

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Aplikace fotovoltaických systémů

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Radek MIKULENKA**
Osobní číslo: **E12B0075K**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Aplikace fotovoltaických systémů**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Popište technické vlastnosti solárního záření a možnosti jeho využití.
2. Vysvětlete činnost fotovoltaických článků.
3. Zhodnoťte provozní vlastnosti fotovoltaických panelů a jednotlivé nepříznivé vlivy na jejich činnost.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:


1. Poulek, Libra: Solární energie.

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

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2014**
Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2015**


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce se zabývá aplikacemi fotovoltaických systémů. Popisuje technické vlastnosti solárních zařízení a jejich využití, vysvětluje jejich činnost a hodnotí provozní vlastnosti fotovoltaických panelů, včetně nepříznivých vlivů na jejich činnost.

Klíčová slova

Solární energie, solární článek, fotovoltaické panely, fotovoltaický jev

Abstract

This bachelor thesis is focused on the application of photovoltaic systems and the solution of this issue. In the thesis all technical properties of the solar equipment are described, and their use and operation are explained. Subsequently, the thesis is concentrated on the assessment of operating properties of photovoltaic solar panels and adverse effects on their operation.

Key words

Solar energy, solar cell, photovoltaic panels, photovoltaic phenomenon

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 8.6.2015

Radek Mikulěnka

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Milanu Bělíkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD.....	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	11
1 VLASTNOSTI SOLÁRNÍHO ZÁŘENÍ	13
1.1 SLUNCE	13
1.2 SLUNEČNÍ (SOLÁRNÍ) KONSTANTA	13
1.2.1 <i>Proměnlivost solární konstanty</i>	14
1.3 INTENZITA SLUNEČNÍHO ZÁŘENÍ	14
1.4 PŘÍMÉ SLUNEČNÍ ZÁŘENÍ	15
1.5 DIFÚZNÍ SLUNEČNÍ ZÁŘENÍ	16
1.6 CELKOVÉ SLUNEČNÍ ZÁŘENÍ	16
2 FOTOVOLTAICKÉ ČLÁNKY	17
2.1 PRINCIP ČINNOSTI FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ	17
2.2 DRUHY FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ	20
2.2.1 <i>Vývoj fotovoltaických článků</i>	20
2.2.2 <i>Provedení fotovoltaických článků</i>	21
3 VLASTNOSTI SOLÁRNÍCH ZAŘÍZENÍ.....	23
3.1 AUTONOMNÍ SYSTÉMY („GRID-OFF“)	23
3.2 SYSTÉMY S PŘIHOJENÍM K ROZVODNÉ SÍTI („GRID-ON“)	24
3.3 PRVKY FOTOVOLTAICKÝCH ELEKTRÁREN	24
3.3.1 <i>Fotovoltaický panel</i>	24
3.3.2 <i>Měnič</i>	27
3.3.3 <i>Nosné prvky</i>	28
4 PROVOZNÍ VLASTNOSTI FOTOVOLTAICKÝCH PANELŮ A JEDNOTLIVÉ NEPŘÍZNIVÉ VLIVY NA JEJICH ČINNOST	30
4.1 PROVOZNÍ VLASTNOSTI	30
4.2 NEPŘÍZNIVÉ VLIVY NA VLASTNOSTI FOTOVOLTAICKÝCH PANELŮ.....	31
4.2.1 <i>Vliv oteplení fotovoltaického panelu</i>	31
4.2.2 <i>Vliv intenzity slunečního záření</i>	32
4.2.3 <i>Vliv znečištění</i>	32
4.3 TESTOVÁNÍ FOTOVOLTAICKÝCH PANELŮ	33
ZÁVĚR	35
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	36

Úvod

Na Zemi je dodáváno velké množství energie od Slunce, které není dostatečně využíváno, a elektřina i teplo jsou vyráběny z jiných zdrojů. Vzhledem k tomu, že ceny tradičních zdrojů energie neustále rostou, je kladen důraz na využití obnovitelných zdrojů, které lze využívat v uvozovkách zdarma. Cena energie je dnes vesměs na velmi nízké úrovni. Zásoby tradičních zdrojů energie jsou omezené a odhaduje se, že budou stačit přinejmenším na dalších 400 let za předpokladu, že spotřeba bude pokračovat v současném trendu [1]. Slunce můžeme považovat za nevyčerpatelný zdroj energie a jeho využívání je šetrné k životnímu prostředí. Tuto energii lze tedy využívat jako obnovitelný zdroj i pro výrobu elektrické energie ve fotovoltaických systémech.

Velkou předností fotovoltaiky je univerzálnost použití. Fotovoltaické systémy lze používat v široké řadě výkonů, od zlomků wattu až po megawattové elektrárny, prakticky na jakémkoliv místě na povrchu Země i ve vesmíru, a to v celé řadě domácích, průmyslových a komunálních aplikací. Přitom jsou tyto systémy používány i v klimaticky velmi obtížných oblastech, jako jsou rovníkové a tropické klima, vysoké hory, osady u polárního kruhu, přímořské oblasti nebo objekty přímo na moři (lodě, majáky, ropné plošiny) [1].

Vývoj fotovoltaiky lze datovat už roku 1839, kdy francouzský experimentální fyzik Alexandre Edmund Becquerel (při pokusech se dvěma kovovými elektrodami umístěnými v elektroodivém roztoku) zjistil, že při osvětlení zařízení vzrostlo na elektrodách napětí. V roce 1877 byl objeven fotovoltaický efekt na selenu (W. G. Adams a R. E. Day) a byl vyroben první fotovoltaický článek [2]. Ve vyspělých zemích světa dochází dnes k poměrně intenzivní podpoře rozvoje fotovoltaiky a dalších obnovitelných zdrojů energie. Jedná se totiž o strategický prostředek pro zajištění kontinuity energetických zdrojů (uvažuje se v časovém horizontu do roku 2050) [3].

Předkládaná práce je zaměřena na aplikaci fotovoltaických systémů. Text je rozdělen do tří částí; první se zabývá vysvětlením činnosti fotovoltaických článků, v druhé části jsou uvedeny technické vlastnosti solárních zařízení a možnosti jejich využití. Třetí část

popisuje zhodnocení provozních vlastností fotovoltaických panelů a jednotlivé nepříznivé vlivy na jejich činnost.

Seznam symbolů a zkratk

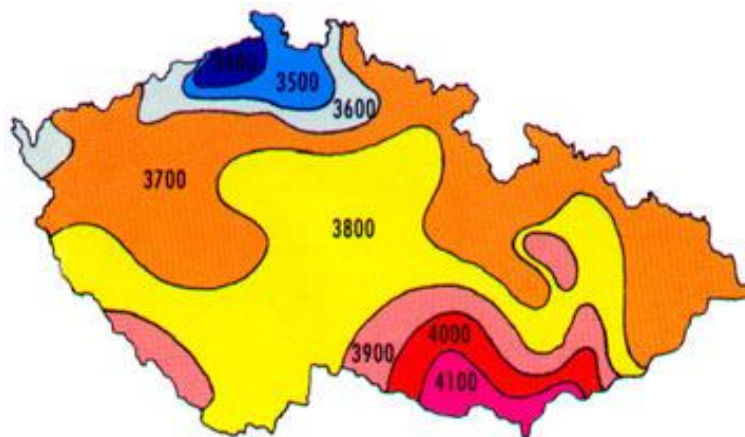
FV	Fotovoltaický
OPN	Oblast prostorového náboje
J_{PV}	Hustota proudu tvořenými nosiči zachycenými v oblasti prostorového náboje $[A \cdot m^{-2}]$
J_{PVN}	Hustota generovaného proudu v oblasti typu N $[A \cdot m^{-2}]$
J_{PVP}	Hustota generovaného proudu v oblasti typu P $[A \cdot m^{-2}]$
J_{OPN}	Hustota generovaného proudu v oblasti prostorového náboje
NSi	Polovodičový křemík typu N
PSi	Polovodičový křemík typu P
E_C	Energie vodivostního pásu $[eV]$
E_V	Energie valenčního pásu $[eV]$
R_p	Svodový odpor $[\Omega]$
R_s	Sériový odpor $[\Omega]$
U_{0C}	Napětí naprázdno fotovoltaického článku $[V]$
U_{mp}	Napětí v bodě maximálního výkonu $[V]$
I_{SC}	Proud nakrátko $[A]$
I_{mp}	Proud v bodě maximálního výkonu $[A]$
P_m	Bod maximálního výkonu fotovoltaického článku $[W]$
FF	Činitel plnění $[\%]$
R	Odrazivost $[-]$
η	Účinnost $[-]$, popř. $[\%]$
I_0	Solární konstanta $[W \cdot m^{-2}]$
I_{0ef}	Efektivní hodnota solární konstanty $[W \cdot m^{-2}]$
I_{M0}	Intenzita světla vstupující do objemu materiálu $[W \cdot m^{-2}]$
I_{IN}	Intenzita světla dopadající na povrch materiálu $[W \cdot m^{-2}]$
I_N	Intenzita záření na ploch kolmou ke slunečním paprskům při daném znečištění ovzduší $[W \cdot m^{-2}]$

I_{ε}	Intenzita záření na ploch kolmou ke slunečním paprskům při dokonale čistém ovzduší $[W \cdot m^{-2}]$
I_c	Celková intenzita záření $[W \cdot m^{-2}]$
I_p	Intenzita přímého slunečního záření $[W \cdot m^{-2}]$
I_D	Intenzita difuzního slunečního záření $[W \cdot m^{-2}]$
I_{ph}	Intenzita přímého záření dopadajícího na vodorovnou plochu $[W \cdot m^{-2}]$
I_{ph}	Intenzita difuzního záření dopadajícího na vodorovnou plochu $[W \cdot m^{-2}]$
A	Součinitel, který závisí na výšce Slunce nad obzorem $[-]$
Z	Míra znečištění atmosféry $[-]$
α	Absorpční koeficient $[\%]$
λ	Vlnová délka $[m]$

1 Vlastnosti solárního záření

1.1 Slunce

Slunce, je hlavní zdroj solárního záření dopadajícího na povrch Země. Průměr Slunce je 1 400 000 km a hmotnost $2 \cdot 10^{30}$ kg. Hmotnost Slunce je převážně tvořena z atomárního vodíku (celková zásoba vodíku ve Slunci je $1,2 \cdot 10^{57}$ atomů) s nepatrnou příměsí helia a stopovým množstvím prvků z Mendělejevovy periodické soustavy. Veškeré tyto prvky jsou ve hmotě Slunce obsaženy jako žhavé elektricky vodivé plyny, tj. ve skupenství plazmy. Zdrojem energie Slunce je transformace vodíku v hélium termonukleárními reakcemi probíhajícími ve středových oblastech Slunce. Téměř veškerá sluneční energie ve formě světla je vyzařována z cca 250 km tenké povrchové vrstvy Slunce, nazývané fotosféra. Tyto paprsky vyzařované do kosmického prostoru mají vlnovou délku 10^{-10} m (rentgenové a ultrafialové záření) až po 10^3 m (radiové záření). Pro přenos tepelné energie jsou rozhodující paprsky o vlnových délkách $0,2 \cdot 10^{-6}$ m až $3 \cdot 10^{-6}$ m (světelné a infračervené záření). Slunce takto vyzáří do prostoru kosmu celkový tok energie o hodnotě $3,8 \cdot 10^{26}$ W. Intenzita záření dosahuje na povrchu Slunce $6 \cdot 10^7$ Wm⁻². Veškerá tato vyzářená energie je vyzářena do kosmického prostoru. Na povrch Země dopadne jen nepatrná část této vyzářené energie $1,8 \cdot 10^{14}$ kW, což je jedna dvoumiliardtina [13]. Na následujícím obrázku je ukázáno rozložení slunečního záření v České republice.



Obr. 1.1 Průměrné Globální sluneční záření na území ČR (MJ/m² za rok) [1]

1.2 Sluneční (solární) konstanta

Sluneční záření průchodem kosmického prostoru není ničím pohlcováno, a tudíž dopadá na povrch Země v původní podobě, avšak o značně snížené intenzitě na plochu,

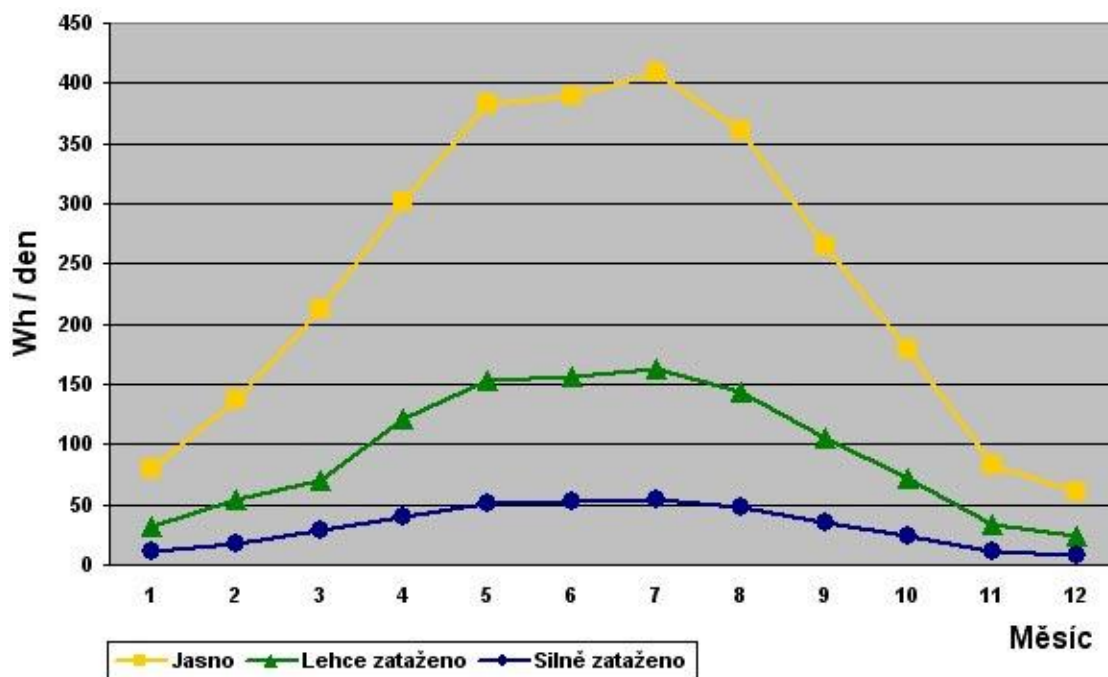
způsobené rozptýlením díky vzdálenosti Slunce od Země. Měrnému toku energie dopadajícímu na plochu kolmou k slunečním paprskům říkáme sluneční konstanta I_0 . Hodnota sluneční konstanty na povrchu Země (hranici atmosféry) je $1\,340\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ až $1\,390\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Průměrná hodnota je uváděna $1\,360\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. [13]

1.2.1 Proměnlivost solární konstanty

Solární konstanta je sice brána jako konstanta, ale její hodnota se mění v průběhu roku s eliptickou dráhou Slunce. Efektivní hodnota solární konstanty pro určitý den v roce je dána vztahem

$$I_{0ef} = I_0 \cdot \left[1 + 0,003 \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{365,25}\right) \right] \quad (1.1)$$

n...den podle juliánského kalendáře – pořadový den v roce, pro 1. únor $n = 32$



Obr. 1.2 Průměrné hodnoty získané za den z $1\text{m}^2 = 106\text{ W}$ [1]

1.3 Intenzita slunečního záření

Intenzita slunečního záření se snižuje průchodem atmosférou, jednak zde dochází k odrazu paprsků od částecek prachů obsažených ve vzduchu a molekul plynů, ale i

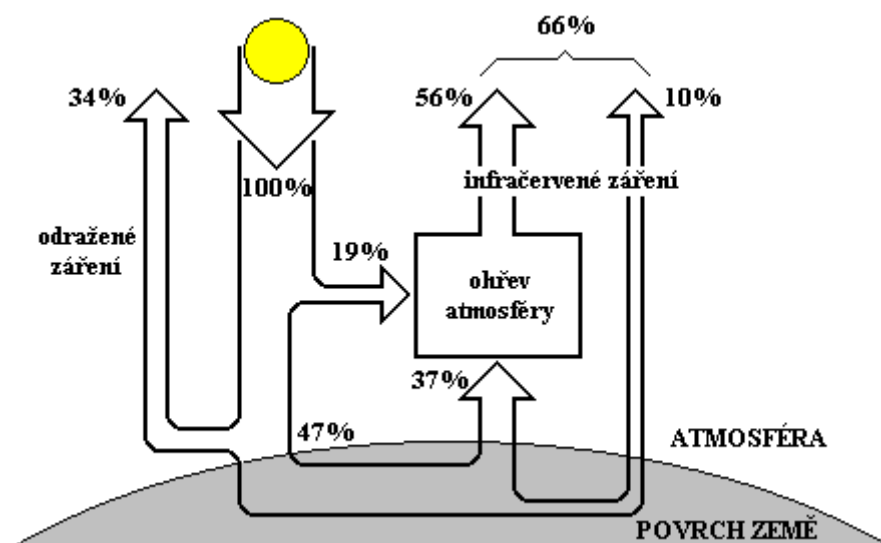
k absorpci záření víceatomárními plyny (vodní páry H₂O, CO₂, O₃) vyskytujícími se ve vzduchu. Energetická bilance Země je znázorněná na *Obr. 1.3*. Pro stanovení míry znečištění (zakalení) atmosféry Z , je dán Linkeho vztah, který závisí na množství příměsí a nadmořské výšce. [13]

$$Z = \frac{\ln I_0 - \ln I_n}{\ln I_0 - \ln I_\varepsilon} \quad (1.2)$$

kde I_0 ...je sluneční konstanta

I_n ...intenzita záření na plochu kolmou ke slunečním paprskům při daném znečištění ovzduší

I_ε ...intenzita záření na plochu kolmou ke slunečním paprskům při dokonale čistém ovzduší



Obr. 1.3 Přeměny energie slunečního záření dopadajícího na Zemi [14]

1.4 Přímé sluneční záření

Snížení intenzity přímého slunečního záření I_{Pn} průchodem paprsků atmosférou, závisí na součiniteli znečištění Z a tloušťce vrstvy atmosféry, kterou musí paprsky pronikat. Intenzita přímého záření je dána vztahem

$$I_{Pn} = I_0 \cdot A^{-Z} \quad (1.3)$$

kde I_0 je sluneční konstanta (střední hodnota sluneční konstanty 1360 [Wm⁻²])

A...součinitel, který závisí na výšce Slunce nad obzorem

Z...součinitel znečištění atmosféry

1.5 Difúzní sluneční záření

Záření, které se v atmosféře rozptýlilo odrazem o částičky prachů, molekuly plynů a mraky, proniká k povrchu Země jako difúzní záření. Vlnová délka paprsků se při tomto rozptylu nemění, takže u tohoto typu záření je srovnatelná s přímým zářením. Intenzita difúzního záření je dána vztahem

$$I_D = \frac{1 - \cos \alpha}{2} \cdot I_{Dk} + \frac{1 + \cos \alpha}{2} \cdot r \cdot (I_{Ph} - I_{Dh}) \quad (1.4)$$

kde r je reflexní schopnost okolních ploch pro sluneční paprsky, tzv. albedo ($r = 0,15 \div 0,25$)

I_{Ph} ...intenzita přímého slunečního záření na vodorovnou plochu

I_{Dh} ... intenzita difúzního slunečního záření na vodorovnou plochu

1.6 Celkové sluneční záření

Celkové sluneční záření I_c se skládá z přímého slunečního záření I_P a z difúzního záření I_D

$$I_c = I_P + I_D \quad (1.5)$$

2 Fotovoltaické články

2.1 Princip činnosti fotovoltaických článků

Při dopadu světla na povrch materiálu dochází k částečnému odrazu světla a část vstoupí do objemu materiálu. Pro intenzitu světla, které vstoupí do objemu materiálu, můžeme psát [11]

$$I_{0M} = I_{IN} \cdot (1 - R) \quad (2.1)$$

kde I_{0M} ... intenzita světla vstupující do objemu materiálu

I_{IN} ... intenzita světla dopadajícího na povrch materiálu

R ... odrazivost.

Při průchodu světla materiálem klesá jeho intenzita se vzdáleností od povrchu podle vztahu [1.1]

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\alpha x} \quad (2.2)$$

kde α ... absorpční koeficient závisející na vlnové délce λ

x ... vzdálenost od povrchu.

Základním principem fotovoltaického článku je fotoelektrický jev, při němž jsou elektrony uvolňovány z látky v důsledku absorpce elektromagnetického záření látkou [4]. Absorpce je způsobena interakcí světla (fotony) s částicemi hmoty (elektrony a jádry) a mohou nastat tyto případy:

- *interakce částice s mřížkou - využití nízkoenergetických fotonů*
- *interakce s volnými elektrony - dochází pouze ke zvýšení teploty (fototermální systémy)*

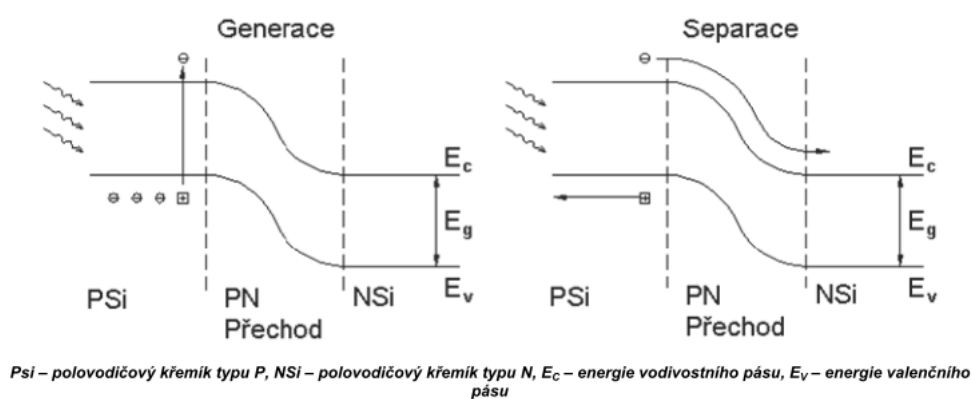
- *interakce s vázanými elektrony - vznikají volné nosiče náboje*
- *může dojít k uvolnění elektronu z vazby*

Funkce fotovoltaického článku je založena na vzniku páru elektron – díra, který je uvolněn fotonem ze slunečního záření. V kovech ovšem dojde k jejich okamžité rekombinaci, které je potřeba zabránit a vzniklý náboj odvést z článku. Pro tento účel se využívá polovodičů, ve kterých jsou elektrony a díry separovány vnitřním elektrickým polem PN přechodu.

Aby mohla fotovoltaická přeměna probíhat, musí být splněny následující podmínky [4]:

- *foton musí být pohlcen,*
- *foton musí excitovat elektron do vyššího vodivostního pásu,*
- *vzniklá dvojice elektron (-) – díra (+) musí být separována, aby se znovu nespojila,*
- *oddělené náboje jsou následně odvedeny ke spotřebiči.*

Obr. 2.1 ukazuje princip přeměny sluneční energie na elektrickou v PN přechodu.



Obr. 2.1 Princip přeměny sluneční energie na elektrickou v PN přechodu [4]

V oblasti PN přechodu, která je osvětlena, jsou generovány nosiče elektrického náboje a ty následně difundují směrem k PN přechodu. Pro hustotu proudu J_{PV} tvořenými nosiči zachycenými v oblasti prostorového náboje platí

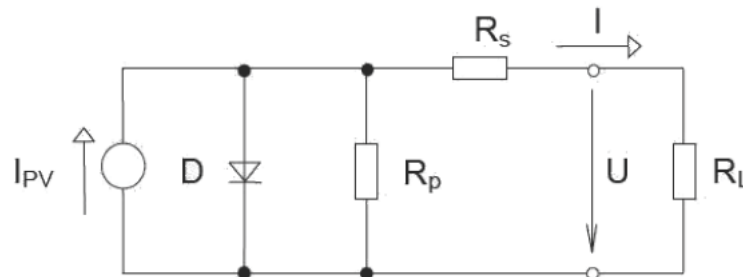
$$J_{PV} = J_{PVN}(\lambda) + J_{PVP}(\lambda) + J_{OPN}(\lambda) \quad (2.3)$$

kde J_{PVN} ... hustota generovaného proudu v oblasti typu N

J_{PVP} ... hustota generovaného proudu v oblasti typu P

J_{OPN} ... hustota generovaného proudu v oblasti prostorového náboje (OPN).

Fotovoltaický článek je možno modelovat pomocí náhradního obvodu, znázorněného na Obr. 2.2. Ozářená oblast přechodu PN generuje proud o hustotě J_{PV} , přičemž se oblast typu P nabíjí kladně a oblast typu N záporně. Tím je přechod propustně polarizován a část generovaného proudu teče zpět diodou D. Technologické nedokonalosti (mikrosvody) přechodu PN jsou modelovány svodovým odporem R_p , vliv odporu materiálu a proudových sběrnic je modelován sériovým odporem R_s . Výstupní napětí U fotovoltaického článku je nižší o úbytek napětí na sériovém odporu, než napětí na diodě [4].



Obr. 2.2 Náhradní schéma fotovoltaického článku[4]

Pro výstupní proud fotovoltaického článku můžeme psát [4]

$$I = \underbrace{A_{ill} \cdot J_{PV}}_I - \underbrace{I_{01} \left[\exp\left(e \cdot \frac{U + R_s I}{kT} \right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp\left(e \cdot \frac{U + R_s I}{2kT} \right) - 1 \right]}_{II} - \underbrace{\frac{U + R_s I}{R_p}}_{III} \quad (2.4)$$

Jednotlivé části rovnice označené jako I, II a III představují generovaný proud (I), proud diodou (II) a svodový proud (III). Z uvedené rovnice (2) je patrný značný vliv sériového odporu R_s na voltampérovou charakteristiku fotovoltaického článku *Obr. 4.1*. Sériový odpor snižuje výstupní proud a tím i celkovou účinnost článku [4].

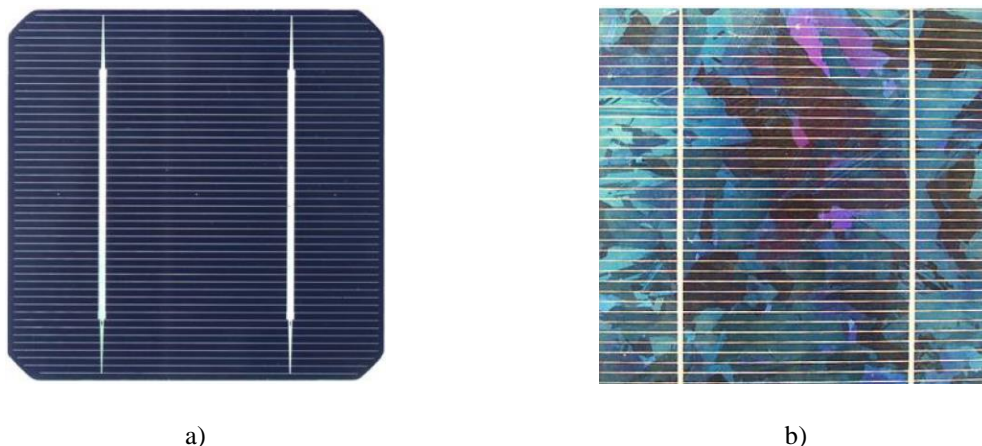
2.2 Druhy fotovoltaických článků

2.2.1 Vývoj fotovoltaických článků

Fotovoltaické články můžeme rozdělit z hlediska vývoje na jednotlivé generace [4].

- **Fotovoltaické články 1. generace**

Tyto články jsou nejčastěji vyráběny z monokrystalického a polykrystalického křemíku. Jsou charakterizovány dobrou životností při zachování účinnosti, která se pohybuje od 14 % do 17 %. V laboratorních podmínkách může účinnost dosahovat až 25 %. Velkou nevýhodou těchto článků je použití velmi čistého křemíku. Jsou využívány od sedmdesátých let do současnosti. Následující obrázek porovnává monokrystalický článek s polykrystalickým.



Obr. 2.3 Porovnání vzhledu a) monokrystalického, b) polykrystalického Si článku [11]

- **Fotovoltaické články 2. generace**

Čistý křemík je u těchto článků nahrazen amorfním křemíkem, popř. jinými materiály. Vrstva je až tisíckrát tenčí. Nevýhodou je snížení účinnosti panelu (okolo 10 %). Naopak je ovšem snížena cena solárního panelu a zlepšeny jsou jeho mechanické vlastnosti, zejména pružnost.

- **Fotovoltaické články 3. Generace**

U článků této generace je snaha o co největší využití energie dopadajících fotonů slunečního záření. Toho je dosahováno využitím vícenásobných přechodů tenkých vrstev. Rovněž je vedena snaha o jinou metodu oddělení nábojů než PN přechody použitím fotoelektrochemických článků nebo nanostruktur ve formě uhlíkových tyček a trubiček nebo kvantových teček nanesených na vhodné podložky.

- **Fotovoltaické články 4. Generace**

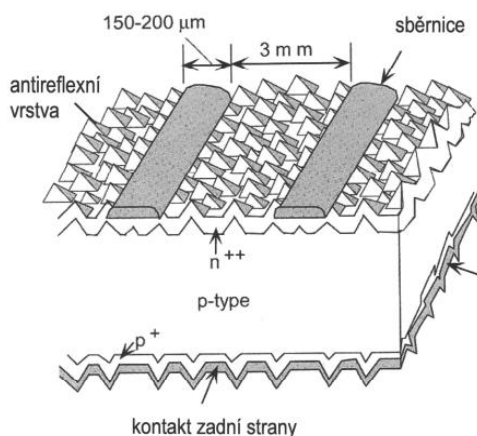
Jedná se o články využívající vícevrstvé profily pro co největší využití slunečního spektra. Jednotlivé vrstvené profily jsou laděny na různé vlnové délky. Pokud záření určité vlnové délky dopadá na vrstvu, která ho nedokáže využít, projde touto vrstvou na další vrstvu, jejíž vlnová délka odpovídá vhodnému využití.

2.2.2 Provedení fotovoltaických článků

Provedení fotovoltaických článků lze rozdělit podle provedení na objemové a tenkovrstvé.

- **Objemové fotovoltaické články**

Fotovoltaický článek je tvořen objemovým materiálem s PN přechodem a je opatřen kontakty. Na následujícím obrázku je příklad objemového fotovoltaického článku.



Obr. 2.4 Struktura objemového fotovoltaického článku [4]

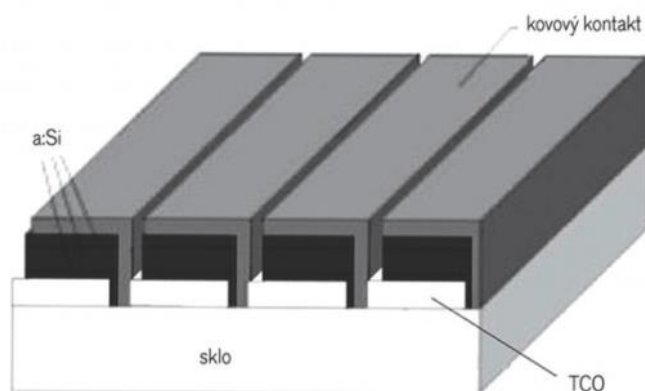
Nejvíce využívaným materiálem je křemík (Si) ve formách monokrystalických, polykrystalických a amorfních. Mezi další používané materiály patří galium arsenid (GaAs), telurid kademnatý (CdTe) a CuInSe₂. Následující tabulka uvádí porovnání účinností jednotlivých materiálů ve fotovoltaických článcích.

Tab. 2.1 Porovnání účinností jednotlivých materiálů ve fotovoltaických článcích

Použitý materiál	Typická efektivita za běžných podmínek (%)	Laboratorní efektivita (%)
Monokrystalický Si	12 - 16	25
Polykrystalický Si	11 - 14	20
Amorfní Si	5 - 7	13
CdTe	10	16
GaAs	-	28
CuInSe ₂	-	17,7

- **Tenkvrstvé fotovoltaické články**

U této technologie jsou jednotlivé vrstvy fotovoltaického článku nanášeny na nosný materiál (sklo, fólie atd.). Použitím fólií dosahujeme ohebnosti fotovoltaického článku. Na následujícím obrázku je příklad tenkvrstvých fotovoltaických článků v modulu.



Obr. 2.5 Příklad tenkvrstvých fotovoltaických článků v modulu [4]

3 Vlastnosti solárních zařízení

Vlastnosti solárních zařízení záleží na způsobu jejich využití, resp. na jejich uspořádání, podle kterého je můžeme rozdělit na následující:

- *Autonomní systémy („Grid-off“)*
- *Systémy s připojením k distribuční síti („Grid-on“)*

3.1 Autonomní systémy („Grid-off“)

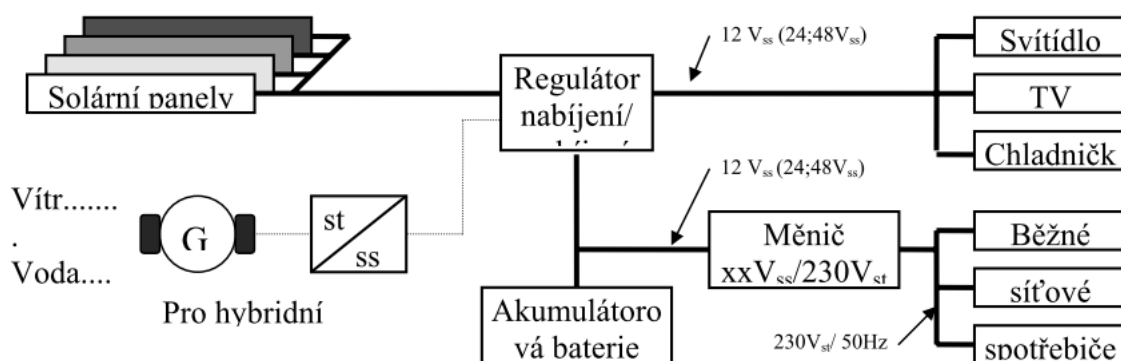
Tyto systémy se budují v místech, kde není vhodné zavádět elektrické přípojky (přípojně místo ve vzdálenosti od 1 km). Výkony těchto systémů se pohybují od 10 W do 10 kW. Grid-off systémy můžeme rozdělit na:

- *Systémy s přímým napájením – přímé propojení spotřebiče s fotovoltaickým panelem*
- *Systémy s akumulací elektrické energie – energie akumulována pro pozdější využití*
- *Hybridní systémy – doplněné o další zdroje elektrické energie (dieselagregáty, větrné, vodní atd.)*

Na následujících obrázcích jsou ukázány schematicky tyto systémy.



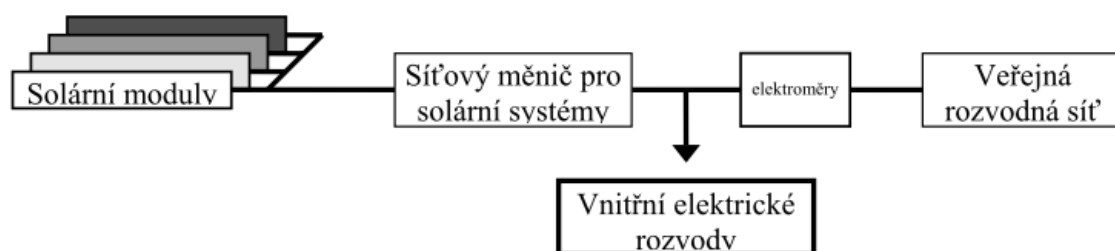
Obr. 3.1: Systém s přímým napájením [1]



Obr. 3.2: Hybridní systém [1]

3.2 Systémy s připojením k rozvodné síti („Grid-on“)

Tyto systémy kombinují fotovoltaický systém s distribuční sítí, přičemž je možné vyrobenou elektřinu z fotovoltaického systému dodávat do distribuční sítě. Připojení k síti podléhá schvalovacímu řízení provozovatele distribuční sítě.



Obr. 3.3: Systém s připojením k rozvodné síti [1]

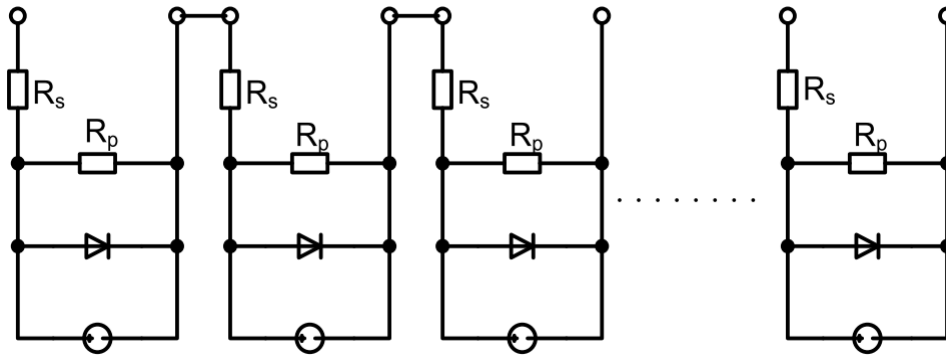
3.3 Prvky fotovoltaických elektráren

Základními prvky používanými ve fotovoltaických systémech jsou:

- *Fotovoltaický panel*
- *Měnič*
- *Nosné prvky*
- *Předávací místo do distribuční soustavy*
- *Akumulátor*

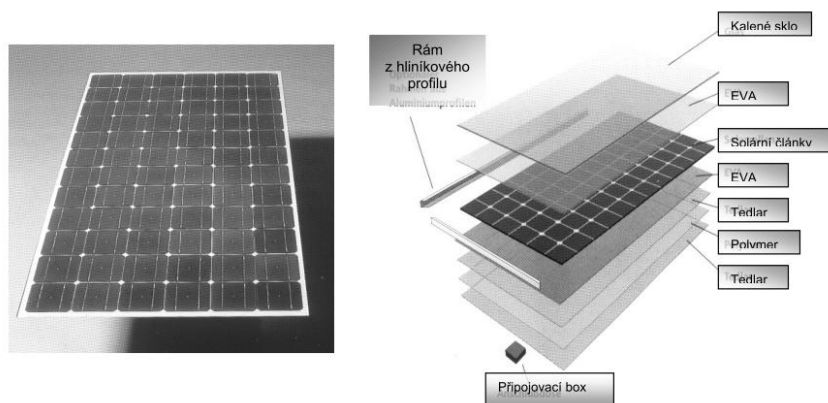
3.3.1 Fotovoltaický panel

Fotovoltaický panel je tvořen z jednotlivých fotovoltaických článků či dalších panelů. Tyto články či panely jsou vzájemně propojeny tak, aby bylo dosaženo požadovaných výstupních parametrů proudu a napětí. Fotovoltaický panel vzniká sériovým, paralelním, popřípadě kombinovaným zapojením fotovoltaických článků (Obr. 3.4). Důvodem zapojování článků do modulu je snadnější manipulace a instalace. Důležitou vlastností modulu je ochrana článku před nepříznivými klimatickými vlivy (hermetické zapouzdření), jejich dostatečná mechanická pevnost a odolnost.



Obr. 3.4: Sériové spojení článků – náhradní schéma [1]

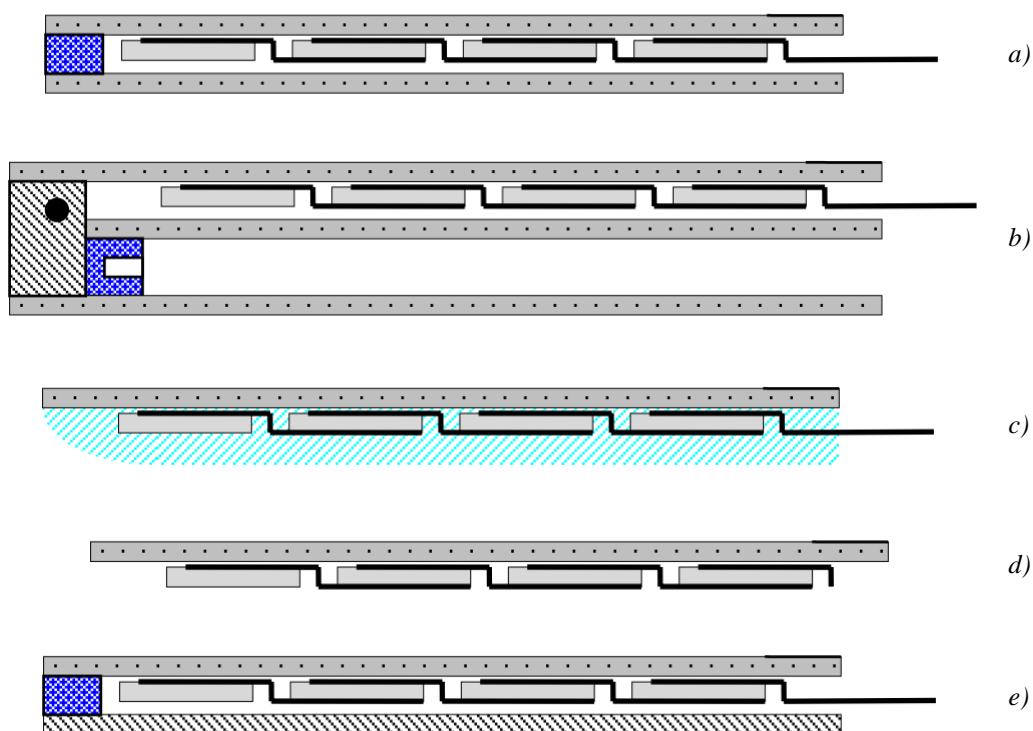
Moduly jsou vystaveny mnohdy drsným klimatickým podmínkám. V zimních měsících může docházet k rychlým a velikým teplotním změnám, což zvyšuje riziko narušení vodivých spojů na solárních článcích. Proto jsou moduly opatřeny kovovými nebo plastovými rámy pro zpevnění konstrukce fotovoltaického modulu. Přední krycí materiál musí odolávat silnému krupobití. Je-li použito sklo, musí být kalené [1]. Následující obrázek ukazuje příklad solárního modulu s hliníkovým rámem.



Obr. 3.5: Příklad solárního panelu s hliníkovým rámem [1]

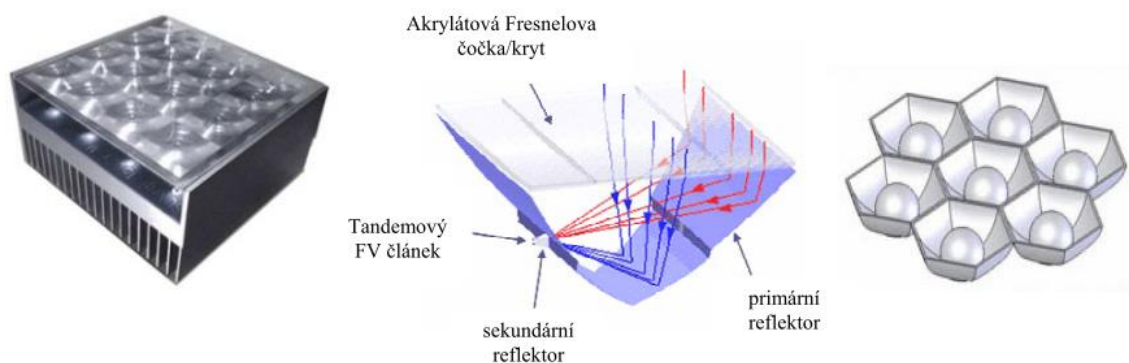
Cenu fotovoltaického systému může významně ovlivnit i druh zvoleného fotovoltaického panelu. Důležitou vlastností je i vzhled panelů.

Spojené fotovoltaické články jsou vloženy mezi skla a následně je provedeno jejich utěsnění. Rovněž se používají i konstrukce s předním sklem a nalaminovanou fólií, případně zalitím do průhledné hmoty ze strany zadní. Zadní strana panelu může být též tvořena plechovou či eternitovou nosnou deskou [1]. Na následujícím obrázku jsou ukázány základní druhy fotovoltaických panelů.



Obr. 3.6: Základní druhy solárních panelů: a) s oboustranným zasklením, b) v izolačním dvojskle, c) se zadní stranou zalitou pryskyřicí, d) se zadní stranou laminovanou folií, e) se zadní stranou z netransparentního materiálu (plech, eternit) [1]

Dalším typem fotovoltaických modulů jsou koncentrátorové, které využívají k soustředování slunečního záření na solární články čočky nebo zrcadlové plochy. Fresnelovy lineární čočky nebo bodové čočky umožňující koncentraci 10x až 500x jsou zpravidla zhotoveny z levného plastu. Pro koncentrátorové moduly se nejvíce používají křemíkové solární články s malou plochou [1]. Následující obrázek ukazuje příklady koncentrátorových modulů.



Obr. 3.7 Příklady koncentrátorových modulů [10]

3.3.2 Měnič

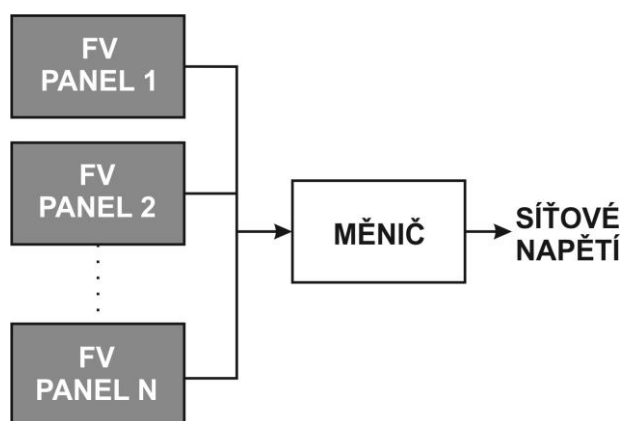
Měnič slouží k přeměně stejnosměrné elektrické energie fotovoltaického panelu na střídavou s požadovanými parametry. V případě, že jsou fotovoltaické panely zapojeny přímo na vstup měniče, bývá tento doplněn o obvody sledování maximálního výkonu panelu, tak aby dodávaly maximální výkon a bylo dosaženo co největší účinnosti.

Pokud systém pracuje paralelně se sítí, musí být doplněn prvky pro zajištění bezpečnosti provozu:

- *Sledování napětí sítě*
- *Sledování frekvence sítě*
- *Sledování impedance sítě*
- *Možnost vypnutí dodávky energie v případě poruchy*
- *Bezpečné odpojování*
- *Případné galvanické oddělení*

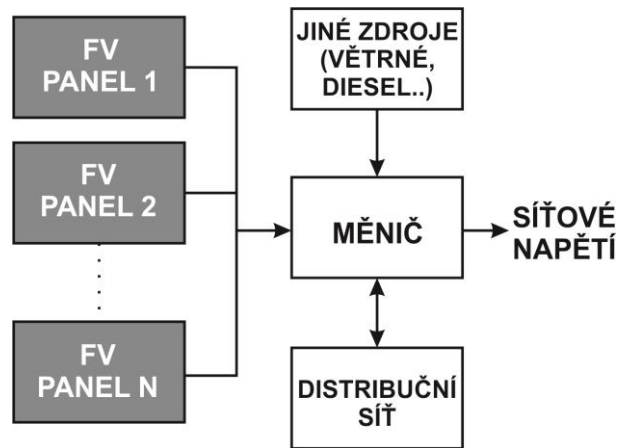
Měniče jsou konstruovány s jednofázovým nebo třífázovým výstupem. Dále se měniče dělí dle způsobu využití solárního systému:

- *Měniče síťové* – mění stejnosměrné napětí dodávané fotovoltaickým panelem na střídavé síťové napětí.



Obr. 3.8: Schéma se síťovým měničem

- *Měniče hybridní* – kromě přeměny napětí z fotovoltaického panelu umožňují v kombinaci s dalšími zdroji energie (větrné, dieselagregáty, vodní atd.) připojení na distribuční soustavu.



Obr. 3.9: Systém s připojením k rozvodné síti

3.3.3 Nosné prvky

Nosné prvky slouží k instalaci panelů, které mají důležitý vliv na provoz fotovoltaické elektrárny i její účinnost (možnost polohování, sklon panelů). Nosné prvky můžeme rozdělit dle následujícího

- *Stacionární*
- *Polohovatelné*
 - *Jednoosé*
 - *Dvouosé*

Stacionární nosné prvky

Výhodou těchto nosných prvků je jednoduchá konstrukce a montáž nevyžadující téměř žádnou údržbu. Jsou využívány na střechách a konstrukcích budov (stěny), volných prostranstvích (pole, louky). Sklon je nastaven fixně, v našich zeměpisných šířkách bývá 36°, z důvodu dosažení nejefektivnějšího využití slunečního záření. Na následujících obrázcích jsou ukázány příklady instalací.



a)

b)

Obr. 3.10 Příklad instalace stacionárních nosných prvků na a) volných prostranstvích, b) střechách budov [6, 7]

Polohovatelné nosné prvky

Pomocí těchto nosných konstrukcí lze zvýšit účinnost solárních elektráren. Nevýhodou bývají vyšší pořizovací náklady a nutnost údržby těchto nosných systémů. U jednoosých nosných prvků je polohování prováděno pouze ve vertikální ose, čímž je dosaženo sledování pohybu Slunce. Sklon solárních panelů je dán fixně (obvykle 36°). Tímto způsobem lze dosáhnout zvýšení účinnosti o 5 – 10 %. Obr. 3.11 a) ukazuje příklad takového systému, kde je využito zrcadel pro další zvýšení účinnosti.

U dvouosých polohovacích systémů je zvýšení účinnosti využití sluneční energie dosaženo polohováním jak ve vertikální ose, tak i v ose horizontální (ovlivňování azimutu i elevace současně). U těchto systémů lze dosáhnout zvýšení účinnosti až o 30 %. Obr. 3.11 b) ukazuje příklad takového nosného prvku.



a)

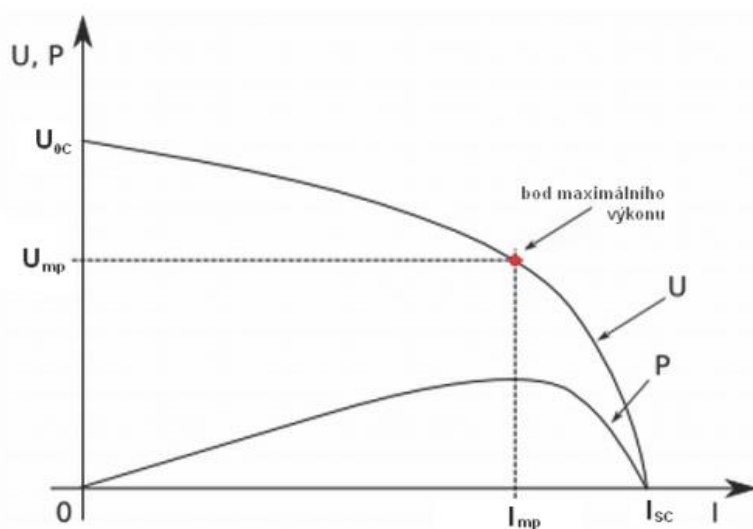
b)

Obr. 3.11 Příklad instalace polohovatelných nosných prvků a) jednoosých, b) víceosých [8, 9]

4 Provozní vlastnosti fotovoltaických panelů a jednotlivé nepříznivé vlivy na jejich činnost

4.1 Provozní vlastnosti

Mezi nejdůležitější provozní vlastnosti solárního panelu patří zatěžovací charakteristika (Obr. 4.1). Jedná se o závislost výstupního napětí solárního panelu na zatěžovacím proudu. Z této charakteristiky se určují důležité provozní vlastnosti solárních panelů. Dále je uveden přehled těchto vlastností.



Obr. 4.1: Zatěžovací charakteristika solárního panelu [4]

- **Napětí naprázdno U_{oc}**

Tento parametr představuje maximální napětí článku, pokud na jeho výstupní svorky není připojena žádná zátěž.

- **Proud nakrátko I_{sc}**

Tento parametr představuje maximální (zkratový) proud, který může článek dodávat při dané intenzitě slunečního záření.

- **Napětí U_{mp} a proud I_{mp} v bodě maximálního výkonu**

Jedná se o napětí U_{mp} a proud I_{mp} , při kterém je z fotovoltaického panelu dodáván maximální výkon při dané intenzitě slunečního záření.

- **Výkon v bodě maximálního výkonu P_m**

Určuje maximální dodávaný výkon solárním článkem při napětí U_{mp} a proudu I_{mp} . Tento výkon je závislý na intenzitě dopadajícího slunečního záření na fotovoltaický panel, na složení spektra tohoto záření a dále na teplotě článku ovlivněném vnějšími klimatickými podmínkami. Pro maximální výkon můžeme psát

$$P_m = U_{pm} \cdot I_{mp} \quad (4.1)$$

- **Účinnost solárního panelu η**

Tato veličina je definována jako podíl maximálního výkonu v bodě maximálního výkonu a výkonu dopadajícího slunečního záření. Pro účinnost můžeme psát vztah

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} \cdot 100 = \frac{U_{pm} \cdot I_{mp}}{P_{in}} \cdot 100 \quad (4.2)$$

- **Činitel plnění FF**

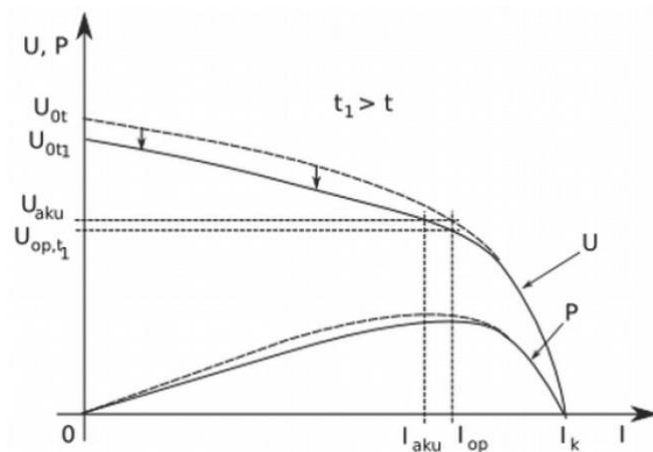
Tento parametr je definován jako poměr maximálního výkonu v bodě maximálního výkonu P_m a výkonu daného součinem napětí naprázdno U_{OC} a proudu nakrátko I_{SC} .

$$FF = \frac{P_m}{U_{OC} \cdot I_{SC}} \cdot 100 = \frac{U_{pm} \cdot I_{mp}}{U_{OC} \cdot I_{SC}} \cdot 100 \quad (\%) \quad (4.3)$$

4.2 Nepříznivé vlivy na vlastnosti fotovoltaických panelů

4.2.1 Vliv oteplení fotovoltaického panelu

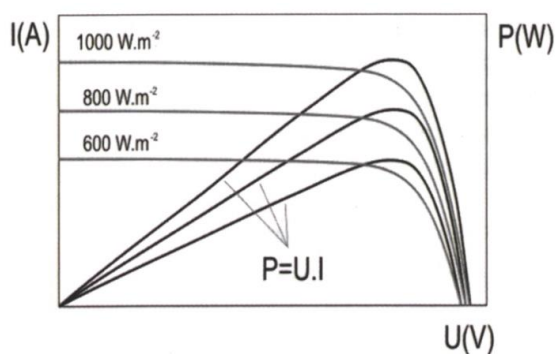
Při zvýšení teploty fotovoltaického článku dochází k poklesu napětí naprázdno U_{OC} . Při dlouhodobém osvětlení slunečním zářením nebo při zhoršených podmínkách chlazení (bezvětrí) dochází ke zvýšení povrchové teploty článku, což vede k poklesu zatěžovací charakteristiky, jak je ukázáno na následujícím obrázku.



Obr. 4.2 Vliv teploty na výkon fotovoltaického článku [4]

4.2.2 Vliv intenzity slunečního záření

Intenzita slunečního záření má vliv na účinnost fotovoltaického článku. Současně závisí na velikosti sériového odporu fotovoltaického článku. Při malém sériovém odporu fotovoltaického článku jeho účinnost se zvyšující intenzitou slunečního záření vzrůstá a dosahuje maxima a až při velkých intenzitách počne klesat. Při velkém sériovém odporu fotovoltaického článku jeho účinnost klesá se zvyšující se intenzitou záření. Následující obrázek uvádí vliv intenzity slunečního záření na zatěžovací a výkonovou charakteristiku fotovoltaického článku.



Obr. 4.3 Vliv intenzity slunečního záření na zatěžovací a výkonovou charakteristiku fotovoltaického článku [4]

4.2.3 Vliv znečištění

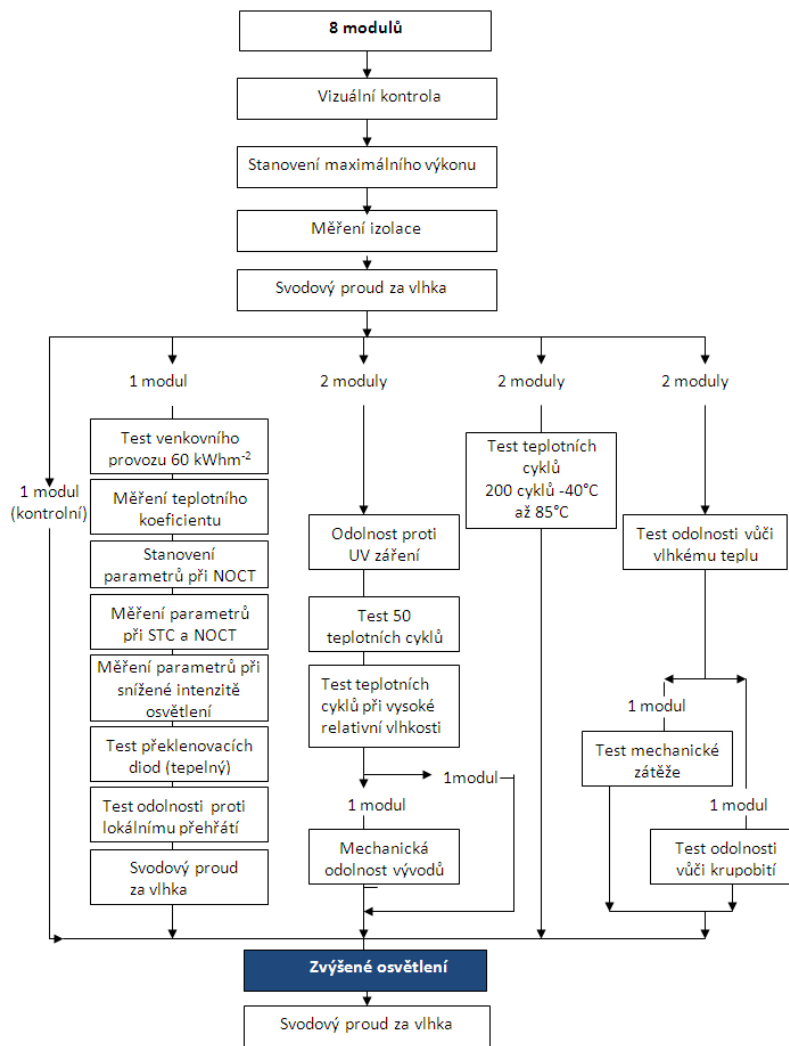
Důležitým faktorem pro výnosy z fotovoltaické elektrárny je vliv zastínění. Ten se mnohdy podceňuje a například i zdánlivě banální zastínění od antény nebo bleskosvodu může mít vliv na celkové výnosy v řádu procent až desítek procent. Je tedy třeba brát na zřetel všechny potenciální vlivy zastínění, jako jsou sloupy, stromy, antény nebo i dráty

elektrického vedení. Velký vliv na zastínění mají i nevhodně zvolené příchytky fotovoltaických panelů, které slouží k mechanickému uchycení fotovoltaických panelů k nosné konstrukci a vytvářejí takzvané mikrostíny. Podstatný vliv zastínění na výnosy je dán hlavně fyzikální podstatou funkce fotovoltaického článku. Pokud dojde k zastínění byť jen jediného článku na fotovoltaickém panelu, začne se tento článek chovat jako odpor a „brzdí“ tok elektrické energie ve všech ostatních člancích, případně panelech spojených v jedné větvi (sérii). Je tedy opravdu důležité vyhnout se případnému zastínění, jak jen je to možné. Zastínění a tím snížení výkonu může vyvolat i nadměrné znečištění panelů např. pylem, prachem, spadáním listů, ale i sněhem nebo ptačím trusem. Fotovoltaické panely mají samočisticí schopnost; je i přesto doporučeno provádět průběžnou kontrolu znečištění FV panelů v průběhu celého roku a případně panely očistit nejlépe proudem vody (nikdy nepoužívat škrabky nebo neznámá chemická čisticíidla). Tato údržba, pomocí strojového a mechanického čištění fotovoltaických panelů, se v plošné míře nevyužívá s ohledem na ekonomické náklady spojené s čištěním a vysokou mírou rizika mechanického poškození fotovoltaického panelu [12]. V poslední době je také nabízena i možnost opatřit fotovoltaické panely ochranným nátěrem na bázi nanotechnologie, které zabraňuje ulpívání nečistot na plochách fotovoltaických panelů a napomáhá k účinnějšímu samovolnému smývání nečistot z jeho povrchu. Avšak stejně jako mechanické čištění je finančně nákladné a musí se po určité době opakovat. Proto se aplikuje pouze v místech fotovoltaického systému, který je často vystaven většímu vlivu znečištění.

4.3 Testování fotovoltaických panelů

S velkým rozvojem výstavby fotovoltaických elektráren se na našem trhu snaží prosadit velké množství výrobců fotovoltaických panelů. Kvalita a technické parametry se mohou lišit podle deklarovaných katalogových listů výrobců. Kvalita fotovoltaických panelů musí splňovat kritéria daná normou ČSN EN 61215. Kontrola a testování fotovoltaických panelů před instalací je ochranou investic a snižováním rizik.

Testování fotovoltaických panelů má odhalit zejména rozdílnost deklarovaných technických parametrů udávanými výrobci, rozdílnost výrobních a kontrolních technologií výrobců, mechanický stres způsobený při dopravě a manipulaci a v neposlední řadě bezpečnost zařízení. Za tímto účelem byly vyvinuty standardní testovací podmínky. Na následující obrázku je ukázán postup takového testování.



Obr. 4.4: Postup testování fotovoltaických panelů [15]

Závěr

Bakalářská práce se zabývá popisem fyzikálního procesu získávání elektrické energie ze slunečního záření dopadajícího na Zemi a jejího následného využití ve fotovoltaickém systému. Skládá ze čtyř kapitol. V první kapitole je popsána problematika slunečního záření. Druhá kapitola se zabývá principem činnosti fotovoltaických článků, jejich druhy a historií vývoje. Ve třetí kapitole jsou popsány vlastnosti solárních zařízení, jednotlivé druhy fotovoltaických systémů a prvky fotovoltaických elektráren. V poslední kapitole jsou uvedeny provozní vlastnosti fotovoltaických panelů a nepříznivé vlivy na jejich činnost, jako jsou vliv oteplení, intenzita slunečního záření a vliv znečištění. Dále je krátce zmíněna problematika testování fotovoltaických panelů.

Z vývoje fotovoltaických článků lze předpokládat, že křemík zůstane nejdůležitějším materiálem i v následujících letech. Stále pokračuje výzkum tenkovrstvých fotovoltaických článků. Velký vývoj je věnován článkům využívajícím vícevrstvé profily pro co největší využití slunečního spektra. Do popředí zájmu se rovněž dostávají fotovoltaické články z organických materiálů.

Při návrhu fotovoltaických elektráren je potřeba uvažovat nepříznivé vlivy pro jejich činnost. Pro správnou činnost fotovoltaických systémů je nezbytné testování fotovoltaických panelů jak při výstavbě, tak i v průběhu jejich provozu. Tím lze ochránit investice a zajistit maximálně dosažitelnou účinnost výroby elektrické energie.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] *Fotovoltaika a fotovoltaické systémy v podmínkách v ČR a jejich navrhování*, publikace firmy SOLARTEC s.r.o, Rožnov pod Radhoštěm, 1998
- [2] Mach J. *Využití solární energie*
- [3] Scheer H. *Sluneční strategie (Politika bez alternativy)*, Nová Země 1999, ISBN: 80-902535-0-4
- [4] Mastný P. a kol. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*, ČVUT Praha, 2011
- [5] Srdečný K.: *Fotovoltaika v budovách, EkoWATT, centrum pro obnovitelné zdroje a úspory energie*, Praha, 2009, ISBN: 978-80-87333-04-4
- [6] Solární elektrárna Vtelno 1, Most, Česká Republika
- [7] Hanuška Z.: *Požáry fotovoltaických elektráren a zásahy jednotek požární ochrany*, prezentace MV - generální ředitelství Hasičského záchranného sboru ČR, 3/2013
- [8] <http://www.ekowatt.cz/cz/informace/obnovitelne-zdroje-energie/energie-slunce---vyroba-elektřiny>, materiály platné ke dni 14. 5. 2015
- [9] <http://www.tzb-info.cz/4536-moznosti-instalace-fotovoltaickych-elektřaren>, materiály platné ke dni 14. 5. 2015
- [10] Limberk O.: *Solární energetika v České republice*, ČVUT v Praze, 2009
- [11] Bendark V., Staněk K., Wolf P.: *Fotovoltaické systémy – učební text k semináři*, VUT v Brně, 2011
- [12] <http://www.cne.cz/fotovoltaicke-systemy/uvod-do-fv-systemu/>, materiály platné ke dni 20. 5. 2015
- [13] Cihelka J.: *Sluneční vytápěcí systémy*, SNTL 1984, ISBN 14-236-84
- [14] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1000-energeticka-bilance-zeme>, materiály platné ke dni 14. 5. 2015
- [15] www.ib.cvut.cz/sites/default/files/Studijni_materialy/.../A5M13FVS-7, materiály platné ke dni 20. 5. 2015

