 7.7:	I - U a P – U charakteristiky fotovoltaického článku bez zastínění a při zastínění 6ti článků ze vzdálenosti $h = 30 \cdot 10^{-2} \text{ m}$	44
Obr. 7.8:	I-U a P-U charakteristiky fotovoltaického článku bez zastínění a při zastínění 1 článku ze vzdálenosti $h = 15 \cdot 10^{-2} \text{ m}$	45
Obr. 7.9:	I – U a P - U charakteristiky fotovoltaického článku bez zastínění a při 6ti článků ze vzdálenosti $h = 15 \cdot 10^{-2} \text{ m}$	46
Obr. 8.1:	Simulační prostředí – nasimulování ozáření všech článků v panelu	49
Obr. 8.2:	Simulační prostředí – nasimulování zastínění 4 článků v panelu 50% intenzitou světla ($E = 400 \text{ W/m}^2$)	50
Obr. 8.4:	I-U a P-U charakteristiky 24 článkového panelu. Charakteristika bez zastínění a výsledná charakteristika se 4 zastíněnými články na 50%	52
Obr. 8.5:	I-U a P-U charakteristiky reálného a nasimulovaného fotovoltaického panelu při $E = 199 \text{ W/m}^2$, $h = 30 \cdot 10^{-2} \text{ m}$	55
Obr. 8.6:	Nasimulované I-U a P-U charakteristiky fotovoltaického panelu bez zastínění a při zastínění 1 článku ze vzdálenosti $h = 30 \cdot 10^{-2} \text{ m}$	56
Obr. 8.7:	Nasimulované I-U a P-U charakteristiky fotovoltaického panelu bez zastínění a při zastínění 6ti článků ze vzdálenosti $h = 30 \cdot 10^{-2} \text{ m}$	57

SEZNAM TABULEK

Tab. 5.1:	Parametry pro různé dvou – diodové fotovoltaické moduly [5]	24
Tab. 5.2:	Elektrické parametry fotovoltaických článků [5]	29
Tab. 5.3:	Parametry pro teplotní závislost různých fotovoltaických modulů [5].....	30
Tab. 7.1:	Hodnoty proudu, napětí a výkonu u reálného fotovoltaického panelu	46
Tab. 8.1:	Parametry pro nastavení simulačního programu	52
Tab. 8.2:	Vybrané naměřené hodnoty reálného fotovoltaického článku	53
Tab. 8.3:	Vybrané naměřené hodnoty reálného fotovoltaického článku	55
Tab. 8.4:	Nasimulované hodnoty proudu, napětí a výkonu	57