

# Obnovitelné zdroje elektrické energie

## Fotovoltaika

kurz 3.



## Obsah

3.	Využití optického záření v energetice.....	3
3.1.	Sluneční záření, slunce jako zdroj energie .....	3
3.2.	Solární systémy.....	8
3.2.1	Fotovoltaické systémy.....	8
3.2.2	Princip funkce fotovoltaického článku .....	8
3.2.3	Solární články, typy a výroba.....	12
3.2.4	Charakteristiky solárních článků.....	15
3.2.5	Faktory ovlivňující výkon článků .....	16
3.2.6	Solární panely .....	16
3.2.7	Zvyšování efektivity výroby solárních elektráren .....	17
3.2.8	FV solární systémy připojené k síti, komponenty.....	18
3.3	Fotovoltaicko-termální články s koncentrátory slunečního záření.....	19
3.4	Vývojové trendy v oblasti FV článků a modulů .....	21
3.4.1	Články z krystalického křemíku .....	23
3.4.2	Tenkvrstvé moduly .....	24
3.4.3	Rozdělení FV systémů podle zapojení .....	25
3.5.	Návrh FV elektráren, dimenzování jednotlivých komponent.....	28
3.5.1	Příprava a stavba fotovoltaické elektrárny .....	28
3.5.2	Technické řešení FVE .....	29
3.5.3	Výběr a návrh konfigurace fotovoltaických panelů.....	30
3.5.4	Inventory.....	33
3.6	Prognózy současného stavu .....	36
3.7	Otázky a úlohy.....	37
3.8.	Literatura .....	38

### 3. Využití optického záření v energetice

V souvislosti s rostoucí poptávkou po energiích, jejich rostoucí cenou, i ekologickým aspektům využívání fosilních zdrojů, je vhodné více využívat obnovitelné zdroje. Nabízí se přímé využití slunečního záření, protože je všude dostupné a lze ho využívat zdarma. Solární elektrárnu lze postavit téměř kdekoli, velmi výhodné je to co nejbližší spotřeby tak, aby se minimalizovaly ztráty vzniklé na přenosovém vedení. V souladu s mezinárodními závazky na zvyšování výroby z obnovitelných zdrojů stát dotuje výkupní ceny elektřiny z obnovitelných zdrojů.

Prvními experimenty, při kterých byl pozorován fotoelektrický jev, se zabýval francouzský fyzik Becquerel od roku 1839. Jeho FV článek byl založen na kovových elektrodách ponořených v elektrolytu. Vývoj prvního pevného článku je připisován Adamsovi a Daymu, kteří jej vyrobili ze selenu v roce 1877. Frittsův článek z roku 1883 měl již účinnost kolem 1 %. Na další vývoj FV technologie mělo zásadní vliv teoretické objasnění fotoelektrického jevu Albertem Einsteinem, za které byl oceněn Nobelovou cenou v roce 1921. Pro technologii moderních křemíkových článků byla významným objevem metoda výroby čistého monokrystalu křemíku, kterou vyvinul Jan Czochralski.

První aplikací FV panelů jako zdroje energie, byla kosmonautika – FV panely byly a stále jsou ideálním zdrojem napájení satelitů. Komerčně se FV články začaly poprvé používat jako zdroje energie pro miniaturní elektroniku (kalkulačky, hodinky). Silným impulsem pro rozvoj FV energetiky byla ropná krize v roce 1973, která nastartovala proces efektivnější výroby a využití energetických zdrojů. Téměř lavinovitě se FV systémy rozvíjejí v posledních letech, a to díky dotačním programům, které způsobily nebývalý zájem investorů o tuto oblast výroby elektrické energie. Vše napovídá tomu, že pro udržení stávajícího rozvoje lidské civilizace budou obnovitelné zdroje energie (a tedy i FV systémy) v budoucnosti zcela zásadní.

#### 3.1. Sluneční záření

Sluneční záření patří mezi nejčistší a nejdostupnější zdroje energie na Zemi. Slunce je zdrojem zářivé energie v celém rozsahu spektra od nejmenších vlnových délek rentgenového a ultrafialového záření, až po metrové délky záření rádiového. Světelné a infračervené záření o vlnové délce 0,2  $\mu\text{m}$  až 3  $\mu\text{m}$  je však nejčetnější (lidské oko vnímá záření v rozsahu 0,38 až 0,76  $\mu\text{m}$ ). Hmotnost Slunce je asi 330 000 krát větší než hmotnost Země a představuje 99,8% hmotnosti sluneční soustavy.

Ultrafialové záření	110	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
Viditelné záření	642	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
Infračervené záření	615	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
Solární konstanta	1367	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$

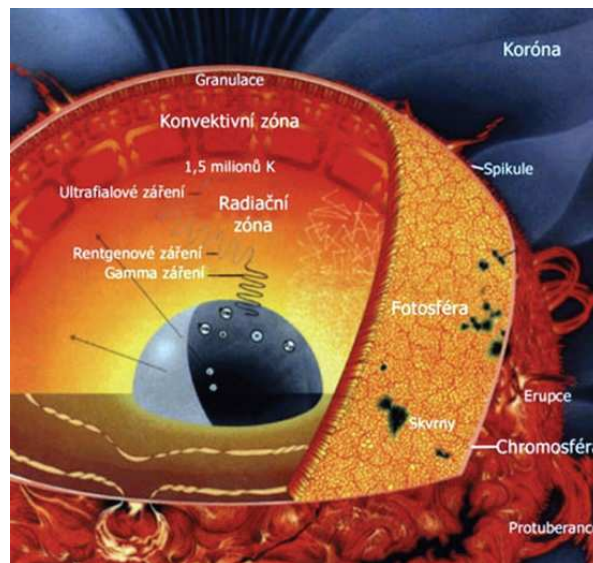
**Tab. 3.1: Energetické rozdělení solární konstanty- nejvíce energie dopadá ve formě viditelného světla**

Pro solární energetiku, jak už sám název napovídá, je zdrojem slunečního záření. Slunce, naše nejbližší hvězda vzdálená od země 150 miliónů kilometrů, je složena ze 75% z vodíku a

z 25% z hélia, stáří slunce se odhaduje 4,6 miliard let. Ve Slunci nepřetržitě probíhá termojaderná reakce přeměny vodíku v hélium, přičemž každou sekundu Slunce ztratí 4,26 miliónů tun ze své hmotnosti. energii tohoto hmotnostního úbytku Slunce vyzařuje do okolí - za sekundu tedy  $3,8 \cdot 10^{26}$  J. Slunce nám vydrží svítit ještě 5 miliard let. Teplota povrchu Slunce je 5770 K, proto maximum záření nalezneme na vlnové délce 555 nm, které lidé vnímají jako žluté (i když maximum jeho vyzařování je v zelené části viditelného spektra). Průměr Slunce je zhruba 1 400 000 km, což je asi 109 průměrů Země. Jeho objem je tedy asi 1,3 milionkrát větší než objem Země. Hustota Slunce je průměrně  $1400 \text{ kg m}^{-3}$ . Slunce je koule žhavého plazmatu, která neustále produkuje ohromné množství energie. Jeho výkon je zhruba  $4 \times 10^{26}$  W, z čehož na Zemi dopadá asi 45 miliardtin. Přibližně polovina zářivého toku Slunce je pohlcena zemským povrchem a následně je vyzářena ve formě IR záření do vesmíru. Velká část energie je spotřebována k odpaření vody v oceánech.

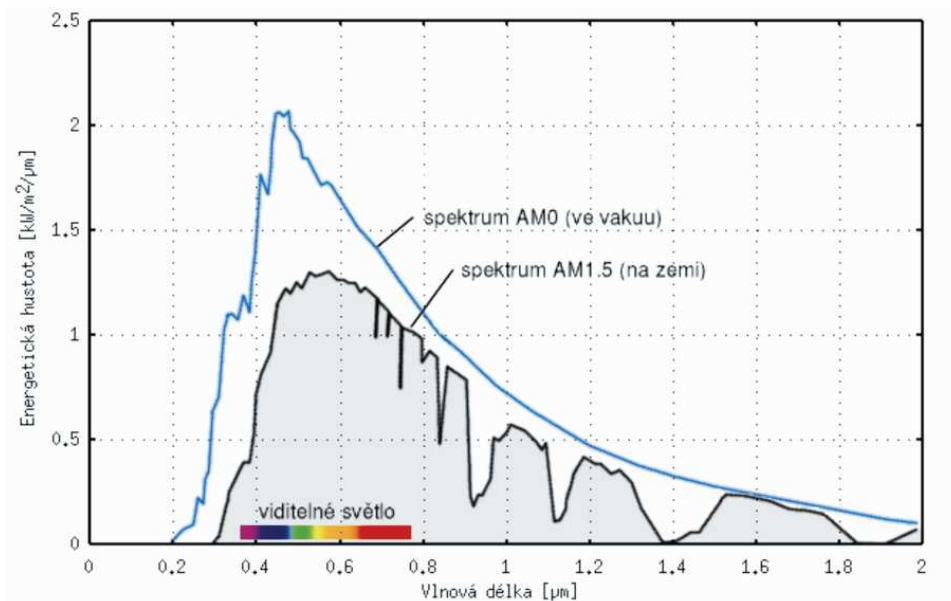
Ke vzniku energie Slunce dochází v jeho nitru, které se skládá ze tří částí (obrázek 3.0):

- jádro
  - probíhá termonukleární reakce (teplota  $13 \cdot 10^6$  K)
- oblast atmosféry
  - vzniká elektromagnetické záření (fotosféra, chromosféra => koróna)
- sluneční vítr
  - dochází k emitaci protonů,  $\alpha$  částic a elektronů



**Obr. 3.0: Složení Slunce [15]**

Jen zlomek z této energie - jedna dvoumiliardtina dopadne na povrch naší atmosféry. Dopadající zářivá energie má hodnotu  $1,37 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$  a tato hodnota se nazývá *solární konstanta*. Její velikost se v čase nepatrně mění v závislosti na změnách aktivity slunečních skvrn (v 11-ti letých cyklech) a na aktuální vzdálenosti Země od Slunce (dráha pohybu je totiž mírně eliptická).



**Obr. 3.1: Spektrální složení světla dopadajícího na Zemi**

Naše atmosféra má filtrační účinek - způsobuje pokles intenzity záření, zvláště u kratších vlnových délek – ultrafialového záření. Na povrch Země tedy dopadá při hezkém počasí okolo poledne **maximální sluneční výkon  $E = 1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$** . Tato hodnota je téměř nezávislá na umístění a na rovníku je jen mírně vyšší. Celkem na povrch Země osvětlený Sluncem dopadá zářivý výkon 180 000 TW.

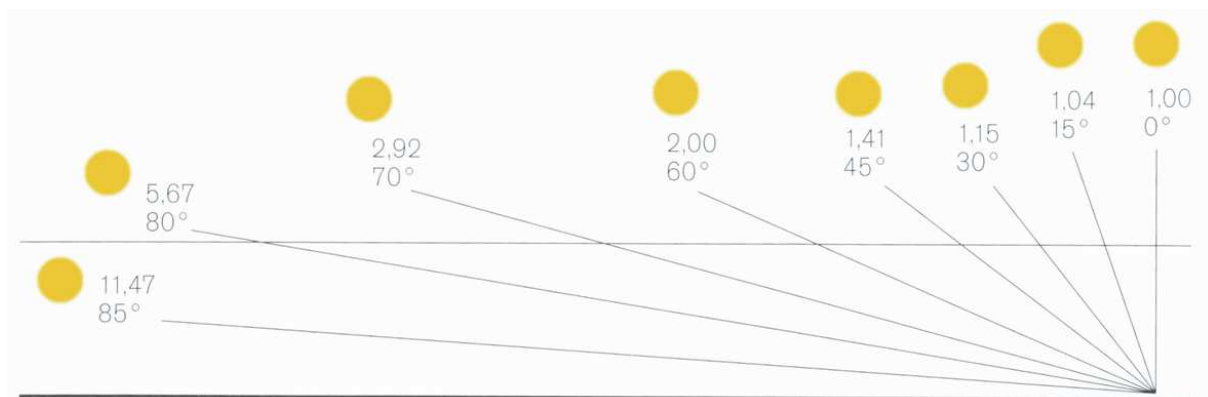
Pokles záření je také závislý na úhlu dopadu paprsků, tím i na tloušťce atmosféry, kterou musí projít. Proto se používá tzv. AM (Air Mass factor) – optická tloušťka atmosféry, vyjadřující násobek tloušťky atmosféry, kterou musí světlo projít. Pro výpočty a měření se běžně užívá  $AM = 1,5$ ; to odpovídá úhlu dopadu slunečních paprsků  $41,75^\circ$ .

Přibližný výpočet optické tloušťky atmosféry (zanedbává zakřivení Země):

$$AM = \frac{1}{\sin \varphi} \quad (1.1)$$

kde  $\varphi$  - je úhel výšky slunce nad horizontem

Mezi další faktory ovlivňující dopad zářivé energie na Zemi patří také nadmořská výška (záření prochází tenčí vrstvou atmosféry), vzdušné znečištění (způsobuje rozptyl nebo může záření absorbovat) a v neposlední řadě i oblačnost.



**Obr. 3.2: Hodnoty AM pro danou polohu Slunce na obloze**

Rozlišujeme přímé a nepřímé ozáření, jejich součet pak dává ozáření celkové. Při jasné bezoblačné obloze převažuje přímé ozáření; průchodem mraky se světlo rozptýlí a ozáření Země je nepřímé. V ročním průměru dopadá v České republice asi jedna polovina energie zářením přímým a polovina difúzním.

Sluneční záření můžeme rozdělit do dvou složek:

- přímé sluneční záření ( $I_P$ )
- difúzní sluneční záření ( $I_D$ )
  - o jde o rozptýlené světlo o odrazu o molekuly plynů, prachu a mraky
  - o intenzita difúzního záření vzrůstá se součinitelem znečištění ( $Z$ )

Teoretické množství energie dopadající za jednotku času na jednotkovou plochu mimo zemskou atmosféru se nazývá *sluneční konstanta* Tab.3.1 a její hodnota je přibližně  $I_0 = 1360 \text{ W.m}^{-2}$ . Mírou zmenšení intenzity tohoto záření je tzv. *součinitel znečištění*  $Z$ , který závisí na obsahu příměsí a atmosférickém tlaku vzduchu. Charakteristické hodnoty součinitele znečištění jsou uvedeny v tabulce 3.1.

Intenzitu přímého slunečního záření dopadající na plochu kolmou k paprskům ( $I_{PN}$ ) můžeme popsat rovnicí (1.2).

$$I_{PN} = I_0 \cdot A^{-Z} \quad (\text{W.m}^{-2}) \quad (1.2)$$

Pro obecně položenou plochu pak platí:

$$I_P = I_{PN} \cdot \cos\gamma \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (1.3)$$

kde  $\gamma$  - úhel dopadu slunečních paprsků

Teoretické množství energie dopadající na osluněnou plochu za den je závislé na sklonu kolektoru  $\alpha$  a součiniteli znečištění  $Z$ . Optimální úhel pro maximální využití slunečního záření se v průběhu roku mění následovně:

- letní období  $30^\circ - 45^\circ$
- zimní období  $60^\circ - 90^\circ$

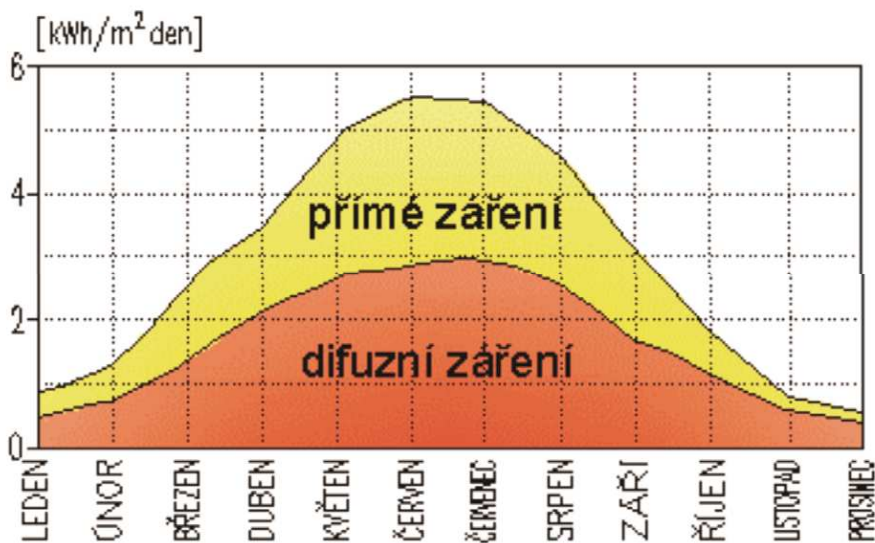
typ oblasti	součinitel znečištění $Z$
místa na 2000 m.n.m.	2,0
místa nad 1000 m.n.m.	2,5
venkov bez průmyslových exhalací	3,0
města a průmyslová střediska	4,0
silně znečištěné prostředí	$\geq 5,0$

**Tab. 3.2: Typické hodnoty součinitele znečištění**

V jasný letní den je podíl difúzního (nepřímého) záření cca 10 %, v zamlžený nebo zamračený den zvláště na podzim nebo v zimě až 100% .

Za kolísání nabídky energie v ročním úhrnu může hlavně sklon zemské osy - při oběhu Země kolem Slunce je ozářena jednou severní a jednou jižní polokoule. V zimě je záření

méně díky poloze Slunce níže nad horizontem a kratšímu dni. Čím dále jsme pozice od rovníku, tím jsou větší rozdíly mezi zimním a letním půlrokem.



**Obr.3.3: Podíl přímého a nepřímého záření na území ČR v průběhu roku**

Celková doba slunečního svitu se u nás pohybuje většinou mezi 1400 – 1800 hodinami ročně.

Ročně dopadne na naše území energie průměrně  $1081 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ . V našich podmínkách je standardní statický fotovoltaický (FV) systém s výkonem 1 kWp schopen vyrobit 900 - 1000 kWh elektrické energie ročně. Z tohoto množství 75% v době od dubna do října a 25% ve zbývající části roku.



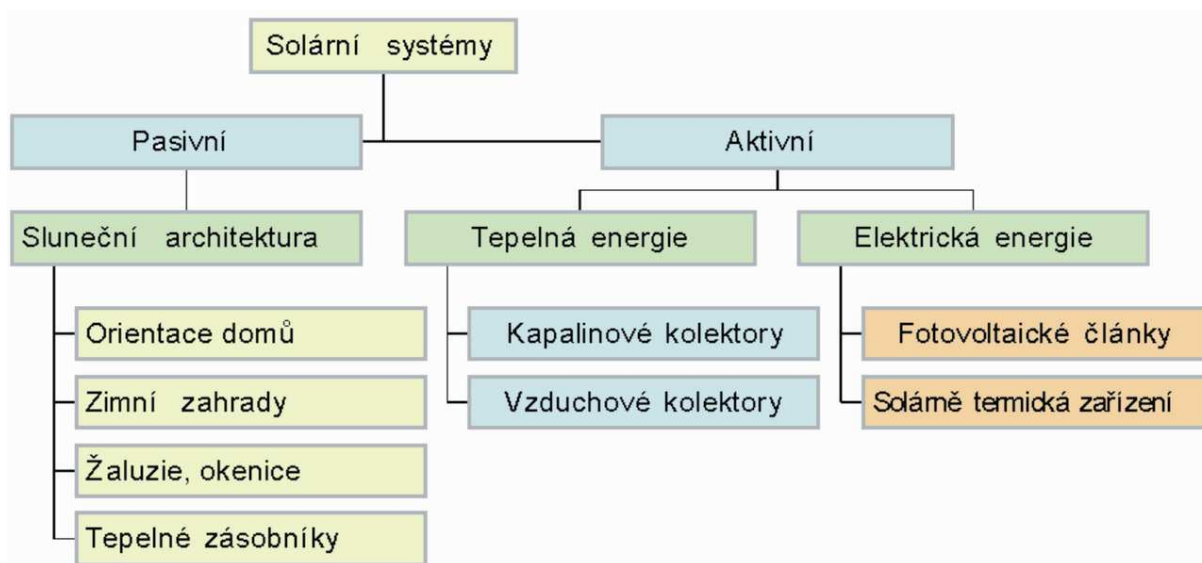
**Obr. 3.4: Celková roční dopadající energie na horizontální rovinu [20]**

Jak je vidět z obrázku, určujícím faktorem množství dopadající zářivé energie je zeměpisná šířka. Rozdíl v množství dopadající energie mezi místem s nejlepší a nejhorší polohou je cca 17% .

## 3.2. Solární systémy

Solární systémy - realizace pro využívání solární energie - můžeme rozdělit na 2 základní druhy:

- pasivní systémy - toto jsou konstrukční řešení, která pomáhají využívat sluneční potenciál a zmenšovat energetické ztráty,
- aktivní systémy - jsou to zařízení nebo jejich soubory, které jsou primárně určeny k přeměně solární energie na tepelnou nebo elektrickou energii.



Obr. 3. 5: Rozdělení solárních systémů

My se dále budeme zabývat výrobou elektřiny, kterou můžeme provést buď přímo, tedy pomocí solárních článků, nebo nepřímo s využitím tepelné energie jako prostředku k výrobě energie elektrické.

### 3.2.1. Fotovoltaické systémy

Fotovoltaické systémy jsou zdroje elektrické energie přímo ze slunečního záření, které využívají fotovoltaických článků. Základním prvkem a podstatou každého fotovoltaického systému je solární článek. Principem jeho funkce je fotoelektrický jev, který byl poprvé pozorován již v roce 1839 A. E. Bequerelem. Vyložit jeho podstatu však dokázal až A. Einstein v roce 1905. Nicméně až éra polovodičů a vesmírných misí po 2. světové válce znamenaly pro toto odvětví prudký vývoj doprovázený zvyšováním účinnosti článků.

### 3.2.2 Princip funkce fotovoltaického článku

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



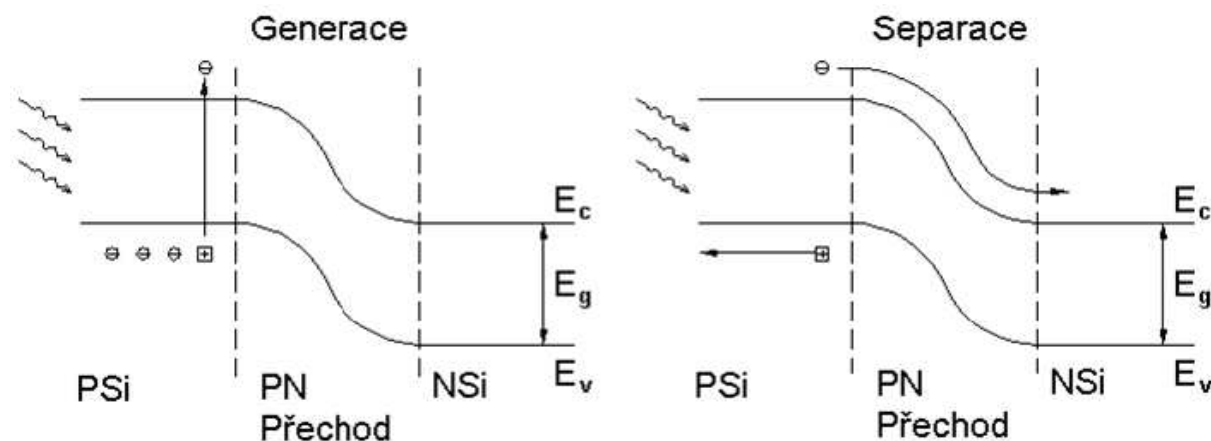
- interakce částice s mřížkou
  - využití nízkoenergetických fotonů
- interakce s volnými elektrony
  - dochází pouze ke zvýšení teploty (fototermální systémy)
- interakce s vázanými elektrony
  - vznikají volné nosiče náboje
  - může dojít k uvolnění elektronu z vazby

Pro funkci FV článku je zásadní, aby foton ze slunečního záření uvolnil v látce elektron a vznikl pár elektron – díra. V kovech ovšem dojde k jejich okamžité rekombinaci, které je potřeba zabránit a vzniklý náboj tedy odvézt z článku. Pro tento účel se využívá polovodičů, ve kterých jsou elektrony a díry separovány vnitřním elektrickým polem PN přechodu.

Nejjednodušší fotovoltaický článek můžeme tedy popsat jako velkoplošnou diodu s jedním PN přechodem. Aby mohla fotovoltaická přeměna probíhat, musí být splněny následující podmínky:

- 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.
- 

Na obrázku obrázku 3.6 a 3.7 je zobrazen základní princip funkce fotoelektrického jevu.

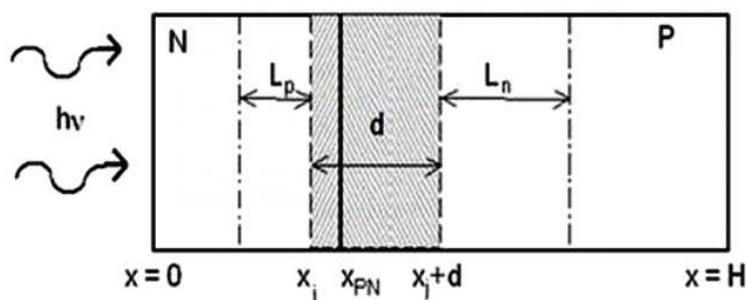


*PSi – polovodičový křemík typu P, NSi – polovodičový křemík typu N,  $E_C$  – energie vodivostního pásu,  $E_V$  – energie valenčního pásu,  $E_g$  – energie zakázaného pásu*

**Obr. 3.6: Princip přímé přeměny energie slunečního záření na elektrickou s využitím fotoelektrického jevu [2]**

V ozářené oblasti PN přechodu jsou generovány nosiče, které následně difundují směrem k PN přechodu. Hustota proudu ( $J_{PV}$ ) je tvořena nosiči, které byly zachyceny oblastí prostorového náboje (rovnice 1.4). Hustota proudu pro jednotlivé oblasti PN přechodu je definována v rovnicích 1.5 – 1.6. Nosiče, generované mimo místa přechodu PN musí k oblasti

se silným elektrickým polem difundovat. Pokud zrekombinují dříve, než dosáhnou oblasti přechodu PN, neuplatní se při generaci fotovoltaického napětí.



Obr. 3.7: Princip fotoelektrického jevu [15], [2]

$h$  Planckova konstanta( účinkové kvantum)  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  [Js]

$\nu$  kmitočet záření

v Newtonově teorii se pokládá světlo za souhrn nesmírného počtu fotonů, z nichž každý má energii rovnou kvantu  $\varepsilon = h\nu$

$$J_{PV}(\lambda) = J_{PVN}(\lambda) + J_{PVP}(\lambda) + J_{OPN}(\lambda) \quad (1.4)$$

Pro oblast typu N platí rovnice:

$$J_{PVN}(\lambda) = q \int_0^{x_j} G(\lambda) dx - q \int_0^{x_j} \frac{\Delta p}{\tau_p} dx - J_{sr}(0) \quad (1.5)$$

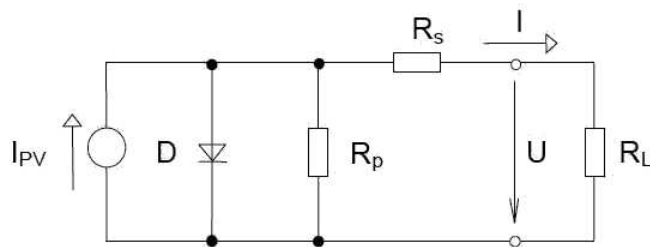
pro oblast typu P platí:

$$J_{PVP}(\lambda) = q \int_{x_j+d}^H G(\lambda) dx - q \int_{x_j+d}^H \frac{\Delta n}{\tau_n} dx - J_{sr}(H) \quad (1.6)$$

a pro oblast prostorového náboje přechodu PN platí:

$$J_{OPN}(\lambda) \approx q \int_{x_j}^{x_j+d_j} G(\lambda) dx \quad (1.7)$$

Fotovoltaický (FV) článek je možno modelovat pomocí náhradního obvodu, znázorněného na obrázku (3.8). Ozářená oblast (plocha  $A_{ill}$ ) přechodu PN generuje proud o hustotě  $J_{PV}$ , ( $I_{PV}$ ) 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  $U$  na FV článku je o úbytek napětí na sériovém odporu nižší, než napětí  $U_j$  na diodě.



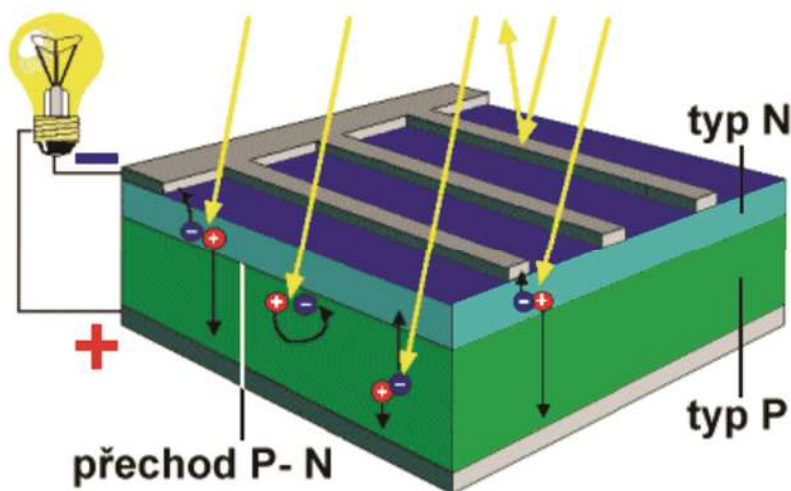
**Obr. 3.8: Náhradní schéma fotovoltaického článku [15], [2]**

Na základě výše popsaného náhradního schématu lze výstupní proud fotovoltaického článku ( $I$ ) vyjádřit následující rovnicí

$$I = \underbrace{A_{\text{ill}} \cdot J_{\text{PV}}}_{\text{I}} - \underbrace{I_{01} \left[ \exp\left(e \cdot \frac{U + R_s I}{kT}\right) - 1 \right] - I_{02} \left[ \exp\left(e \cdot \frac{U + R_s I}{2kT}\right) - 1 \right]}_{\text{II}} - \underbrace{\frac{U + R_s I}{R_p}}_{\text{III}} \quad (1.8)$$

Jednotlivé části rovnice označené jako I, II a III představují generovaný proud (I), proud diodou (II) a svodový proud (III). Z uvedené rovnice (1.8) je patrný značný vliv sériového odporu  $R_s$  na voltampérovou charakteristiku fotovoltaického článku. Sériový odpor snižuje výstupní proud a tím i celkovou účinnost článku.

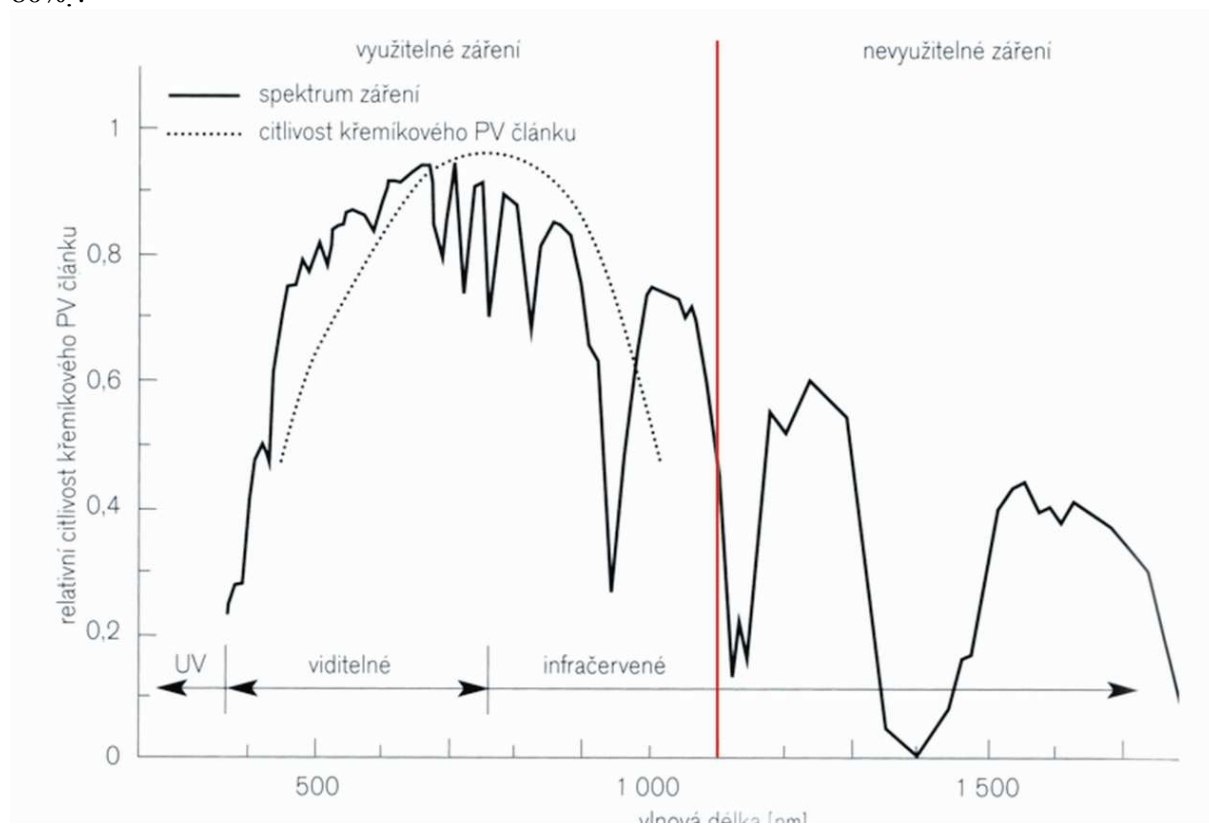
Polovodičový solární článek je vlastně velká dioda - velkoplošný PN přechod, ve kterém se při dopadajícím záření uvolní některé elektrony z krystalové mřížky, čímž se vytvoří volné elektrony a díry. Elektrické pole tyto nosiče náboje oddělí, takže elektrony se nahromadí na horní straně polovodiče typu N a přebytek děr vznikne na spodní straně polovodiče P. Když propojíme (přes spotřebič) obě strany článku, bude obvodem protékat proud - elektrony se budou pohybovat, aby zaplnily díry a tím vyrovnaly rozdíl potenciálů. Toto je skutečný směr toku proudu, zatímco dohodnutý směr (směr vyznačovaný v obvodech) je opačný. Množství elektronů tekoucích obvodem je stejné jako množství elektronů uvolněných v PN přechodu díky ozáření. Elektrický proud je proto lineárně úměrný množství dopadajícího záření. Pro shromažďování a odvod náboje je přední strana článku pokryta kontaktní mřížkou a zadní strana je celá z kontaktního materiálu.



**Obr. 3.9: Znázornění průběhu fotoelektrického jevu na PN přechodu**

Záření, které způsobí uvolnění elektronu v polovodiči, ovšem nemůže být libovolné- foton dopadajícího záření musí mít potřebnou energii. Velikost potřebné energie závisí na použitém polovodiči, pro křemík je potřebná energie 1,1 eV, což odpovídá záření o vlnové délce 1100 nm.

Pro generaci proudu se tedy využije jen fotonů s vlnovou délkou kratší, tzn. s větší energií. Ale ani jejich energie není plně využita, protože 1 foton vybudí právě jeden elektron a zbylá energie způsobuje ohřev článku. Díky těmto faktorům nelze dosáhnout s křemíkem účinnosti vyšší než cca 55% . To je jistě velmi dobrá hodnota, ale díky dalším ztrátám v článku je prakticky nedosažitelná. Standardní účinnost běžně používaných FV článků se pohybuje v oblasti 15 ÷ 18 %. Výrobci garantují, že výkon po 25 letech neklesne pod hodnotu 80% .



**Obr. 3.10: Citlivost Si fotočlánku v porovnání se spektrem AM1,5**

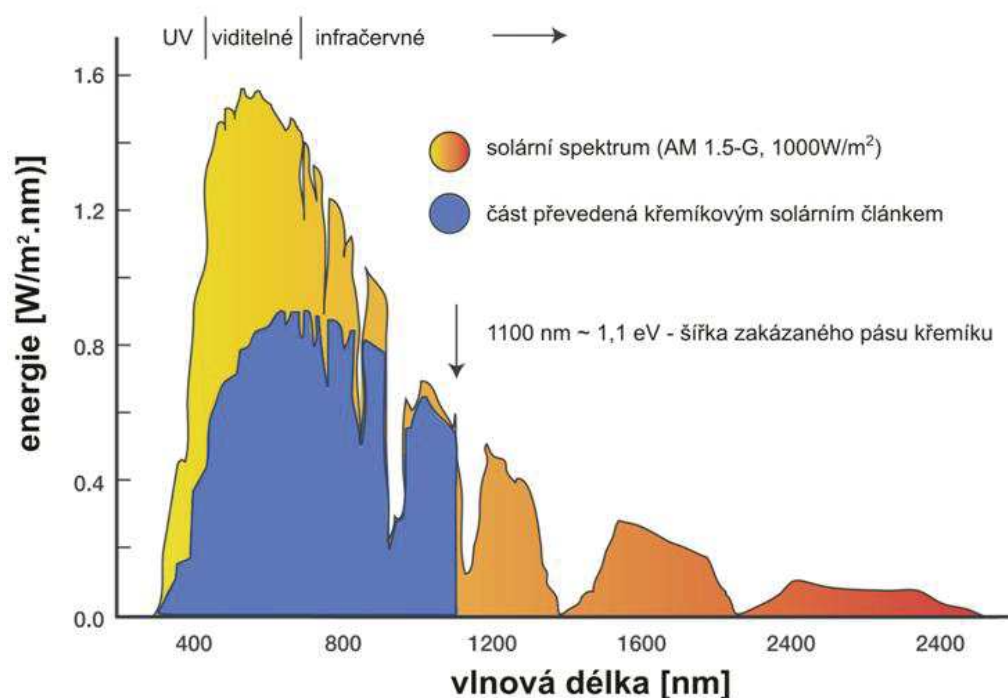
Pro stanovení účinnosti  $\gamma$  solárního panelu platí při zanedbání součinitele znečištění vztah:

$$\gamma = \frac{P}{E \cdot A} \quad (1.9)$$

kde P je elektrický výkon panelu (W), E zářivý sluneční výkon  $W/m^2$ , A plocha panelu ( $m^2$ )

### 3.2.3 Solární články - typy a výroba

Nejvyužívanějším materiálem pro výrobu fotovoltaických článků je křemík (Si). Vzhledem k šířce zakázaného pásu je u křemíku možno dosáhnout velmi vysoké účinnosti generace volných nosičů dopadajícím slunečním zářením. Zároveň u křemíku, jako základního materiálu pro mikroelektroniku, se podařilo velmi dobře zvládnout všechny technologické operace potřebné k vytváření struktur. Využitelné spektrum slunečního záření křemíkovým článkem je na obrázku 3.11.



**Obr. 3.11: Využitelné spektrum záření pro články Si [4]**

Výchozím materiálem pro výrobu fotovoltaických článků z krystalického křemíku jsou křemíkové destičky (obvykle typu P) čtvercového tvaru o rozměrech až 200x200 mm a rezistivitě řádově jednotky  $\Omega\text{cm}$ . Počátek výroby FV článků byl spojen pouze s monokrystalickým křemíkem. Potřeba snížení ceny vstupního materiálu vedla v sedmdesátých letech k vývoji multikrystalického křemíku. Tato technologie přispěla k úsporám materiálu a snížení investičních nákladů, na druhé straně náhodná orientace krystalických zrn neumožňuje texturaci povrchu alkalickým leptáním a hranice zrn zvyšují ztráty rekombinací. Vývojem technologie se podařilo značně přiblížit účinnost článků z multikrystalického křemíku účinnosti článků z křemíku monokrystalického (účinnosti jednotlivých typů fotovoltaických článků jsou v tabulce 3.3). [4], [15]

<i>Typ solárního článku</i>	<i>Typická aktivita článku za běžných podmínek (%)</i>	<i>Maximální naměřená efektivita článku za běžných podmínek (%)</i>	<i>Maximální naměřená hodnota článku v laboratoři (%)</i>
<i>Monokrystalický křemík</i>	12 - 16	22	25
<i>Multikrystalický křemík</i>	11-14	16	20
<i>Amorfni křemík</i>	5-7	10	13
<i>Telurid kademnatý</i>	10	12	16

**Tab. 3.3: Účinnosti jednotlivých typů fotovoltaických článků [15]**

Křemíkové články- křemík je dnes nejpoužívanějším materiálem pro výrobu solárních článků, je z něj přes 90% běžně dostupných článků. Je v zemské kůře obsažen z 30% , a tak s jeho dostupností nejsou potíže. Problémem spíše je, jak ho dostat do velmi čisté podoby, která je pro výrobu článků nutná, s vynaložením co nejmenšího množství energie a tedy i za co

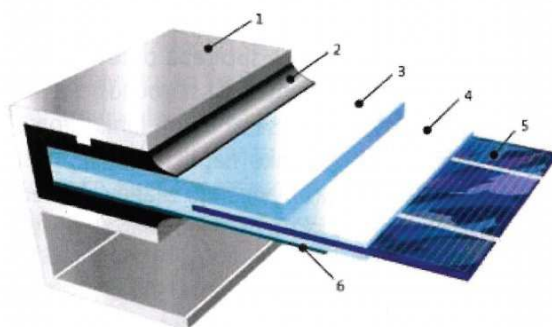
nejnižší cenu. Odpadového křemíku z výroby polovodičových součástek, který se pro tyto účely používá, totiž není pro rychle se rozvíjející produkci solárních článků dostatek.

- Monokrystalický křemík - materiál nákladné výroby s vysokou účinností na přímé sluneční záření. Účinnost takto vyrobených článků je 14 – 17%., laboratorně bylo dosaženo až 25%.
- Polykrystalický křemík - velmi často používaný v tuzemských instalacích. Účinnost v laboratorních podmínkách dosahuje 20%., běžné články do 16%.
- Amorfnní křemík - účinnost je relativně nízká- cca 5 – 7%., avšak článek dokáže lépe než předchozí využít i difúzní záření. Pro dosažení vyšší účinnosti se tento materiál může použít ve více vrstvách, čímž se dosáhne účinnosti až 12%.

Články z jiných materiálů, jako:

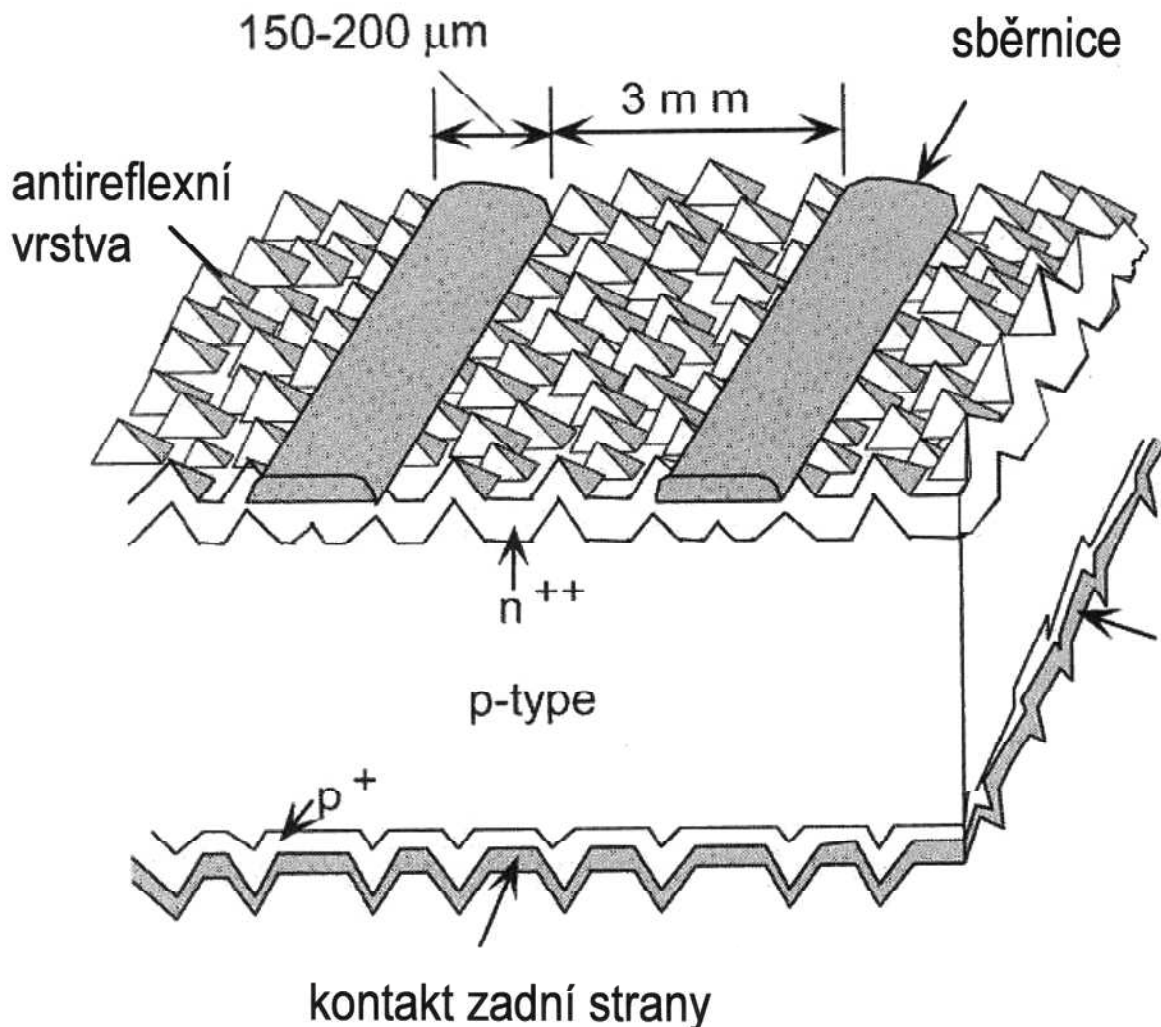
- galium arsenid – GaAs - s příměsemi (např. fosfor, indium, germanium) se používá pro výrobu solárních článků s více PN přechody, které dokáží využít širší spektrum slunečního záření, maximální laboratorně dosažená účinnost činí 40,7%.,
- telurid kadmia – CdTe - účinnost komerčně vyráběných modulů je přes 8% a laboratorně byla dosažena účinnost 16%.,
- diselenid mědi a india - CuInSe<sub>2</sub> - laboratorní účinnost je až 18%., jejich širšímu rozšíření zatím brání jejich vyšší cena.

Z jedné křemíkové destičky je vyroben jeden fotovoltaický článek. Struktura běžného článku je schématicky znázorněna na obrázku 3.13. Aby byla dosažena vysoká životnost, musí se články chránit před vlivy okolního prostředí. Příklad konstrukce fotovoltaického článku z krystalického křemíku je na obrázku 3.12. Fotovoltaické články se vkládají do etylvinylacetátové fólie (EVA). Přední stranu článku tvoří vysoce průhledné, speciálně tvrzené sklo, aby byly články chráněny před vlhkostí, větrem, krupobitím (kroupy do průměru 25 mm) a dalšími povětrnostními vlivy. Současně má sklo propouštět na článek co největší množství slunečního záření. Zadní strana je uzavřena vícevrstvou plastovou fólií s vysokou pevností nebo další skleněnou vrstvou. Moduly jsou opatřeny hliníkovým rámem pro uchycení k nosným konstrukcím a na zadní stěně jsou opatřeny svorkovnicí s kabelovými vývody a překlenovacími diodami. Fotovoltaický modul je kompaktní celek s předepsanými mechanickými, optickými a elektrickými vlastnostmi.



1. hliníkový rám, 2. těsnění, 3. tvrzené sklo, 4. EVA, 5. fotovoltaický článek, 6. krycí fólie (tedlar)

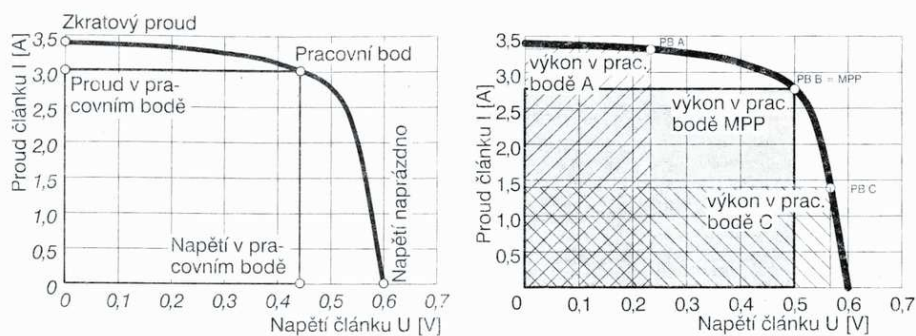
**Obr. 3.12: Struktura fotovoltaického modulu z Si [17]**



Obr. 3.13: Struktura fotovoltaického článku [5]

### 3.2.4 Charakteristika solárního článku

Nejpoužívanější charakteristikou solárních článků je voltampérová charakteristika. Proud nakrátko (také zkratový proud) udává maximální hodnotu proudu, kterou je článek schopen při daném ozáření dodat. Většinou se pohybuje v rozsahu 3 - 6 A, v závislosti na typu článku a jeho ploše. Napětí naprázdno udává maximální napětí na solárním článku bez připojené zátěže. U monokrystalických článků je asi 0,6 V.



Obr. 3.14: VA charakteristika a MPP solárního článku

Pracovní bod je bod charakteristiky, ve kterém článek aktuálně pracuje. Jeho poloha závisí na parametrech zátěže. Výkon v pracovním bodě se vypočítá jako součin napětí a proudu v pracovním bodě.

$$P=U \cdot I \quad [W;V,A] \quad (1.10)$$

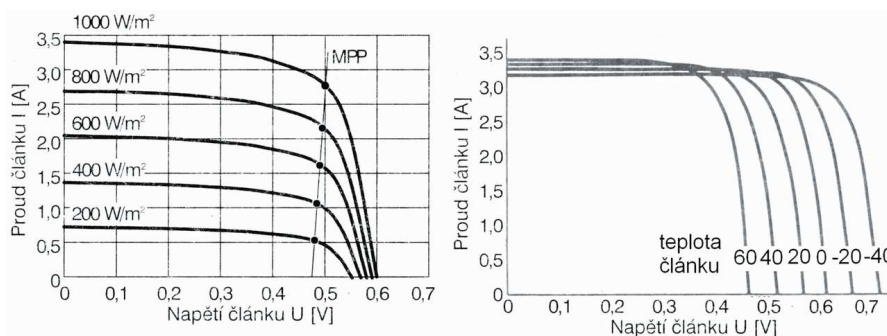
MPP (Maximum Power Point) je pracovní bod, ve kterém je výkon solárního článku největší. Tento bod leží v místě ohybu voltampérové charakteristiky, protože právě tak má součin napětí a proudu, tedy výkon, maximální hodnotu, protože plocha obdélníku vytvořeného průmětem do os grafu je největší. V tomto bodě se snažíme solární článek provozovat.

### 3.2.5 Faktory ovlivňující výkon solárního článku

Intenzita dopadajícího záření má na výkon solárního článku největší vliv, protože způsobuje pohyb elektronů. Proud článku roste úměrně s ozářením. Napětí roste jen mírně.

Teplota článku má na napětí a proud článku protichůdný vliv. Zatímco při rostoucí teplotě proud roste, napětí klesá. Protože ale pokles napětí je výraznější než růst proudu, výkon článku s rostoucí teplotou klesá tempem cca  $0,44 \cdot \% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ . Proto hlavně v teplejších oblastech je nutno pro dosažení stejného napětí a výkonu třeba instalovat více solárních článků (modulů).

Spektrální složení světla má také vliv na výkon článku, protože ten využívá různých vlnových délek s různou účinností. Aby bylo možné solární články a moduly mezi sebou účinně porovnávat, měření výkonu článků se provádí při intenzitě dopadajícího záření  $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  (odpovídá plnému oslunění), teplotě prostředí  $25^\circ\text{C}$  a spektrálnímu složení světla odpovídajícímu  $\text{AM} = 1,5$ . Takto naměřený výkon je stanoven jako *špičkový výkon s označením  $W_p$* .



**Obr. 3.15: Vliv ozáření a teploty solárního článku na VA charakteristiku**

### 3.2.6 Solární panely

Solární článek je velmi tenký a křehký a kontakty na jeho povrchu by bez ochrany podlehly korozi. To jsou důvody, proč se přistupuje k zapouzdření více článků do solárního panelu. obr. 3.12

Pro dosažení vysoké životnosti musí konstrukce panelu chránit jednotlivé články před škodlivými vlivy prostředí. Z přední strany články zakrývá tvrzené sklo, které je chrání před deštěm, větrem i krupobitím. Jako materiál, do kterého se články ukládají, se používá etylenvinylacetátová fólie. Ze zadní strany články kryje nejčastěji pevný plast, používá se odolný materiál nazývaný Tedlar. Hotový panel se usazuje do hliníkového rámu, který dává konstrukci tuhost a odolnost, např. před větrem nebo sněhovou pokrývkou, a umožňuje



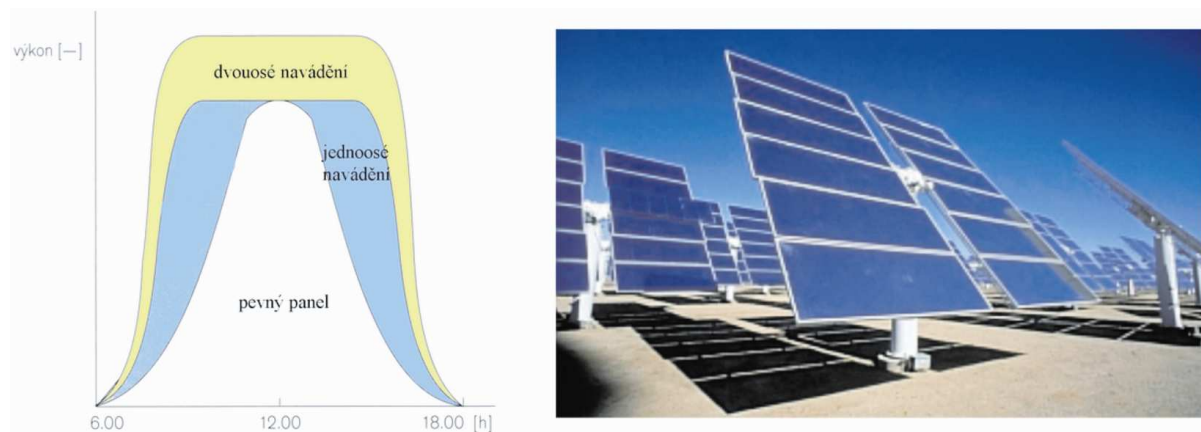
snadnou montáž. Každý panel má vyvedeny kontakty, buď vodiči nebo vodotěsnou svorkovnicí.

Tenkovrstvé solární články se často uzavírají do oboustranně průhledných materiálů, a to pro případ montáže na objekty. Tenkovrstvé články mohou být také ohebné, v tom případě se obklopí flexibilní fólií a na podklad se připevňují lepením.

### 3.2.7 Zvyšování efektivity výroby elektřiny

Když odhlédneme od účinnosti fotovoltaických článků, tak množství energie, které vyrobíme, závisí i na konstrukci panelu a jeho umístění. Musíme ale zohlednit podmínky instalace, abychom nezaplatili více, než bychom získali na vyrobené elektřině.

**Natáčení solárních panelů za Sluncem** - tímto způsobem lze významně zvýšit množství vyrobené energie, zvláště v letních měsících. Natáčení může být jednoosé nebo dvouosé.



**Obr. 3.16: Porovnání okamžitého výkonu systému bez a s naváděním a příklad panelů s dvousým naváděním**

Jednoosé je výrobně jednodušší, levnější a panel je více odolný vůči poryvům větru a také se snáz řídí. Osa natáčení může být vodorovná nebo obecně skloněná.

Dvousé navádění je velmi účinné, ale značně komplikovanější. Systémy se otáčejí za Sluncem na základě řízení počítačem.

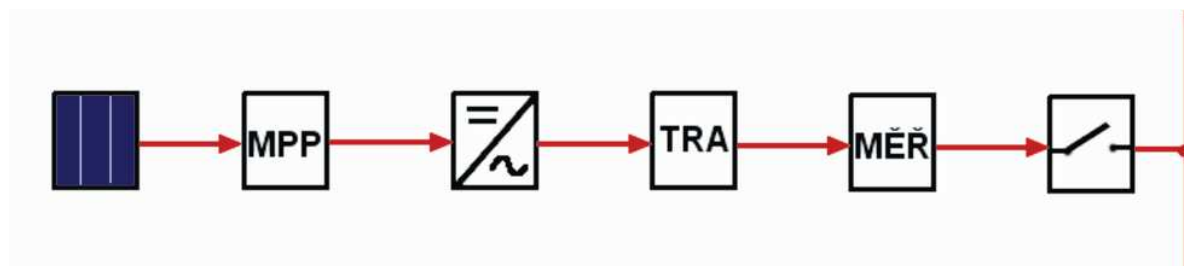
Navádění má veliký smysl v případě přímého záření, množství dopadajícího difúzního záření nijak neovlivňuje. Proto hlavně v zimních měsících je u nás jeho přínos malý. Celkově je navádění solárních panelů i v našich podmínkách zajímavé a jeho realizace se odvíjí od ceny a typu řešení.

**Koncentrace záření** - další možností, jak zvýšit množství vyrobené elektřiny, je zvýšit ozáření FV modulu. Toho dosáhneme soustředěním záření z větší plochy a to pomocí čoček nebo odrazných ploch.

- Čočky - ke koncentraci využívají lomu světla do ohniska, kde je umístěn FV článek. Tato technika je známá již velmi dlouho, ale až nyní se o ní začíná více mluvit díky existenci vysokoúčinných článků, např. GaAs. Tyto články jsou sice dražší, ale díky koncentraci je třeba jen málo materiálu, což snižuje výslednou cenu. Používají se čočky Fresnelova typu a to pro menší spotřebu materiálu a úsporu místa. Vyrábějí se z plastů, aby se ušetřilo na ceně. Nevýhodou tohoto řešení je postupná ztráta vlastností - degradace průhlednosti.
- Reflexní plochy - pomáhají nám pomocí odrazu světla zvýšit obsah plochy, ze které využíváme záření, nebo prodlužují dobu oslunění panelů. Dají se použít koncentrátoři s rovinnými reflektory i koncentrátoři s parabolickými zrcadly, ty jsou ale výrobně mnohem dražší, vyžadují chlazení článků a velmi přesné navádění. Odrazné plochy reflexních koncentrátorů mají jen omezenou životnost, protože kvůli nepříznivým vlivům počasí rychle stárnou a ztrácí odrazivost.

Koncentrátoři využívají pouze přímé záření a svým stíněním snižují možnost využití rozptýleného záření. Proto je jejich použití rentabilnější v místech s vyšším podílem přímého oslunění a menším počtem zatažených dní. Často se koncentrátorů používá v kombinaci s naváděním panelů za Sluncem, u čočkových a reflexních parabolických koncentrátorů je to nutné ke správné fokusaci.

### 3.2.8 FV solární systémy připojené k síti a jejich komponenty



**Obr. 3.17: Blokové schéma solárního systému připojeného k síti**

Po solárních panelech, které se pro dosažení vyššího napětí zapojují převážně do série, je dalším komponentem systému sledovač MPP. Jeho úkolem je zajistit, aby fotovoltaické pole pracovalo vždy v bodě maximálního výkonu a my jsme tak mohli využít co nejvíce dostupné energie. Tento sledovač je již v moderních měničích zabudován.

Následující a velmi podstatnou součástí systému je střídač, jeho úkolem je vytvořit ze stejnosměrného napětí o proměnlivé velikosti střídavé napětí nejčastěji 230 V s kmitočtem 50 Hz. Používají se polovodičové střídače určené speciálně pro provoz se solárními panely, mají velké rozmezí vstupního napětí, obvykle 200 ÷ 400 V. Tyto měniče také musí splňovat normy v oblasti tvaru křivky, velikosti výstupního napětí, zkreslení a další. Střídače se umí samy přifázovat k síti a v případě poruchy se od sítě samy odpojí. Často se vyrábějí i v provedení umožňujícím venkovní instalaci a bývají vybaveny stavovým displejem i s orientačním měřením vyrobené energie a indikací parametrů fotovoltaického systému. Dosahují velmi vysoké špičkové účinnosti - až 97%., ale to pouze, jsou-li zatíženy těsně pod maximem. Proto se volí vyšší počet měničů menšího výkonu, které se podle aktuálního výkonu FV pole připínají a odpínají. Životnost měničů se pohybuje mezi 10 a 15 lety.

Za měničem následuje podle hladiny napětí, na kterou je systém připojen, zvyšovací transformátor. Za ním už je jen elektroměr k průkaznému měření dodané energie a spínač připojení do sítě.

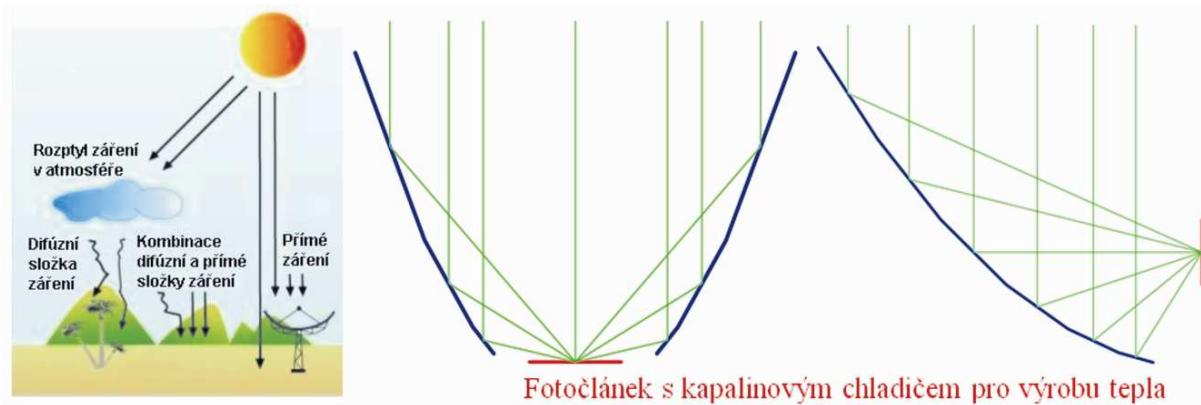
### 3.3. Fotovoltaicko-termické články s koncentrátory slunečního záření

Sluneční záření dopadající na povrch fotočlánků se skládá ze složky přímé a nepřímé. Nepřímá, tzv. difúzní složka záření vzniká rozptylem slunečního záření v atmosféře, nebo jeho odrazem od okolních ploch. Difúzní složka slunečního záření je tedy tvořena svazkem různoběžných paprsků a dominuje v případě oblačného počasí, kdy je přímá složka slunečního záření potlačena oblačností. Naopak přímá složka slunečního záření se vyznačuje svazkem rovnoběžných paprsků a převažuje při bezoblačném počasí, kdy se difúzní složka záření stává nevýznamnou. Při bezoblačném počasí bývá poměr nepřímé a přímé složky slunečního záření přibližně 1:10 [17]. Podobný je tedy i poměr výkonu fotovoltaických systémů při zatažené obloze a při bezoblačném počasí.

Okamžitý elektrický výkon fotovoltaicko-termického systému je dán především užitečným zářivým tokem  $\Phi_e$  slunečního záření dopadajícím na aktivní plochu systému, který se obecně stanoví ze vztahu (1.3).

$$\Phi_e = \int_S E_{eN} dS \quad (1.11)$$

kde  $E_{eN}$  je normálová ozářenost elementu plochy fotočlánku  $dS$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ), tj. ozářenost průmětu plošky  $dS$  do roviny kolmé k paprsku slunečního záření,  $S$  je celková velikost aktivní plochy fotovoltaicko-termického systému ( $\text{m}^2$ ).



**Obr. 3.18 Přímá a difúzní složka slunečního záření, řez složeným rovinným koncentrátorem slunečního záření s horizontálně a vertikálně uloženým fotovoltaicko-termickým článkem**

Aktivní plocha fotovoltaicko-termického systémů bývá zpravidla tvořena rovinnými plochami (rovinnými fotočlánky s kapalinovým chladičem). V případě, kdy na rovinnou plochu dopadá pouze přímá složka slunečního záření (svazek rovnoběžných paprsků), lze užitečný zářivý tok  $\Phi_{ep}$  dopadající na tuto rovinnou plochu zjednodušeně vypočítat ze vztahu:

$$\Phi_{ep} = E_e \cdot S_0 \cdot \cos \alpha \quad (1.12)$$

kde  $E_e$  je ozáření roviny kolmé ke směru paprsků přímého slunečního záření ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ),  $S_0$  je velikost aktivní plochy fotočlánků s kapalinnými chladiči ( $\text{m}^2$ ),  $\alpha$  je úhel sevřený normálou roviny fotočlánků a směrem paprsků slunečního záření ( $^\circ$ ).

Velikost ozáření  $E_e$  roviny kolmé ke směru paprsků přímého slunečního záření je v daném místě určena aktuální polohou tohoto místa vůči Slunci a činitelem prostupu atmosféry. Užitečný zářivý tok přímého slunečního záření dopadajícího na rovinnou plochu je pak dán pouze velikostí rovinné plochy a jejím sklonem vůči směru paprsků přímého slunečního záření.

Požadovaného elektrického výkonu lze dosáhnout buď odpovídající velikostí plochy křemíkových fotočlánků optimálně orientovaných v prostoru nebo využitím odrazných ploch, kterými lze svazek rovnoběžných paprsků přímého slunečního záření přeměnit na svazek paprsků sbíhajících se v bodě, přímce nebo v ploše. Systém takových odrazných ploch je označován jako koncentrátor slunečního záření. V případě použití takových koncentrátorů je nutné zajistit dostatečné chlazení fotovoltaických panelů kapalinným médiem pomocí chladiče instalovaného na spodní stranu fotovoltaických panelů. Takový systém se pak označuje jako kombinovaný fotovoltaicko-termický článek, neboť s jeho využitím dochází ke kombinované výrobě elektřiny a tepla. Koncentrátor slunečního záření lze jen velmi obtížně využít pro směrování paprsků difúzní složky slunečního záření, jejichž směr je závislý na aktuálních povětrnostních podmínkách a velmi rychle se v čase mění.

Koncentrace přímého slunečního záření probíhá buď systémem rovinných zrcadel nebo zrcadlovými plochami odvozenými od kuželoseček (parabolické, hyperbolické nebo eliptické zrcadlo) [19]. Odrazné plochy odvozené od kuželoseček zpravidla směřují svazek paprsků do bodu či přímky. Toho je využíváno v termických článcích pro ohřev kapalin proudících propustnou trubicí, jejíž osa je umístěna právě v přímce (popřípadě v bodech), kam je sluneční záření směřováno odraznými plochami koncentrátoru.

Koncentrátory slunečního záření pro fotovoltaiku naopak nesmějí soustřeďovat svazek paprsků slunečního záření do bodu či přímky, neboť tak může dojít k nevratnému poškození částí rovinného křemíkového fotočlánku, na které by byl soustředěn příliš úzký svazek slunečních paprsků. Vhodné je použít systém rovinných zrcadel, popřípadě složených rovinných odrazných ploch, kdy nedochází k soustředění paprsků slunečního záření do příliš malého prostorového úhlu. Složením několika rovinných zrcadel vznikají složené rovinné koncentrátory. Příklady složených rovinných koncentrátorů přímého slunečního záření jsou uvedeny na obr. 3.18.

Zanedbáme-li pokles intenzity slunečního záření při průchodu záření oblastí koncentrátoru, lze užitečný zářivý tok  $\Phi_{ek}$  dopadající na fotočlánek opatřený koncentrátorem slunečního záření určit podle vztahu:

$$\phi_{ek} = E_e \cdot \left( S_0 \cdot \cos \alpha + \sum_{i=1}^n S_i \cdot \rho_i \cdot \psi_i \cdot \cos \beta_i \right) \quad (1.13)$$

kde  $E_e$  je ozáření roviny kolmé ke směru paprsků přímého slunečního záření ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ),  $S_0$  je velikost aktivní plochy fotočlánku ( $\text{m}^2$ ),  $\alpha$  je úhel sevřený normálou roviny fotočlánků a směrem paprsků přímého slunečního záření ( $^\circ$ ),  $n$  je počet rovinných odrazných ploch koncentrátoru (-),  $S_i$  je velikost plochy průmětu  $i$ -té odrazné plochy do roviny kolmé ke směru přímých paprsků slunečního záření ( $\text{m}^2$ ),  $\rho_i$  je činitel odrazu  $i$ -té odrazné plochy (-),  $\psi_i$  je

činitel vazby  $i$ -té odrazné plochy s aktivní plochou fotočlánku (-),  $\beta_i$  je úhel, který svírá směr odražených paprsků od  $i$ -té odrazné plochy s normálou roviny fotočlánku ( $^\circ$ ).

V případě, optimálního návrhu a instalace koncentrátoru lze dosáhnout velikosti činitelů vazby  $\psi_i \rightarrow 1$ .

Z rovnice (1.13) vyplývá, že zářivý tok  $\Phi_{ek}$  slunečního záření dopadajícího na aktivní plochu fotočlánku může být při aplikaci koncentrátoru (1.13) i několikanásobně vyšší, než zářivý tok  $\Phi_{ep}$  přímého slunečního záření dopadající na totožný, optimálně instalovaný fotočlánek bez použití koncentrátoru stanovený z výrazu (1.12). Aby nedošlo k poškození fotočlánku, je důležité, že výkon záření, které dopadá na fotočlánek, nesmí překročit určitou dovolenou hodnotu stanovenou výrobcem, popřípadě experimentálně určenou pro daný fotočlánek.

Použitím koncentrátoru přímého slunečního záření lze zvýšit výkon záření dopadajícího na aktivní plochu fotovoltaicko-termického systému v podmínkách, kdy převažuje přímá složka slunečního záření (bez oblačnosti) a lze tak zajistit i dostatečný tepelný výkon termické části systému (která slouží jako chladič pro fotovoltaiku). Nedojde-li k překročení dovolených mezí zářivého toku dopadajícího na fotočlánek, je možné dosáhnout i odpovídajícího zvýšení elektrického výkonu fotovoltaického systému. Pro správnou funkci koncentrátoru je nutné použít systém natáčení koncentrátoru a fotočlánku [18] vyhodnocující změny dráhy Slunce po obloze.

Použitím koncentrátoru přímého slunečního záření v době, kdy je přímé sluneční záření potlačeno vlivy atmosféry a kdy převažuje záření difúzní, dochází k částečnému snížení výkonu slunečního záření dopadajícího na fotočlánek (vlivem zastínění části horního poloprostoru odraznými plochami koncentrátoru, příp. nevhodnou orientací fotočlánku v koncentrátoru – obr. 3.12 vpravo) a tím i ke snížení elektrického výkonu a k odstavení termické části systému v této době.

### 3.4 Vývojové trendy v oblasti fotovoltaických článků a modulů

Současný vývoj technologie naznačuje, že krystalický křemík zůstane nejdůležitějším materiálem pro výrobu fotovoltaických článků minimálně v následujících pěti letech, a to vzhledem k pokračujícímu snižování cen vstupního materiálu, snižování energetické náročnosti a dalšímu zdokonalování technologie a s ohledem na vysokou spolehlivost a životnost modulů s články z krystalického křemíku. Zároveň bude pokračovat rozvoj tenkovrstvých technologií, a to jak na bázi amorfního křemíku (případně Si-Ge), tak na bázi CdTe, nebo CIS. Podíl tenkovrstvých modulů na celkové produkci může dosáhnout v následujících pěti letech až 25%.

Zároveň probíhá intenzivní vývoj a výzkum dalších technologií fotovoltaických článků a modulů, jako jsou

- články s vícenásobnými pásy
- články využívající kvantových jevů v kvantových tečkách nebo kvantových jamách
- organické články
- Grätzlovy články (články na bázi nanočástic TiO<sub>2</sub>).

Všechny tyto technologie jsou vysoce perspektivní z hlediska budoucích možností realizace velmi levných fotovoltaických článků a modulů, jsou však v současné době stále ještě ve stádiu výzkumu, nebo vývoje. Nelze proto v následujících pěti letech očekávat výraznější rozšíření těchto technologií. Z hlediska dlouhodobého vývoje můžeme fotovoltaické články rozdělit následovně:

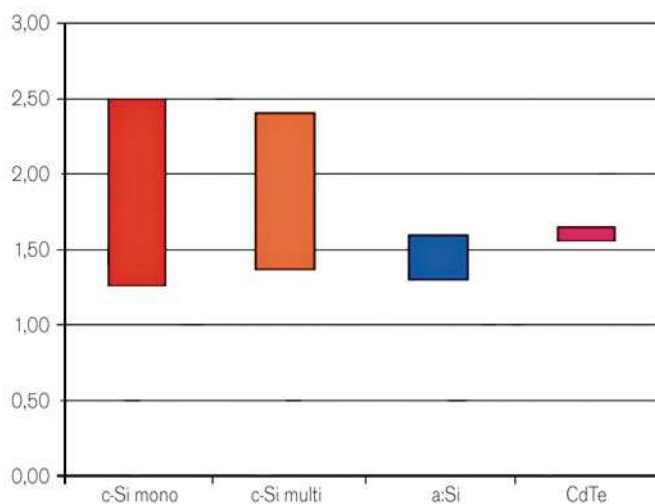
[6]

- články první generace
  - FV články se vyskytují nejčastěji z desek monokrystalického křemíku, které společně tvoří PN přechod. FV články se prodávají již od sedmdesátých let a to až do dnes, kde tvoří převážnou část trhu a to asi 90%. Jsou charakterizovány velmi dobrou životností při zachování účinnosti, ta se v sériové výrobě pohybuje od 14% do 17%. Při výrobě speciální, pro laboratorní účely, může účinnost dosahovat až 25 %. Nevýhodou je to, že pro výrobu se musí používat velké množství velmi čistého křemíku.
- články druhé generace
  - Zde dochází k výraznému snížení množství čistého křemíku. Zároveň se začínají používat jiné prvky než křemík. Nejčastěji jde o nahrazování polykrystalickým a amorfním křemíkem s podstatně tenčí vrstvou oproti předchozí generaci a to až 1000 krát. Snížení množství křemíku negativně ovlivňuje účinnost panelu (okolo 10%), na stranu druhou nám tenký profil přináší úsporu hmotnosti a zlepšení mechanických vlastností, zejména pružnosti. Dnes již lze i v komerčním sektoru zakoupit futuristické studie batohů a dalšího vybavení s integrovanými FV panely. Zajímavé řešení víceúčelovosti můžeme najít na tzv. FV foliích splňujících izolační požadavky pro ploché střechy se současnou výrobou elektrické energie.
- články třetí generace
  - Oblast, na které stále intenzivně probíhají výzkumné práce. Snaha o maximální využití energie dopadajících fotonů slunečního záření, nejčastěji ve formě několikanásobných přechodů tenkých vrstev. Sledovat lze také snahu o použití jiné metody oddělování nábojů, než PN přechody. Fotoelektrochemické (fotogalvanické) články nebo použití nanostruktur ve formě uhlíkových tyček a trubiček, nebo kvantových teček nanesených na vhodné podložky. Cíleně je zde pak možno ovlivňovat elektrické a optické vlastnosti pro nejefektivnější využití.
- články čtvrté generace
  - Posledním vývojovým stupněm rozumíme vícevrstvé profily plně využívající širokého slunečního spektra. Vrstvení profilů je založeno na principu naladění vrstev na různé vlnové délky. Vlnová délka záření se často mění. Při dopadu slunečního záření na vrstvu, která ho nedokáže využít, pak dochází k propuštění záření k vrstvě, jejíž vlnová délka odpovídá vhodnému využití.

### 3.4.1 Články z krystalického křemíku

Při porovnávání jednotlivých technologií se obvykle vychází z vysoké energetické náročnosti výroby krystalického křemíku potřebné čistoty.

Jedním ze základních trendů ve vývoji fotovoltaických článků je snižování tloušťky destiček na 200 – 150  $\mu\text{m}$ , což vede spolu se zvyšováním účinnosti článků k výraznému zvyšování výkonu produkovaného stejným množstvím křemíku. Kromě toho bylo dosaženo snížení spotřeby energie při přípravě výchozího materiálu. V letech 2000 až 2007 došlo ke snížení spotřeby energie potřebné pro výrobu 1kg polykrystalického křemíku s dostatečnou čistotou pro solární články (SOG) o 46% a došlo k výraznému poklesu ceny křemíku (z 500 USD/kg v roce 2008 na současných 55 USD/kg). Postupné zdokonalování výrobní technologie (spolu s efektem hromadné výroby) vede k výraznému snižování výrobní ceny modulů, která v současné době klesla na úroveň okolo 1,5 €/Wp. Zároveň probíhá vývoj v oblasti zkvalitňování technologických procesů tak, aby se účinnost zvyšovala ze současných 12 – 17% na úroveň 18 – 22%. Porovnání cen jednotlivých typů modulů na začátku roku 2010 je vidět na obrázku 3.19.



**Obr. 3.19: Porovnání cen různých typů FV článků [5]**

Na druhé straně pokles ceny SOG křemíku vede k tomu, že ceny modulů (vyjádřených cenou za 1 Wp) vyráběných různými technologiemi se liší relativně velmi málo. [16] Nízká cena modulů z krystalického křemíku může zpomalit růst produkce tenkovrstvých modulů.

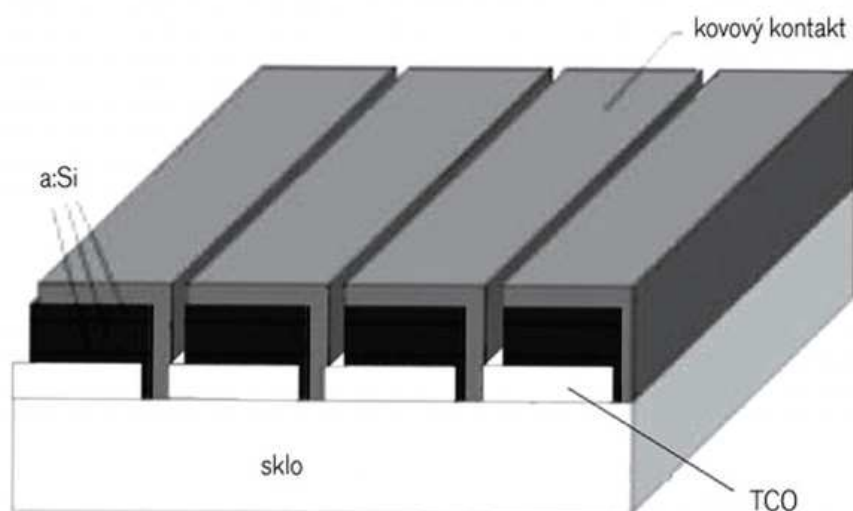
V současné době probíhá intenzivní vývoj a výzkum dalších technologií fotovoltaických článků a modulů, jako jsou například články s vícenásobnými pásy, články využívající kvantových jevů v kvantových tečkách nebo kvantových jamách, organické články a Grätzlovy články (články na bázi nanočástic  $\text{TiO}_2$ ). Všechny tyto technologie jsou vysoce perspektivní z hlediska budoucích možností realizace velmi levných fotovoltaických článků a modulů, jsou však v současné době stále ještě ve stádiu výzkumu nebo vývoje. Jejich výraznější rozšíření nelze proto v následujících několika letech očekávat.

### 3.4.2 Tenkovrstvé moduly

V oblasti tenkovrstvých modulů probíhá vývoj především směrem ke zlevnění technologie (např. zvýšení depoziční rychlosti jednotlivých vrstev), zvýšení účinnosti a stability článků a modulů ze současných 6 – 10% na úroveň 10 – 15%. To klade velké nároky na technologická zařízení, která představují hlavní část nákladových položek. V oblasti tenkovrstvých technologií je velký potenciál ke snížení ceny modulů, vzhledem k nižší účinnosti je však výsledná cena fotovoltaických systémů prakticky stejná v porovnání s FV systémy realizovanými z krystalického křemíku. Nicméně, v současné době jsou budovány relativně velké výrobní kapacity a podíl produkce tenkovrstvých článků má rostoucí tendenci.

V tenkovrstvé technologii nejsou realizovány jednotlivé FV články, ale celý modul v sekvenci technologických operací. Na nosnou podložku (obvykle sklo) je nejprve deponována vrstva TCO (transparentní vodivý oxid) a laserem jsou odděleny oblasti jednotlivých článků ve tvaru proužků (odstranění TCO). Následuje plasmatická depozice tenkovrstvého článku a odstranění struktury článku laserem v proužku těsně přiléhajícím k hranici vymezené prvním laserovým řezem. Poté je deponován kovový kontakt (obvykle naprašováním). Následuje třetí řez laserem, který odstraní proužek kovového kontaktu tak, aby vznikla struktura modulu se sériově zapojenými články (obrázek 3.20). Na zadní stranu modulu je přilaminována krycí vrstva (sklo nebo polymer) a vývody svedeny do svorkovnice. Účinnost tenkovrstvých modulů je v rozmezí 6 až 10%.

Tenkovrstvé články a moduly mohou být realizovány rovněž na ohebných fóliích, což zjednodušuje některé střešní aplikace. Problémy se stabilitou deponovaných vrstev a vysoká cena potřebných technologických zařízení vedly k tomu, že ke zvyšování podílu tenkovrstvých FV modulů na celkové produkci došlo až po roce 2006, kdy se projevil nedostatek křemíku způsobený prudkým nárůstem fotovoltaických aplikací. Nicméně v současné době je depozice stabilních tenkých vrstev technologicky zvládnuta na ploše modulu až 5 m<sup>2</sup> a dochází k postupnému nárůstu jejich produkce.



**Obr. 3.20: Struktura tenkovrstvého fotovoltaického modulu [15]**



### 3.4.3 Rozdělení fotovoltaických systémů podle zapojení

Fotovoltaické systémy můžeme z hlediska aplikace rozdělit na tři základní typy:

- autonomní systémy,
- hybridní systémy s akumulací,
- systémy přímo spojené se sítí bez akumulace.

#### 3.4.3.1 Autonomní a hybridní systémy

Autonomní systémy (nebo také systémy Grid-off) se používají převážně v místech, kde není dostupná veřejná elektrorozvodná síť. Tyto systémy se skládají z fotovoltaických modulů, akumulátorové baterie a ochranného obvodu, který chrání akumulátorovou baterii před nadměrným vybitím nebo přebitím. Větší systémy mohou obsahovat i měnič napětí. Blokové schéma autonomního fotovoltaického systému je na obrázku 3.21.

Autonomní systémy využívají speciální akumulátorové baterie, konstruované pro pomalé nabíjení i vybíjení. Optimální nabíjení a vybíjení akumulátorů je zajištěno regulátorem dobíjení. K ostrovnímu systému lze připojit spotřebiče napájené stejnosměrným proudem (napětí systému bývá zpravidla 12 nebo 24 V), případně běžné síťové spotřebiče 230 V/~50 Hz napájené přes napěťový střídač. Tyto systémy mají uplatnění například jako zdroj elektrické energie pro chaty a další objekty, napájení dopravní signalizace, telekomunikačních zařízení nebo monitorovacích přístrojů v terénu, u zahradního osvětlení a světelné reklamy.



**Obr. 3.21: Blokové schéma systému Grid-off [10]**

Hybridní fotovoltaický systém je v podstatě kombinací klasické síťové elektrárny (Grid-on) a ostrovního systému (Grid-off). Oproti systémům Grid-on (viz. následující kapitola) mají hybridní fotovoltaické systémy výhodu v maximálním využití vyrobené energie v místě výroby, ať už ve formě elektrické energie či pro přitápění, ohřev TUV, klimatizace, zavlažování, provoz bazénu nebo jiných předem určených spotřebičů, aniž by bylo zbytečně dodáno příliš mnoho energie do distribuční sítě.

Další nespornou výhodou hybridního fotovoltaického systému je již integrovaná funkce pro využití přebytečné energie ve výkonových špičkách, kdy inteligentní hybridní měnič již dnes dokáže přesměrovat přebytečnou energii v reálném čase či s řízeným zpožděním do Vámi předem určených, energeticky náročných spotřebičů. Příklad hybridního fotovoltaického systému je na obrázku 3.22.



**Obr. 3.22: Hybridní fotovoltaický systém [11]**

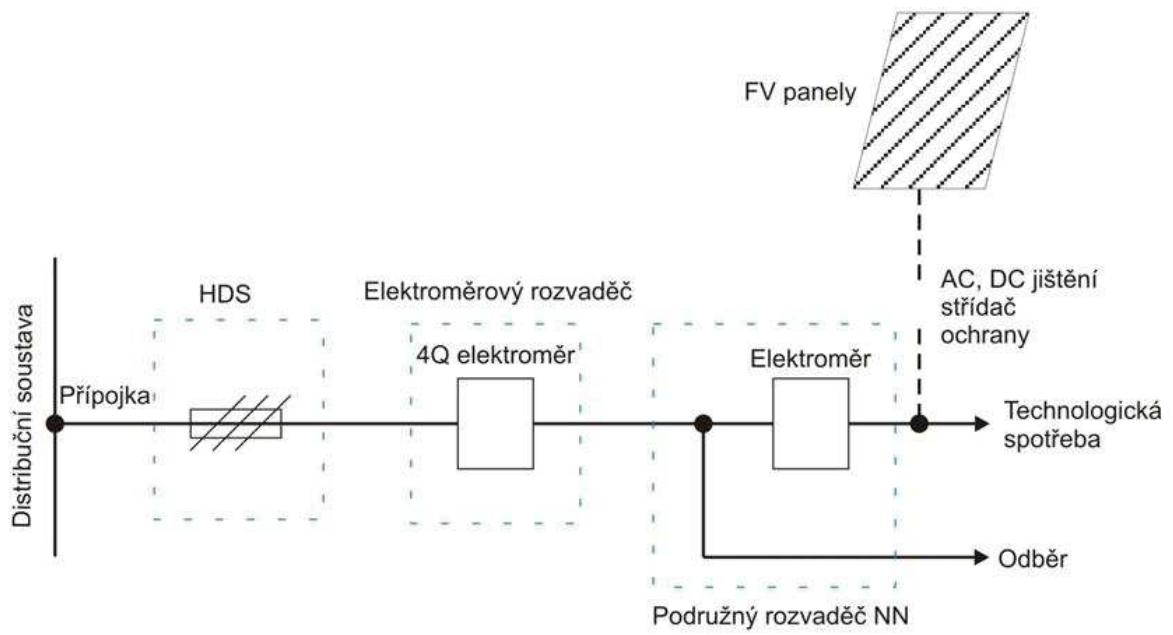
### 3.4.3.2 Systémy připojené k elektrické síti (Grid-on)

Výhodou systémů Grid-on je skutečnost, že veškerá vyrobená elektrická energie se na rozdíl od systémů Grid-off zpracuje. Tyto systémy se obvykle skládají z většího množství fotovoltaických modulů, měniče napětí (invertor), zařízení pro měření a regulaci a síťové ochrany. Připojení fotovoltaických systémů do elektrizační soustavy může být provedeno ve dvou základních variantách, jak je zobrazeno na obrázku 3.23 a 3.24.

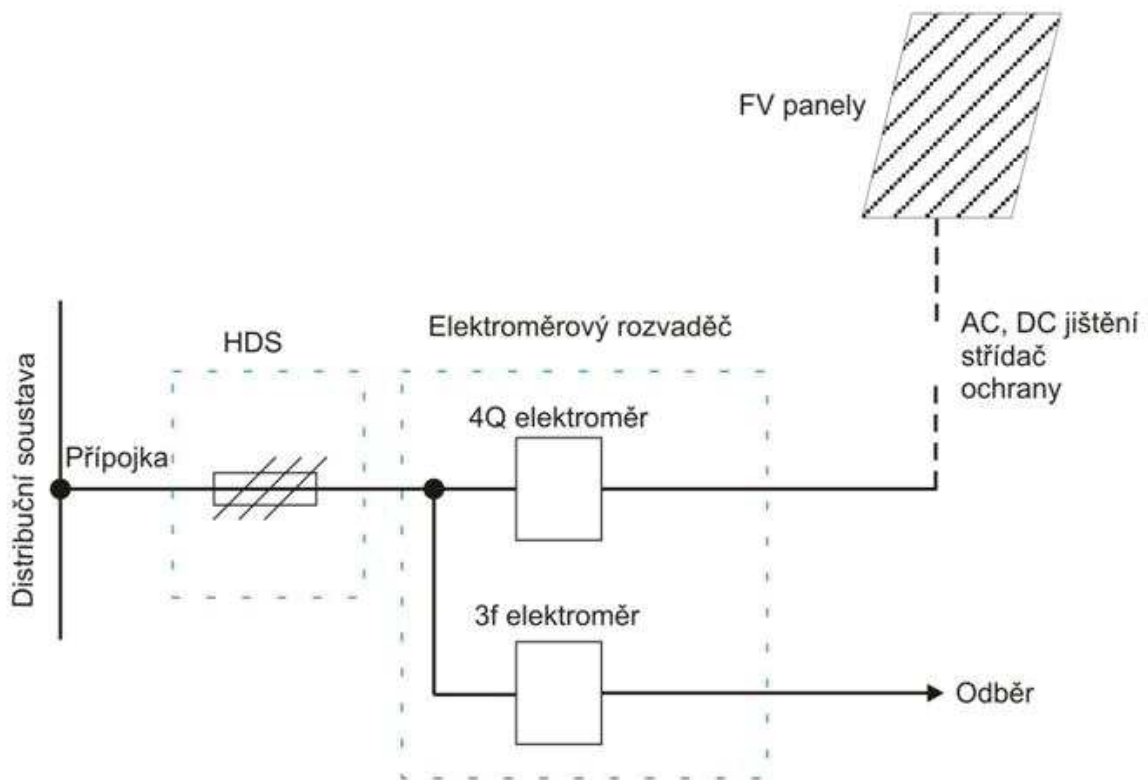
Obrázek 3.23 představuje systém zapojení v tzv. Zeleném bonusu. Za hlavní domovní skříň (HDS) je osazen čtyřkvadrantový elektroměr (4Q) a za ním je napojený domovní rozvod a elektrárna pomocí dalšího elektroměru. Toto zapojení se využívá v případech, kdy je převážná část vyrobené elektrické energie využita pro vlastní spotřebu objektu s instalovaným fotovoltaickým systémem.

Obrázek 3.24 představuje systém zapojení v tzv. Výkupním tarifu. Fotovoltaická elektrárna je v tomto případě připojena mezi stávající elektroměr a hlavní domovní skříň (HDS) pomocí čtyřkvadrantového elektroměru. Tento systém zapojení se využívá v případech, kdy je veškerá vyrobená elektrická energie dodána výrobcem do elektrizační soustavy.

Na obytné domy se obvykle instalují systémy s výkonem v rozmezí 1 – 10 kWp. Pro investory jsou však mnohem zajímavější systémy instalované na střechy větších bytových nebo nebytových komplexů, popřípadě instalace na volném prostranství (20kWp až jednotky MWp).



Obr. 3.23: Zapojení systému pro vlastní spotřebu [15]



Obr. 3.24: Zapojení systému pro dobývku do sítě [15]

Měření dodané a spotřebované elektrické energie je rozdílné pro systémy do 20 kWp a nad 20 kWp. U systémů do 20 kWp se pro určení dodávky a spotřeby využívá přímý čtyřkvadrantový elektroměr. Pro systémy nad 20 kWp je měření spotřeby a dodávky zajištěno následovně:

- nepřímé měření dodávky 4Q elektroměrem na NN straně transformátoru (do 600 kVA),
- nepřímé měření dodávky 4Q elektroměrem na VN straně transformátoru,
- samostatné měření spotřeby.

### 3.5. Návrh FV elektráren, dimenzování jednotlivých komponent

Při návrhu fotovoltaických systémů je potřeba dbát především na bezpečnost a bezporuchovost provozu, minimální požadavky na údržbu, maximalizaci energetického zisku a minimalizaci ztrát energie. Základním kontrolním kritériem pro hodnocení provozu fotovoltaické elektrárny je její provozní výkonnost ( $PR$ ), kterou můžeme definovat následující rovnicí:

$$PR = \frac{E}{[(G_E - U_0) \cdot A \cdot E_{ffm}]} \quad (\%) \quad (1.14)$$

kde:

- E..... celková vyrobená elektrická energie (Wh)
- $G_E$ ..... celková dopadající energie slunečního záření ( $\text{Wh}\cdot\text{m}^{-2}$ )
- A..... celková plocha FV panelů ( $\text{m}^2$ )
- $E_{ffm}$  ..... účinnost FV panelů dle výrobce (%)
- $U_0$ ..... celkové množství energie slunečního záření, kterou není možno invertovat na elektrickou energii ( $\text{Wh}\cdot\text{m}^{-2}$ )

Každá fotovoltaická elektrárna umístěná ve venkovním prostředí by měla být vybavena ochranou proti přepětí a zásahu bleskem, a to jak na straně DC, tak na straně AC. Z hlediska minimalizace ztrát ve vedení nemusí být vždy výhodné minimalizovat úseky stejnosměrného vedení. Především u systémů s vysokým instalovaným výkonem se můžeme setkat s rozsáhlými rozvody na DC straně s napětím až 1000 V.

#### 3.5.1 Příprava a stavba fotovoltaické elektrárny

Prostup výstavby fotovoltaické elektrárny lze rozdělit do několika následujících kroků: [12]

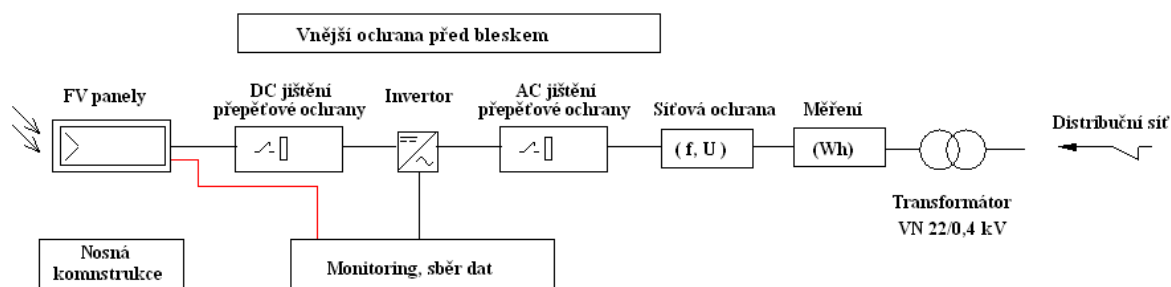
- odborná prohlídka technika na místě instalace
  - zjištění využitelné plochy, ověření, zda místo není stíněné, kontrola možnosti uchycení a kotvení konstrukcí, nosnost střechy, možnosti provedení kabelových tras a místo připojení výroby
- předběžný náčrt technického provedení na základě prohlídky a stavebních výkresů a určení instalovaného výkonu podle technických možností a finančních představ investora

- podání žádosti o připojení lokálnímu distributorovi elektrické energie
- vyžádání souhlasu všech majitelů objektu, instaluje-li se FVE na budovu nebo všech majitelů sousedních pozemků a obce při instalaci FVE na volnou plochu
- vyhotovení studie připojitelnosti
- vypracování projektové dokumentace a vyřízení stavebního povolení

### 3.5.2 Technické řešení FVE

Obecně lze říci, že téměř 80% celkových pořizovacích nákladů na fotovoltaický systém tvoří fotovoltaické panely, invertory a nosná konstrukce. Je tedy vždy velmi důležité najít takové technické řešení, které bude pro dané místo a typ instalace poskytovat maximální využitelnost pro investora. Jednotlivé komponenty fotovoltaické elektrárny jsou vidět na obrázku 3.25. Jednotlivé instalace můžeme rozdělit podle tří základních ukazatelů:

- instalovaného výkonu
  - systémy do 100 kWp
    - invertory malých výkonů (1,5 – 8 kW)
  - systémy nad 100 kWp
    - centrální invertory s výkonem 40 – 1000 kW
- nosné konstrukce
  - pevné (statické) systémy
  - natáčecí systémy
    - jednoosé
    - dvouosé
- umístění
  - střechy budov – pevné systémy
  - integrace do plášťů budov
  - instalace na volných plochách



**Obr. 3.25: Komponenty fotovoltaického systému [15]**

Výchozím bodem při návrhu fotovoltaické elektrárny je definice jejího využití. Při stanovení optimální velikosti instalovaného výkonu elektrárny velmi záleží, jaké jsou primární požadavky investora - jestli je hlavní požadavek "dostat na střechu co nejvíc", nebo

například "optimalizovat elektrárnu tak, aby co nejvíc vyráběla pro vlastní spotřebu objektu". V prvním případě je maximální velikost elektrárny dána velikostí střechy a od roku 2011 také faktickým legislativním omezením, které dovoluje instalaci elektráren do velikosti 30 kWp. [11]

V případě optimalizace elektrárny na efektivitu spotřeby v místě výroby (a tedy i na nejlepší návratnost investice) je potřeba počítat s tím, že čím větší bude výroba (a tedy velikost) elektrárny v poměru ke spotřebě objektu, tím menší procento z elektřiny vyrobené elektrárnou bude v místě využito (přebytek pak bude dodán do distribuční sítě). V reálné situaci závisí také na typu spotřeby objektu - optimální je stav, kdy hlavní spotřeba v objektu je vyžadována v průběhu dne (např. školy, výrobní haly, administrativní budovy apod.). V případě rodinných domů, kdy je spotřeba směřována spíše do brzkých ranních a pozdních odpoledních a večerních hodin, je situace vyvážené výroby a spotřeby trochu komplikovanější. Tuto bilanci vylepšují víkendy, topení (např. tepelné čerpadlo, přímotopy), které pracují i přes den a další "denní" spotřebiče (např. klimatizace, ohřev bazénu a pod.). Také je možno část spotřeby přeměřovat (posunutí startu myčky, pračky, apod.) a tak výsledný poměr zlepšit.

### **3.5.3 Výběr a návrh konfigurace fotovoltaických panelů**

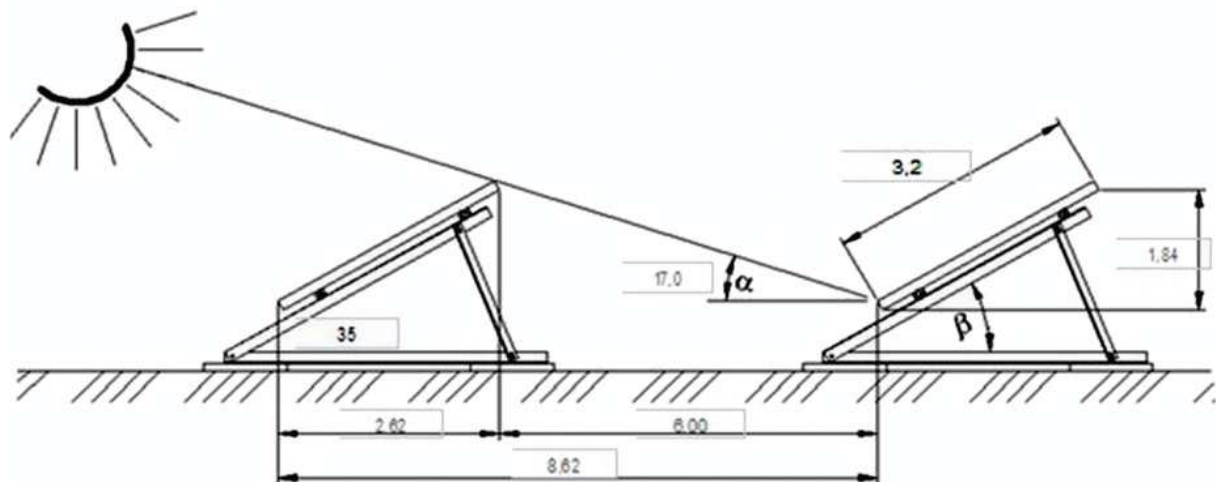
Z hlediska technického řešení neexistuje jediné univerzální ideální provedení. Optimální návrh fotovoltaické elektrárny vždy vychází ze zkušeností jednotlivých projektantů. Obvykle jsou využívány fotovoltaické panely s výkonem 160 – 240 Wp. V ideálních podmínkách mají panely obvykle hodnotu výstupního stejnosměrného napětí 40 V a proud 5 A.

#### **3.5.3.1 Návrh orientace a rozložení panelů**

Při návrhu fotovoltaické elektrárny je důležitá správná orientace fotovoltaických panelů. Pro maximální využití energie slunečního záření je ideální orientace panelů směrem k jihu. Odklon panelů o několik stupňů směrem na jihozápad nebo na jihovýchod má pouze minimální vliv na celkovou vyrobenou energii. Obecně se uvádí, že při změně orientace do 20° od jižního směru, je snížení výkonu elektrárny do 5%. V případě orientace panelů směrem na západ nebo východ je pokles výroby výraznější, a to až 25%. [11]

Ideální sklon pevně instalovaných panelů v našich zeměpisných šířkách je okolo 33°. Jde o kompromis mezi výtěžností elektrárny při Slunci nízko nad horizontem (zimní období) a vysoko na obloze (letní období). I zde platí, že rozdíl v instalaci mírně odlišné od optimální polohy má pouze malý negativní vliv na celkovou energetickou výtěžnost. Při instalaci v rozmezí 10°- 60° je pokles výkonu do 10%.

Vyšší pokles výkonu bude při osazení panelů svisle (např. na fasádu), a to cca 25-30%. Uvedené parametry platí pro panely vyrobené z krystalického křemíku. Panely amorfní mají obecně nižší účinnost, na druhé straně nejsou tak citlivé na potřebu přímého slunečního záření a např. při instalaci na svislou stěnu mohou při stejné ploše dodávat obdobný výkon jako polykrystalické nebo monokrystalické panely.



**Obr. 3.26: Dimenzování rozstupů mezi panely [15], [2]**

Z uvedených informací vyplývá, že při optimalizaci fotovoltaického systému pro zimní podmínky (např. Grid-off systémy využívané pro akumulaci energie) je optimální umístění panelů v poloze téměř svisle ( $\Rightarrow$  kolmo na paprsky ze slunce nacházejícího se nízko nad horizontem).

Při stavbě fotovoltaické elektrárny na volném prostranství nebo na ploché střeše je velmi důležité stanovit optimální rozestupy mezi jednotlivými řadami panelů. Tyto rozestupy se obvykle určují pro nejhorší možný případ, což je situace, kdy je Slunce nejnižší nad obzorem. Na našem území dopadají sluneční paprsky v zimním období na zemský povrch pod úhlem cca  $\alpha = 17^\circ$ . Na obrázku 3.26 je vidět potřebné rozmístění panelů právě při uvedených podmínkách.

Další důležitou věcí při návrhu fotovoltaické elektrárny je eliminace případného částečného zastínění způsobeného stromy, okolními budovami, sloupy elektrického vedení apod. I částečné zastínění panelů může mít za následek citelné snížení energetických zisků, zvláště v případě, že by se jednalo o zastínění pravidelně se opakující, se kterým nebylo v průběhu návrhu FVE kalkulováno.

### 3.5.3.2 Nosné a konstrukční prvky

Nezanedbatelnou částí FVE je bezesporu nosná konstrukce pro panely. Konstrukční systémy se dají rozdělit podle typu instalace na:

- Konstrukce pro sedlové střechy
  - Vhodná pro malé instalace na rodinné domy se sedlovou střechou se sklonem přibližně  $35^\circ$  a orientací k jihu nebo jihozápadu. Nosným prvkem zde jsou hliníkové profily přichycené speciálními háky ke konstrukci střechy (obrázek 3.27). K profilům jsou připevněny FV panely. Tato konstrukce je snad vůbec nejpoužívanější zejména pro její jednoduchost, snadnou montáž a nízkou cenu.
- Konstrukce pro ploché střechy
  - Tyto konstrukce jsou většinou tvořeny ocelovými pozinkovanými profily trojúhelníkového tvaru, které jsou vzájemně „zavětrované“ a podélně spojené

hlíníkovým profilem pro uchycení FV panelů. Konstrukce se ke střeše připevňuje buď napevno chemickými kotvami, nebo se zatíží betonovými bloky či dlaždicemi (obrázek 3.27).

- Konstrukce pro volná prostranství
  - Stejně řešení jako u plochých střech se používá u větších elektráren postavených na volných prostranstvích s tím rozdílem, že konstrukce se spojuje pevně se zemí a to buď závrtnými šrouby, pozinkovanými profily zatlačenými do země, nebo betonovými základy (obrázek 3.28).
- Polohovatelné systémy
  - Dalším možným, a co do výtěžnosti, nejlepším způsobem pro uchycení FV panelů jsou polohovatelné systémy tzv. trackery (obrázek 3.29). Tracker automaticky otáčí a naklání panely ke Slunci dle jeho astronomické dráhy a umožňuje tedy maximální výtěžnost z FVE. Zkušenosti hovoří o 30-35% nárůstu výtěžnosti oproti běžným pevným instalacím. Nevýhodou ovšem zůstávají zvýšené počáteční investiční náklady, vlastní spotřeba systému a nutná údržba.



**Obr. 3.27: Možné varianty uchycení panelů na sedlové střeše [15], [2]**



**Obr. 3.28: Uchycení panelů na ploché střeše a volném prostranství [15], [2]**





**Obr. 3.29: Polohovatelný systém pro uložení panelů [15]**

### 3.5.4 Invertory

Fotovoltaické panely vyrábí pouze stejnosměrný proud, který je nutno změnit na proud střídavý, aby bylo možno připojit elektrárnu do elektrické rozvodné sítě. Zařízení umožňující tuto přeměnu se nazývá měnič nebo tzv. inverter. Používané invertory jsou také schopny poskytovat informace o vlastní výrobě elektrické energie.

Inverter musí dodávat co nejvyšší výkon s minimem ztrát. To může být zajištěno odstraněním transformátoru s následným snížením tepelných ztrát a užitím zařízení pro sledování bodu maximálního výkonu (MPP), které změnou vstupního odporu zajišťuje optimální chod invertoru. Přifázování střídače (připojení energie z panelů do sítě) bývá plně automatizováno. Na životnost invertorů má mimo jiné vliv i konstrukční řešení - chlazení přirozenou cirkulací vzduchu bez použití ventilátoru. Pro konkrétní použití se vyrábějí invertory ostrovní a síťové.

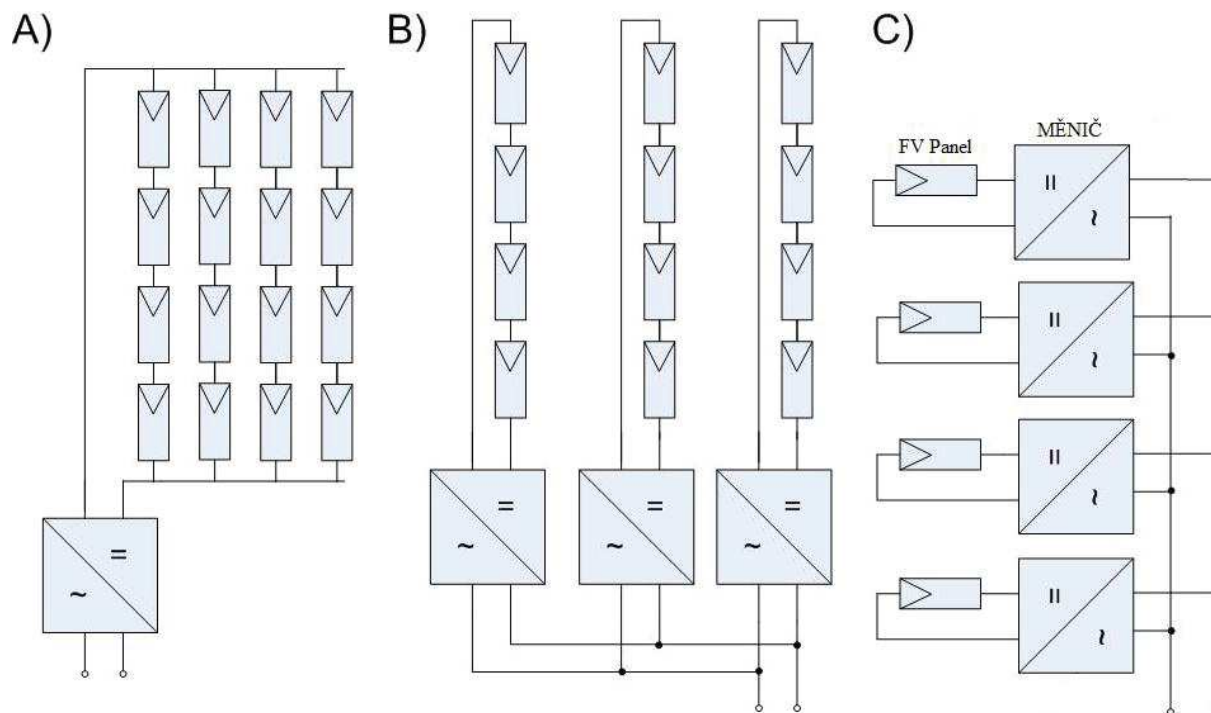
Ostrovní generují svůj vlastní kmitočet, který odpovídá kmitočtu v rozvodné síti ( $f = 50 \text{ Hz}$ ). Tak je možno použít v této síti běžné elektrické spotřebiče střídavého proudu.

Síťové měniče synchronizují svůj kmitočet a napětí s aktuálními parametry rozvodné sítě.

Z hlediska zapojení v systému FVE se invertory dělí na:

- modulové invertory (inverter je připojen pouze k jednomu FV modulu),
- řetězcové nebo stringové (každý inverter je připojen k několika FV panelům vzájemně propojeným do série, případně i paralelně)
- centrální invertory (připojené na stovky až tisíce FV panelů).

Příklady zapojení jednotlivých typů invertorů jsou na obrázku 3.30. S modulovými střídači (A) se setkáme velmi zřídka, výlučně u malých systémů. Středně velké elektrárny využívají řetězcových střídačů (B). V případě velkých elektráren se používá koncept jak velkých centrálních střídačů (C), tak i velkého množství řetězcových střídačů.



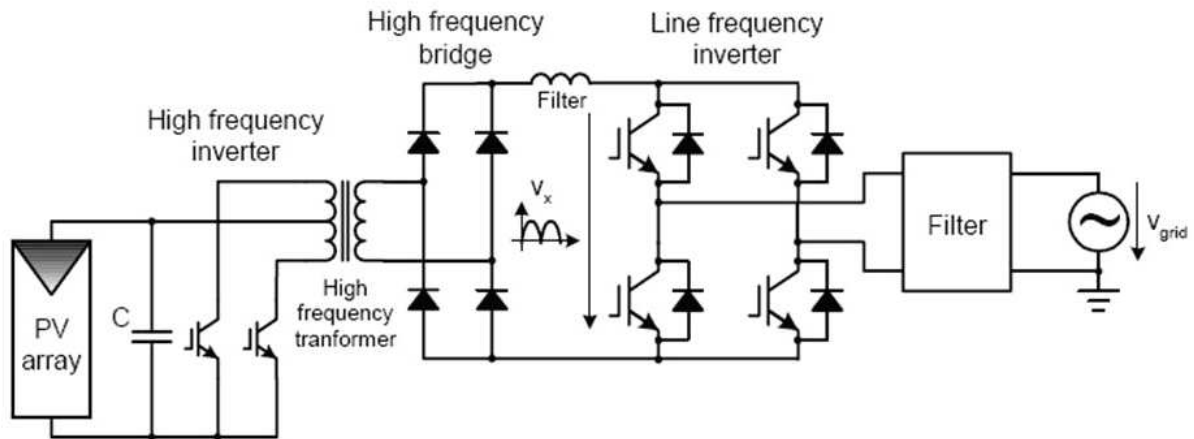
Obr. 3.30: Příklady zapojení invertorů [2], [14]

### 3.5.4.1 Základní parametry invertorů

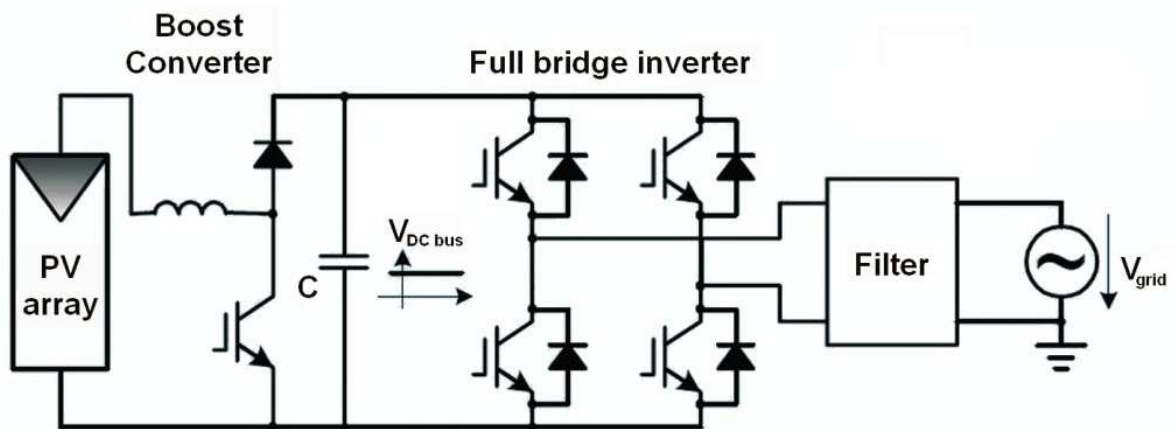
Při výběru vhodného invertoru je potřeba správně definovat jeho parametry. Mezi základní parametry invertorů patří:

- nominální výkon AC a DC strany,
- maximální vstupní napětí,
- rozsah napětí MPP trackeru,
- účinnost invertoru,
- vnitřní konfigurace
  - počet nezávislých MPP trackerů
  - počet výkonových stupňů
  - možnosti komunikace apod.
- maximální vstupní proud
- krytí IP

Příklady vnitřního zapojení invertorů jsou znázorněny na obrázku 3.31 a 3.32. Výhodou invertorů s transformátorem je galvanické oddělení a tím i vyšší bezpečnost a možnost použít fotovoltaické panely založené na tenkovrstvé technologii. Určitou nevýhodou jsou však vyšší ztráty a velká hmotnost. V porovnání provozní účinnosti dosahují invertory s transformátorem účinnosti o 1 – 2% nižší než invertory bez transformátoru.



Obr. 3.31: Vnitřní zapojení invertoru s transformátorem [2], [15]



Obr. 3.32: Vnitřní zapojení invertoru bez transformátoru [2], [15]

### 3.6. Prognózy současného stavu „konec solárního bohu v Čechách?“

Investoři, kteří si postavili v roce 2010 malé solární elektrárny, mají v současné době s regulačním úřadem (*otázka výkupní ceny*), a problémy s polostátní firmou ČEZ, protože tato firma jako monopolní odběratel je připojila až v roce 2011, za výkupní cenu 5,50 Kč/ kWh, proti původní ceně 12,40 Kč/ kWh. O zákonem garantované patnáctileté návratnosti investic si tyto firmy mohou nechat jen zdát.

Další problém, který si stát připravil je, dočasná srážková daň 26%. Problém s nižší výkupní cenou se týká kolem padesáti investorů z oblastí zemědělství, strojírenství a dřevovýroby. Většina těchto investorů si postavila vlastní solární elektrárny většinou do výkonu jedné megawatty. V tabulce **tab.3.4** jsou uvedeny základní údaje o částkách výkupních cen od roku 2006.

## Kolik dostávaly solární elektrárny v tzv. "Zelených bonusech" v Kč/MWh

Vzniklé 2006 až 2007	14310
2008	13952
2009	do 30kW 13014 / od 30kW 12912
2010	12055 / 11953
2011	do 30kW 6853/do 100kW 5190/nad 100kW 4773
2012	do 30kW 5334
do 30.6.2013	do 5kW 2460/ do 30kW 1880
od 1.7.2013	do 5kW 2040/ do 30kW 1480

V poslední době dochází ke stagnaci vývoje růstu výkonu solárních elektráren na současnou hodnotu cca 2100 MWe, přičemž počet solárních elektráren dosáhl čísla 21975.

O neprůhlednosti stavu v českém solárním byznysu vypovídá případ obří solární elektrárny, kterou stavěla neprůhledná firma Amun.Re, která se připojila před koncem roku 2010, za ještě velmi výhodných podmínek pokud se týká výkupních cen a „Zelených bonusů“, přičemž kolaudována byla až v roce 2011. Na těchto pár příkladech je vidět, že i tak ekologicky zajímavá technologie, se může stát rukojmím tvrdého byznysu, za spoluúčasti politiků.

### Fotovoltaika v roce 2013

Od ledna 2013 došlo k výraznému poklesu výkupní ceny za elektřinu vyrobenou z fotovoltaické elektrárny. Porovnáme-li to např. s rokem 2009, jedná téměř o desetinu této ceny.

- Pro Fotovoltaickou elektrárnu o výkonu do 5kW s připojením na zelený bonus je cena stanovena na **2,86 Kč/kWh**. Tato cena však bude od července 2013 snížena na 2,44 Kč/kWh.
- Pro Fotovoltaickou elektrárnu o výkonu nad 5kW s připojením na zelený bonus je cena stanovena na **2,28 Kč/kWh**. Tato cena však bude od července 2013 snížena na 1,88 Kč/kWh.

Ale i přes takto nízkou cenu je instalace FV zdroje stále návratná. Je tomu tak díky stále klesající ceně za komponenty fotovoltaické elektrárny.

Modelová cenová kalkulace Fotovoltaické elektrárny o výkonu 5kWp se zapojením do rozvodu v objektu (tzv. zelený bonus)

### *Fotovoltaická elektrárna cena*

*20ks panelů o výkon 250W, 3 fázový střídač Kostal piko 5,5- montáž v 1. polovině roku 2013*

- Vyřízení povolení FV systému na ČEZ (ČEZ řeší cca 2 měsíce)

- Zpracování projektové dokumentace, předání k odsouhlasení na ČEZ(ČEZ řeší cca 1 měsíc)
- Dodání technologie
- Montáž na střeše, propojení se střídačem umístěným v technické místnosti
- Napojení na elektroinstalační rozvod
- Zpracování revize, příprava podkladů pro licenci, podání žádosti o licenci (ERÚ řeší cca 1 měsíc)
- Předání licence na ČEZ se žádostí o první paralelní připojení výroby
- Celkem cena bez DPH **220 000,- Kč včetně montáže**
  - Celkový roční zisk vč. úspor cca 22 500,- Kč (při výkupní ceně 2,28 Kč/kWp a vlastní spotřebě cca 60%)
  - Návratnost investice cca 8,6 let

### 3.7 Otázky a úkoly

- 1). Světelné a infračervené záření Slunce je v oblasti vlnových délek 0,2 až 0.3mm. Vypočítejte kmitočet tohoto záření.
- 2). Popište ze kterých částí se skládá nitro Slunce, kde vzniká jeho energie , ze kterých složek se Sluneční záření skládá, jaká část záření se uplatní u fotovoltaických systémů.
- 3). Vysvětlete pojem sluneční konstanta, součinitel znečištění, jak je definován optimální úhel pro maximální využití slunečního záření v průběhu roku.
- 4). Vysvětlete princip funkce fotovoltaického článku, za jakých podmínek probíhá fotovoltaická přeměna energie.
- 5). Popište konstrukci fotovoltaických článků, typy solárních článků a jejich vlastnosti
- 6). Rozdělení fotovoltaických systémů, základní zapojení autonomních a hybridních systémů.
- 7). Vysvětlete problematiku návrhu FV elektráren, definujte pojem provozní výkonnost PR, na blokovém schématu vysvětlete funkci komponentů fotovoltaických systémů.
- 8). Jakou funkci plní obvod invertoru, jaké druhy invertorů se používají, uveďte příklady zapojení.
- 9). Popište ekonomickou rozvahu návrhu elektrovoltaiických systémů, vysvětlete pojem „zelený bonus“.
- 10). Vypracujte úvahu na téma“ Budoucnost OZEE v České republice , jak si představují svůj přínos pro ochranu životního prostředí ve svém okolí.“ ( *Moje budoucí bydlení* ).

- 11). Vypočítejte účinnost solárního panelu s plochou  $A = 1\text{m}^2$ , který dodává elektrický výkon  $P = 140\text{W}$  při zářivém slunečním výkonu  $E = 1\,000\text{W}/\text{m}^2$ .  
(Návod: prostudujte kapitolu 3.2.2)

### 3.8. Literatura

- [1] Hofman, J., *Měřicí systém pro sledování efektivitu fotovoltaického panelu*, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010, diplomová práce, vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.
- [2] Kolektiv autorů, *Navrhování a projektování fotovoltaických elektráren*, Odborná seminář ČKAIT, Czech RE Agency, 2008, FEI ČVUT Praha
- [3] Vojáček, A., *Solární články a jejich použití v senzorce a automatizaci*, 2005, dostupné z <http://automatizace.hw.cz/clanek/2005120501>, cit. 14.11.2011
- [4] Vaněk, J., *Studijní podklady pro předmět Alternativní zdroje energie*, 2010, Ústav elektrotechnologie VUT v Brně
- [5] Webové stránky portálu ASB – <http://www.asb-portal.cz/tzb/energie/fotovoltaicke-clanky-historie-a-soucasne-trendy-vyvoje-2262.html>, cit. 8.12.2011
- [6] Krejčí, T., *Vypracování studie připojitelnosti pro FV elektrárnu*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 59 s., bakalářská práce, vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Mastný, Ph.D.
- [7] Webové stránky společnosti EkoWATT – Centrum pro obnovitelné zdroje energie, – <http://www.ekowatt.cz/cz/informace/energie-slunce---vyroba-elektriny>, cit. 27.10.2010
- [8] Webové stránky společnosti Isolar – <http://www.isolar.cz/technologie.html>, cit. 27.10.2010
- [9] [ 5. Photon International, 5, 2010]
- [10] Webové stránky společnosti Solar-C, s.r.o. – <http://solarc.cz/thema/fotovoltaickesystemy/produkty/ostrovni-systemy-grid-off>, cit. 6.12.2011
- [11] Interní firemní materiály společnosti SUNLUX, s.r.o. – <http://www.sunlux.cz>
- [12] Wolf, P., *Fotovoltaické elektrárny – od návrhu po realizaci*, *Světlo 2009/4*, FCC Public, s.r.o., ISSN: 1212-0812
- [13] Šúri M., Huld T.A., Dunlop E.D. Ossenbrink H.A., *Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries*, 2007, *Solar Energy*, 81, 1295–1305 – <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>
- [14] Benda, V., Staněk, K., Wolf, P., *Fotovoltaické systémy – Učební texty k semináři*, 2011, VUT v Brně
- [15] Mastný, P., *Studijní podklady předmětu Malé zdroje elektrické energie*, 2011, Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně
- [16] Photon International, 5, 2010
- [17] Janíček, F. a kolektiv, *Obnovitelné zdroje energie 2 – Perspektivně premeny a technologie*, STU FEI Bratislava, 2010, ISBN: 978-80-98402-13-7
- [18] Cenka, M., *Obnovitelné zdroje energie*, FCC Public, 2001, Praha, Česká republika, ISBN: 80-901985-8-9
- [19] Webové stránky Ústavu elektroenergetiky VUT v Brně FEKT