

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Fotovoltaické systémy

Učební texty k semináři

Autoři:

Prof. Ing. Vítězslav Benda, CSc. (ČVUT v Praze)

Ing. Kamil Staněk (ČVUT v Praze)

Ing. Petr Wolf (Sunnywatt CZ, s.r.o.)

Datum: 15.4.2011

Centrum pro rozvoj výzkumu pokročilých řídicích a senzorických technologií CZ.1.07/2.3.00/09.0031

TENTO STUDIJNÍ MATERIÁL JE SPOLUFINANCOVÁN EVROPSKÝM SOCIÁLNÍM
FONDEM A STÁTNÍM ROZPOČTEM ČESKÉ REPUBLIKY

OBSAH

Obsah	3
1. Fotovoltaické články a moduly	5
1.1. Solární energie	5
1.2. Principy konstrukce fotovoltaických článků	10
1.3. Technologie fotovoltaických článků a modulů.	18
1.3.1. Fotovoltaické články a moduly z krystalického křemíku	18
1.3.2. Technologie tenkovrstvých fotovoltaických článků a modulů.	22
1.4. Současné trendy v oblasti fotovoltaických článků a modulů	25
1.5. Literatura ke kapitole 1	27
2. Komponenty a funkce FV systémů (P.Wolf)	29
2.1. Jednotlivé prvky FV systému	29
2.1.1. FV panel	29
2.1.2. Střídač	30
2.1.3. Komponenty pro elektroinstalaci FVE	33
2.2. Základní rozdělení FV systémů z hlediska provozu	33
2.2.1. Autonomní systémy	34
2.2.2. Systém pracující paralelně se sítí	34
2.2.3. Hybridní systém	35
2.3. Provedení FV systémů z hlediska typů konstrukce	35
2.4. Ochrana proti blesku a přepětí	36
2.5. Způsob připojení FV elektráren	37
2.5.1. Varianta využití v případě přímého výkupu	37
2.5.2. Varianta využití „zeleného bonusu“	38
2.6. Servis a monitoring solárních elektráren	39

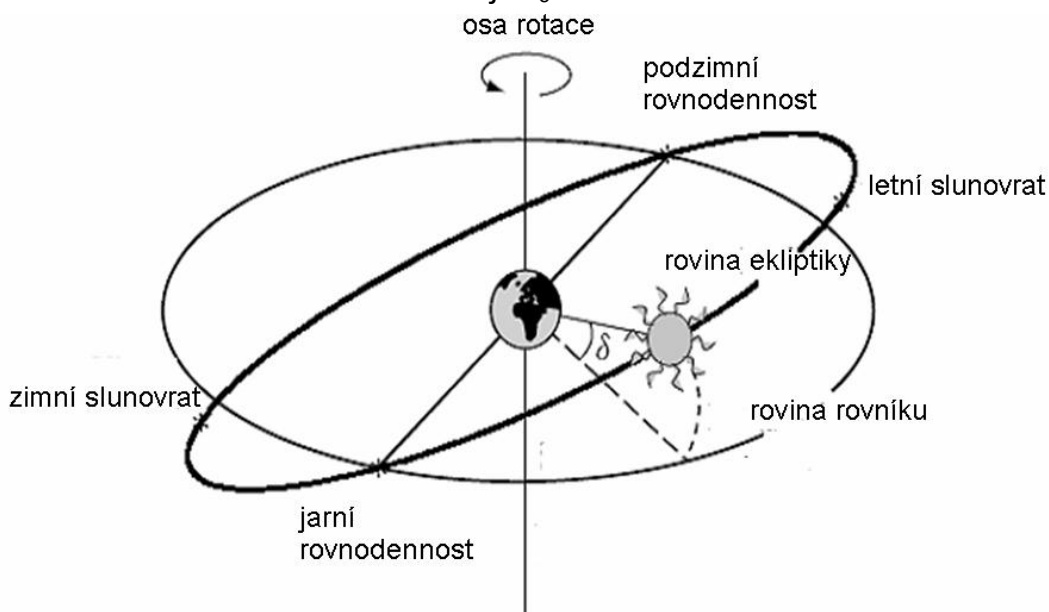
2.7.	Rozvoj fotovoltaiky a legislativní podmínky v ČR.....	40
3.	FV instalace na plochých střechách budov (K. Staněk).....	44
3.1.	Úvodem	44
3.2.	Vnitřní stínění a pokrytí střešní plochy.....	44
3.3.	Produkce elektrické energie.....	49
3.3.1.	Kotvení FV instalace na ploché střeše	52

1. FOTOVOLTAICKÉ ČLÁNKY A MODULY

1.1. Solární energie

Země obíhá okolo Slunce po téměř kruhové dráze s dobou oběhu 365 dní a deklinace (náklon její osy od normály roviny oběhu) je $\delta = 23,5^\circ$, jak je znázorněno na obr. 1.1.

Střední vzdálenost Země od Slunce je $r_0 = 1.496 \times 10^8$ km a střední intenzita



Obr.1.1. Oběžná dráha Země okolo Slunce

slunečního záření dopadajícího na povrch atmosféry je 1367 W/m^2 . Na povrch Země tak neustále dopadá záření o výkonu přibližně 180 000 TW.

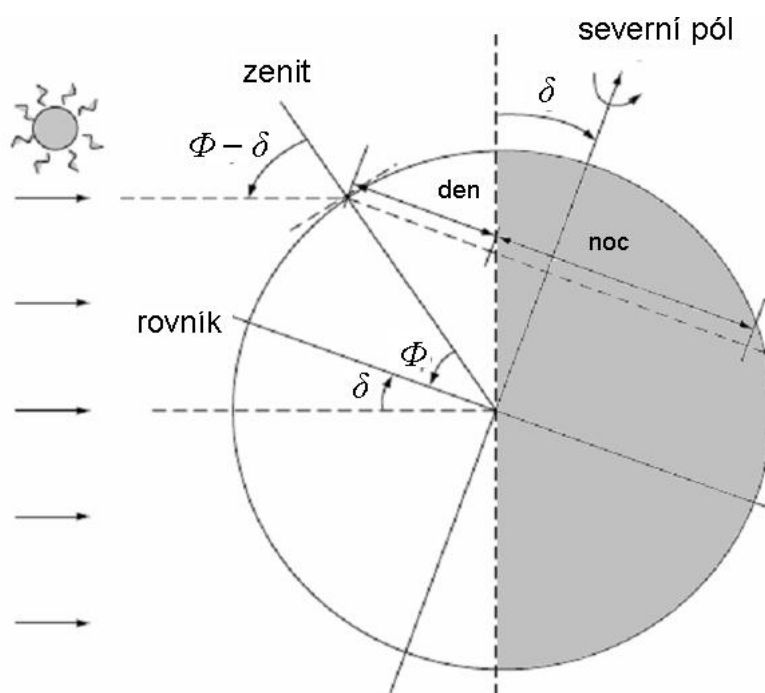
Použijeme-li model se statickou Zemí a pohyblivým Sluncem znázorněný na obr.1.2, maximální úhel paprsků dopadajících na horizontální rovinu v zeměpisné šířce ϕ v n -tém dni v roce je dán vztahem

$$\varphi_m = 90^\circ - \phi + \delta = 90^\circ - \phi + 23.5^\circ \times \sin\left(2\pi \frac{n-80}{365}\right)$$

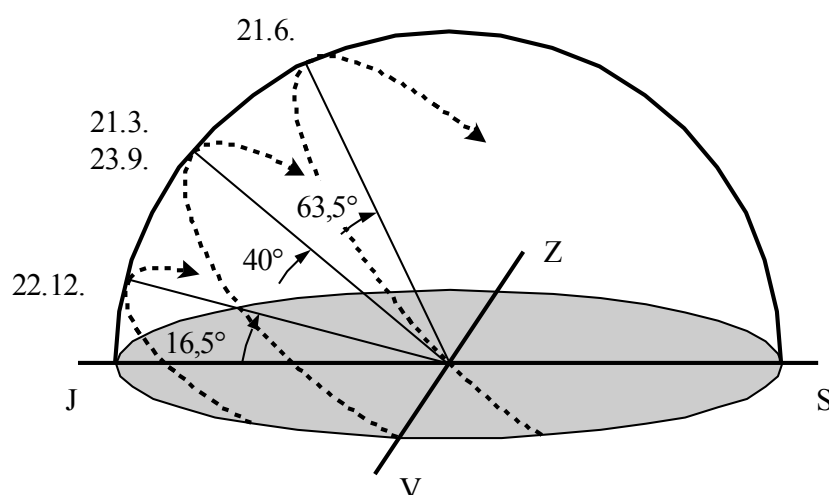
Pro podmínky České republiky, kde $\phi \approx 50^\circ$ s.š. je tedy v červnu maximální výška Slunce $\varphi_m = 63,5^\circ$, v době rovnodennosti $\varphi_m = 40^\circ$ a v prosinci pouze $\varphi_m = 16,5^\circ$, jak je znázorněno na obr. 1.3.

$$\varphi_m = 90^\circ - \phi + \delta = 90^\circ - \phi + 23.5^\circ \times \sin\left(2\pi \frac{n-80}{365}\right). \quad (1.1)$$

Pro podmínky České republiky, kde $\phi \approx 50^\circ$ s.š. je tedy v červnu maximální výška Slunce $\varphi_m = 63,5^\circ$, v době rovnodennosti $\varphi_m = 40^\circ$ a v prosinci pouze $\varphi_m = 16,5^\circ$, jak je znázorněno na obr. 1.3.



Obr.1.2. Úhel dopadu paprsků slunečního záření v závislosti na zeměpisné šířce



Obr.1.3. . Pohyb Slunce po obloze na 50°severní šířky

Intenzita dopadajícího záření a jeho spektrální složení je silně závislé na vlivu atmosféry. Tento vliv postihuje koeficient atmosférické masy (AM). Hodnota

AM je dána tloušťkou atmosféry a jejím složením při průniku záření, závisí tedy i na úhlu dopadajícího záření na povrch Země, který je vzájemnou polohou dan polohou Země a Slunce.

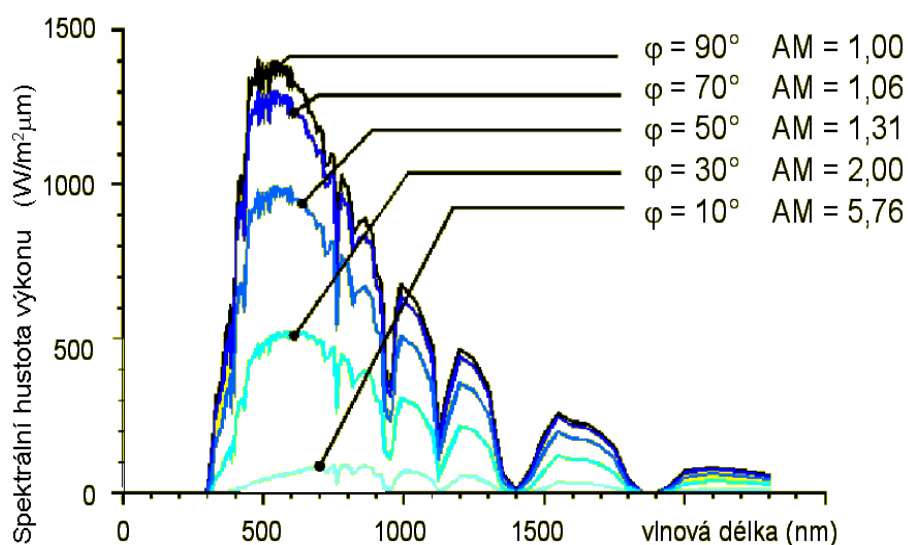
Označíme-li φ úhel mezi dopadajícím zářením a horizontální rovinou, je možno koeficient atmosférické masy vyjádřit ve tvaru

$$AM = \frac{1}{\sin \varphi} \quad (1.2)$$

a pro maximální intenzitu záření paprsků dopadající na povrch Země zhruba platí

$$B_{\max} = 1367 \times 0.7^{AM} \quad (1.3)$$

S úhlem dopadu slunečních paprsků se mění kromě energie také spektrum dopadajícího záření. Změna spektrální hustoty výkonu dopadajícího záření na úhlu dopadu (na úrovni hladiny moře) je znázorněna na obr.1.4.



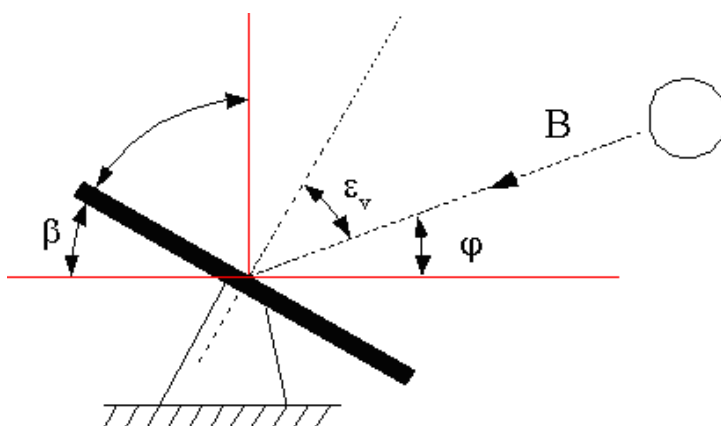
Obr.1.4. Vliv atmosférické masy na spektrum dopadajícího slunečního záření

Na rovinnou plochu orientovanou na jih, skloněnou o úhel β od horizontální roviny, dopadá záření paprsků o výkonu $B(t)$, jak je naznačeno na obr.1.5 a obr. 1.6.

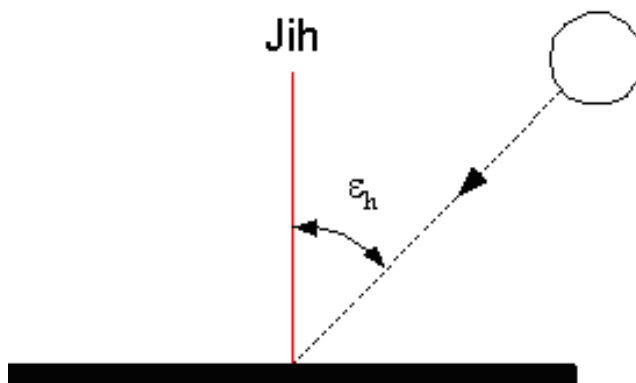
$$B(t) = 1367 \times 0.7^{\frac{1}{\sin \varphi(t)}} \cos \varepsilon_v(t) \cos \varepsilon_h(t). \quad (1.4)$$

Intenzitu a směr dopadajícího záření silně ovlivňuje oblačnost a čistota ovzduší. Část záření se při průchodu atmosférou mnohonásobně odráží a rozptýlí na nejrůznějších pevných i kapalných částicích obsažených v atmosféře. Vzniká tak difúzní záření o intenzitě D jehož spektrum odpovídá záření přímému. Část záření se může rovněž odrážet od sousedních ploch a představuje tzv albedo o intenzitě R . Nejčastěji se získává celková intenzita záření jako součet intenzit přímého, difúzního a odraženého záření dopadající na plochu odkloněnou o úhel α od jihu a o úhel β od horizontální roviny

$$G(\alpha, \beta) = B(\alpha, \beta) + D(\alpha, \beta) + R(\alpha, \beta) . \quad (1.5)$$



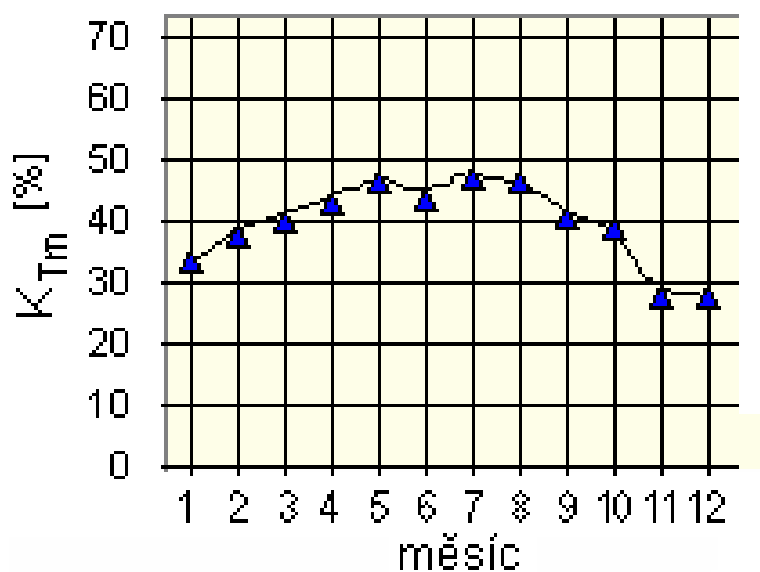
Obr.1.5 .Znázornění úhlu ε_v dopadajícího záření od optimálního vertikálního směru



Obr.1.6. Znázornění odchylky ε_h od optimálního směru (Jih).

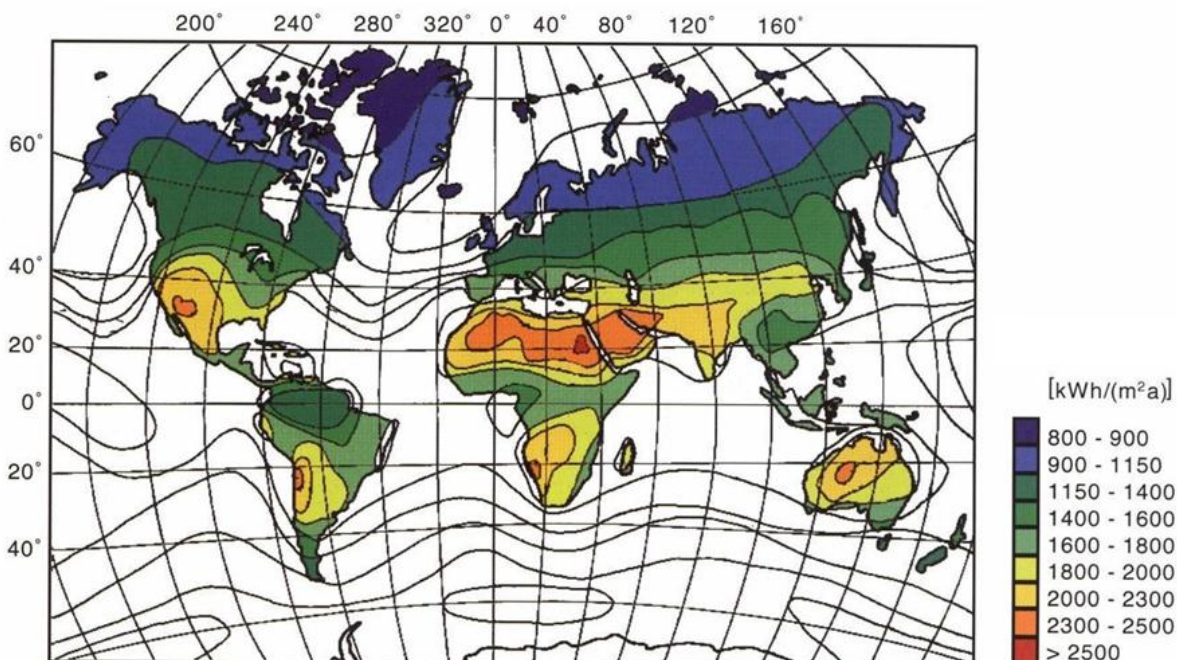
Intenzita záření je ovlivňována klimatickými podmínkami (oblačnost, prašnost, mlha apod.). Vliv oblačnosti je proměnný a může být každý den jiný. Proto se obvykle používá pro výpočty průměrná hodnota denní radiace v měsíci G_{dm} . Vliv oblačnosti udává index průzračnosti K_{Tm} , (počítaný pro každý měsíc), kde B_{0dm}

představuje průměrnou hodnotu radiace mimo atmosféru na stejné zeměpisné šířce.



Obr. 1.7. Příklad závislosti indexu průzračnosti v jednotlivých měsících v podmínkách ČR.

$$K_{Tm} = \frac{G_{dm}(0)}{B_{0dm}(0)} \quad (1.6)$$



Obr. 1.8. Mapa energie slunečního záření dopadajícího na 1 m² za rok

Hodnoty indexu průzračnosti se stanovují na základě dlouholetého průměru z dat meteorologických stanic i družicového pozorování.

Na základě těchto dlouhodobých pozorování se sestavují mapy roční dávky energie dopadajícího slunečního záření. Příklad mapy energie slunečního záření za jeden rok je na obr. 1.8.

1.2. Principy konstrukce fotovoltaických článků

Pokud na povrch materiálu dopadá světlo o intenzitě Φ_{in} , část světla o intenzitě Φ_0 vstoupí do objemu materiálu ($\Phi_0 = \Phi_{in} (1 - \mathcal{R})$, kde $\mathcal{R}$ je odrazivost povrchu). Při průchodu světla materiálem intenzita klesá se vzdáleností od povrchu

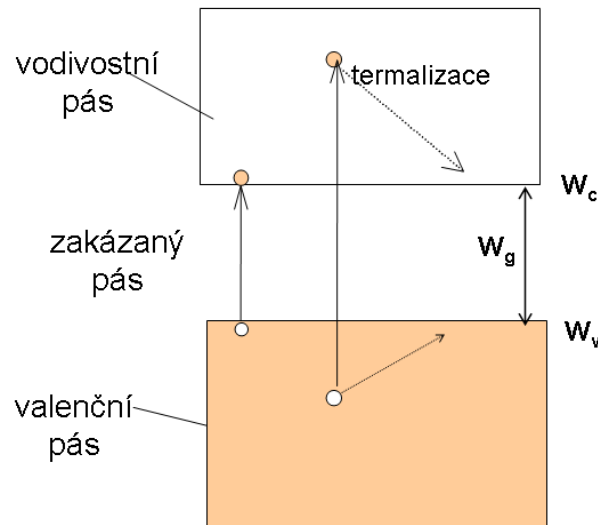
$$\Phi(x) = \Phi_0 \exp(-\alpha x), \quad (1.7)$$

kde α je absorpční koeficient, který závisí na vlnové délce λ dopadajícího záření. Absorpce fotonu znamená předání jeho energie částicím materiálu. Pokud dochází interakci fotonu s kmity mřížky nebo volnými elektrony, dochází ke zvýšení střední kinetické energie těchto částic a tedy ke zvýšení teploty. U materiálů s kovalentní vazbou může při interakci fotonu s dostatečně vysokou energií dojít k uvolnění elektronu z vazby. U polovodičů tak vzniká pár elektron – díra; oba typy nosičů náboje se mohou pohybovat v materiálu a přenášet náboj. Pokud je absorbován foton o energii větší než šířka zakázaného pásu W_g (minimální vazební energie), nadbytečná část energie se interakcí s mřížkou přemění na teplo (tzv. proces termalizace), jak je znázorněno na obr. 1.9.

Využití energie fotonů slunečního spektra ke generaci nosičů v závislosti na šířce zakázaného pásu materiálu je znázorněno na obr. 1.10. Závislost absorpčního koeficientu $\alpha(\lambda)$ na vlnové délce dopadajícího záření je spojena se strukturou materiálu.

Elektron se může vrátit zpátky do neobsazeného stavu ve vazbě, v takovém případě mluvíme o rekombinaci elektronu a díry.

Ve vzdálenosti x pod povrchem je generováno za jednotku času G párů elektron-díra. Vznikne – li při interakci β párů elektron-díra, pak pro záření s vlnovou délkou λ je generace nosičů dána vztahem



Obr. 1.9. Znáznornění procesu termalizace při absorpci fotonu s velkou energií

$$G(\lambda; x) = \left(\frac{d\Delta n}{dt} \right)_{gen} = \alpha(\lambda)\beta(\lambda)\Phi(\lambda; x) = \alpha(\lambda)\beta(\lambda)\Phi_0(\lambda)\exp(-\alpha(\lambda)x) \quad (1.8)$$

Celková generace G_{tot} je pak dána integrací přes spektrum dopadajícího záření.

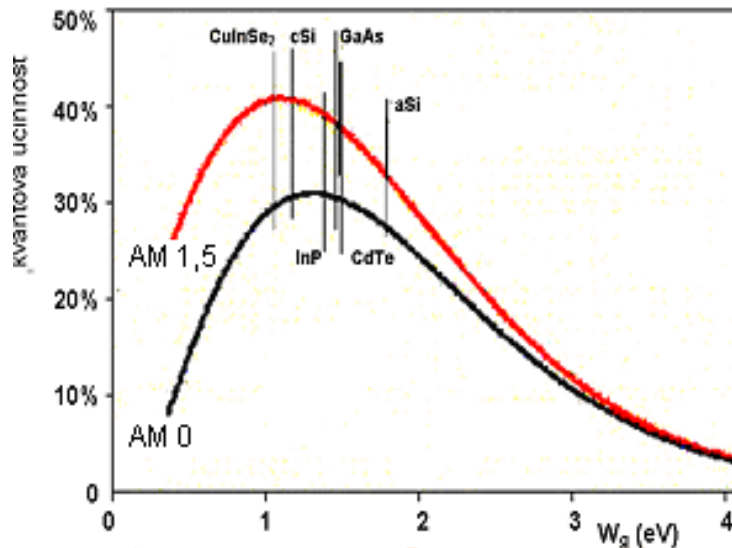
$$G_{tot}(x) = \int_0^{\infty} G(\lambda; x) d\lambda = \int_0^{\infty} \alpha(\lambda)\beta(\lambda)\Phi(\lambda; x) d\lambda \quad (1.9)$$

Je-li koncentrace nerovnovážných nosičů Δn , za jednotku času rekombinuje R párů elektron-díra

$$R = \left(\frac{d\Delta n}{dt} \right)_{rec} = -\frac{\Delta n}{\tau} \quad (1.10)$$

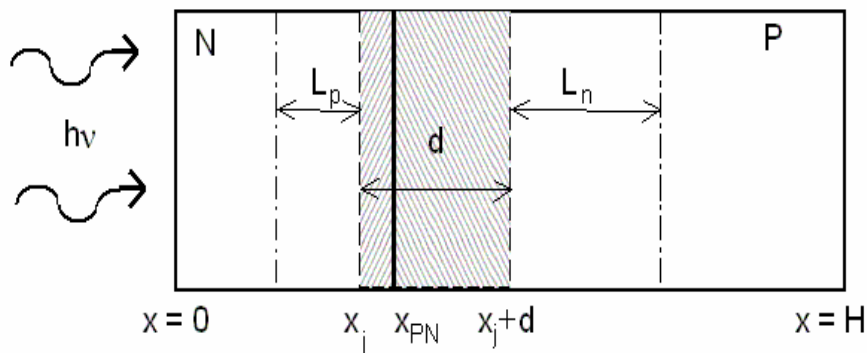
kde τ je doba života nerovnovážných nosičů.

V ustáleném stavu jsou procesy generace a rekombinace v dynamické rovnováze a platí $\Delta n = \tau G$. Pro vytvoření potřebného rozdílu potenciálu je nutno využít struktury s vestavěným elektrickým polem. Vhodné struktury jsou přechod PN, nebo heteropřechod (kontakt dvou různých materiálů). Vestavěné elektrické pole generované páry elektron – díra separuje, a to tak, že elektrony jsou urychleny do oblasti N a díry do oblasti typu P. Tímto způsobem se oblast typu N nabíjí záporně a oblast typu P nabíjí kladně tak, že na osvětleném polovodiči s přechodem PN vzniká fotovoltaické napětí. Připojí-li se mezi tyto oblasti spotřebič, protéká jím elektrický proud.



Obr. 1.10. Závislost kvantové účinnosti generace nerovnovážných nosičů slunečním zářením na šířce zakázaného pásu polovodiče

Princip funkce fotovoltaického článku je znázorněn na obr.1.11.



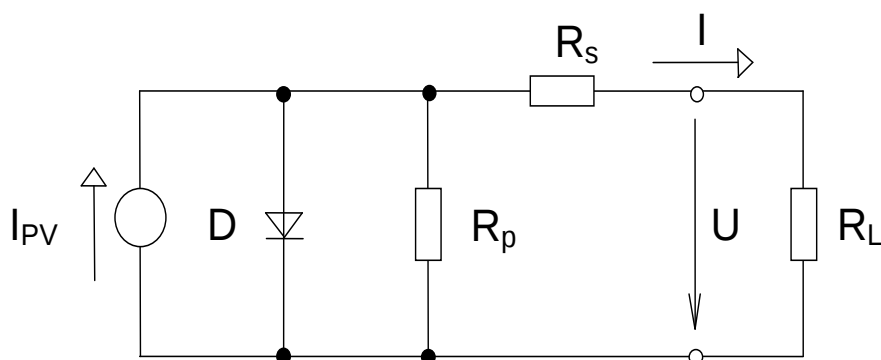
Obr. 1.11. Základní struktura fotovoltaického článku.

V ozářené oblasti jsou generovány nerovnovážné nosiče, které difundují směrem k přechodu PN. Hustota proudu J_{PV} je tvořena nosiči které byly zachyceny oblastí prostorového náboje. 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. Je tedy možno (při zahrnutí povrchové rekombinace pomocí rekombinační proudové hustoty J_{sr}) vyjádřit generovanou proudovou hustotu vztahem

$$J_{PV}(\lambda) = q \int_0^H G(\lambda) dx - q \int_0^H \frac{\Delta n}{\tau_n} dx - (J_{sr}(0) + J_{sr}(H)) \quad (1.11)$$

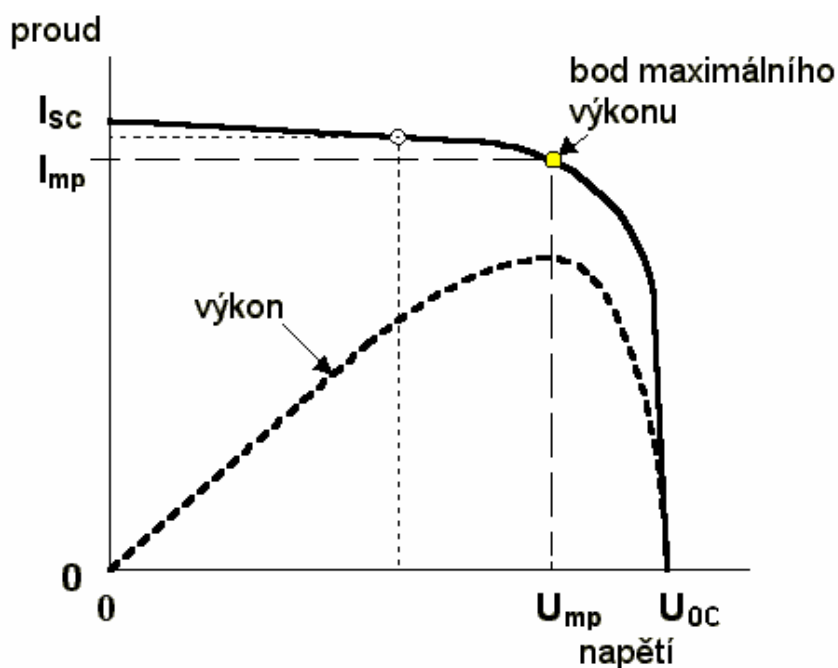
Je proto třeba volit konstrukci a technologii fotovoltaických článků tak, aby při maximální generaci byly ztráty rekombinací minimální.

Fotovoltaický (FV) článek je možno modelovat pomocí náhradního obvodu, znázorněného na obr. 1.12.



Obr. 1.12. Náhradní schema fotovoltaického článku.

Ozářená oblast přechodu PN o ploše A_{ill} 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



Obr. 1.13. Voltampérová charakteristika fotovoltaického článku

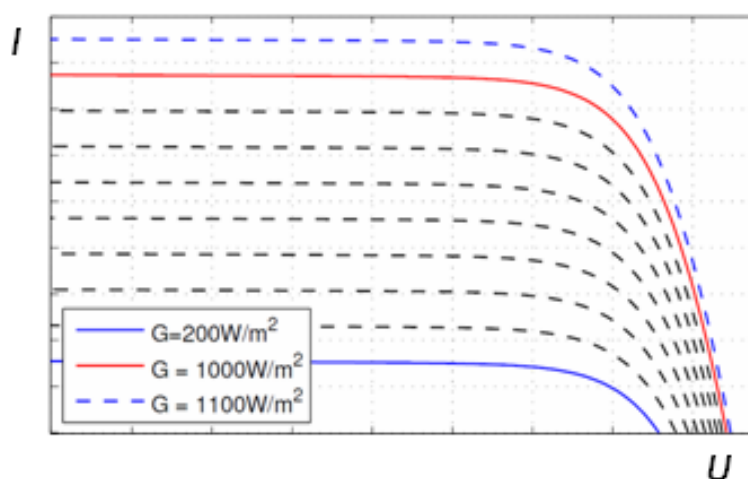
svodovým odporem R_p , vliv odporu materiálu a proudových sběrnic je modelován sériovým odporem R_s . Výstupní napětí U na FV článku je o úbytek napětí na sériovém odporu nižší, než napětí U_j na diodě. Výstupní proud FV článku je možno vyjádřit vztahem

$$I = A_{ill} J_{PV} - I_{01} \left[\exp \left(e \frac{U + R_s I}{kT} \right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp \left(e \frac{U + R_s I}{2kT} \right) - 1 \right] - \frac{U + R_s I}{R_p} \quad (1.12)$$

Ze vztahu je zřejmý silný vliv sériového odporu na voltampérovou charakteristiku FV článku. Sériový odpor snižuje výstupní proud a tím i účinnost článku. Volt-ampérová charakteristika FV článku je znázorněna na obr. 1.12.

Nejvyšší možnou hodnotou proudu je maximální proud tzv. zkratový proud I_{SC} , který může solární článek při dané intenzitě ozáření dodávat. Dalším charakteristickým bodem je napětí naprázdno U_{OC} , které udává maximální napětí na článku, kterého je možno dosáhnout, když ke článku není připojen žádný spotřebič. Výkon solárního článku se určuje jako součin proudu a napětí. Pro každý článek existuje pracovní bod na charakteristice, ve kterém je výkon největší. Tento bod je označován jako bod maximálního výkonu (MPP) o napětí U_{mp} a proudu I_{mp} . Výkon určitého solárního článku závisí na ozáření, na spektru světla a na teplotě článku. Jako parametry článků se udávají hodnoty I_{SC} , U_{CO} , U_{mp} , I_{mp} a $P_m = U_{mp} I_{mp}$, dále pak ještě činitel plnění $FF = U_{mp} I_{mp} / U_{CO} I_{SC}$ a účinnost $\eta = U_{mp} I_{mp} / P_{in}$ (P_{in} je výkon dopadajícího záření) stanovené za standardních testovacích podmínek, tj. při teplotě 25°C, intenzitě záření 1000 W/m² a spektru AM 1,5. Dalšími parametry jsou hodnoty sériového odporu R_s a paralelního odporu R_p . V-A charakteristika závisí výrazně

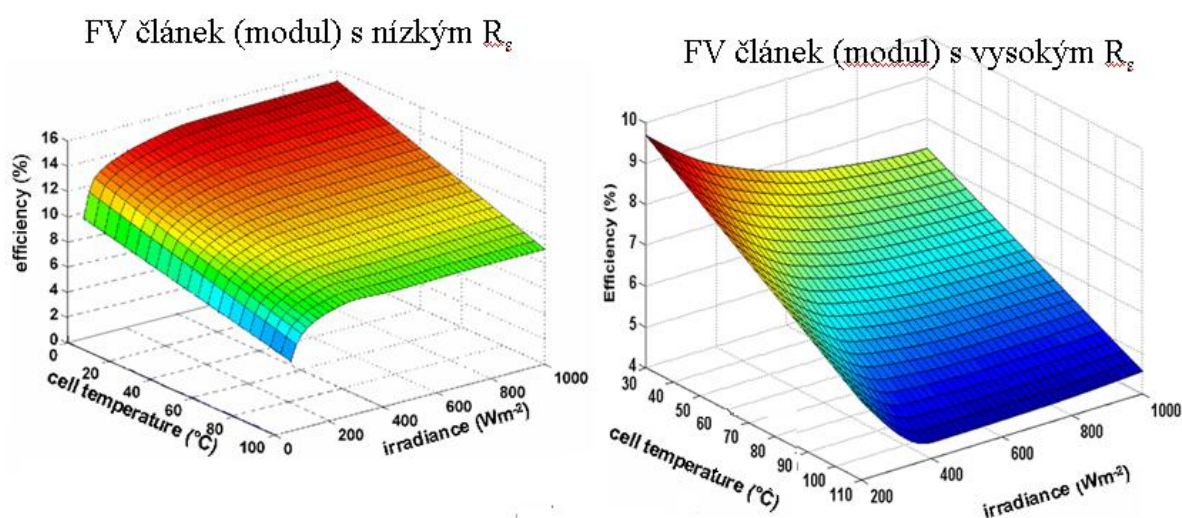
na intenzitě dopadajícího záření, jak je znázorněno na obr. 1.14, a na teplotě.



Obr. 1.14. Příklad vlivu intenzity záření na V-A charakteristiku fotovoltaických článků

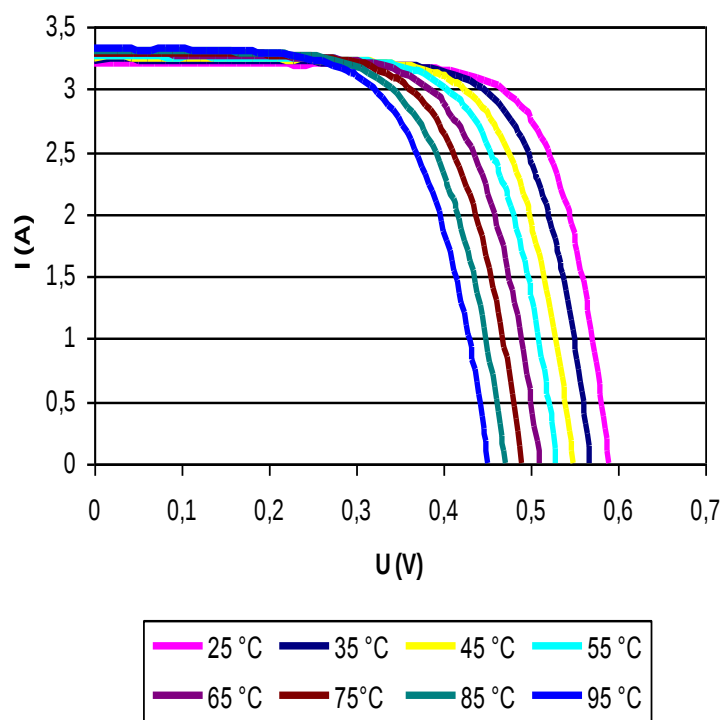
Teplota má značný vliv na velikost napětí naprázdno U_{OC} . V důsledku rychlého růstu intrinsické koncentrace nosičů s teplotou dochází k poklesu napětí U_{OC} ,

Velikost poklesu závisí na materiálu článků. Pro FV články z krystalického křemíku (c-Si) je pokles U_{OC} okolo 0.4%/K. Zároveň s poklesem U_{OC} klesá i napětí v bodě maximálního výkonu U_{mp} . Na velikost proudu v bodě maximálního výkonu I_{mp} má teplota malý vliv, proud nakrátko I_{SC} s rostoucí teplotou mírně roste. V důsledku toho klesá s rostoucí teplotou i maximální výkon a tedy i účinnost FV článků. V případě článků z krystalického křemíku je pokles účinnosti zhruba 0,5%/K. Příklad teplotní závislosti V-A charakteristik křemíkového FV článku je na obr. 1.15.



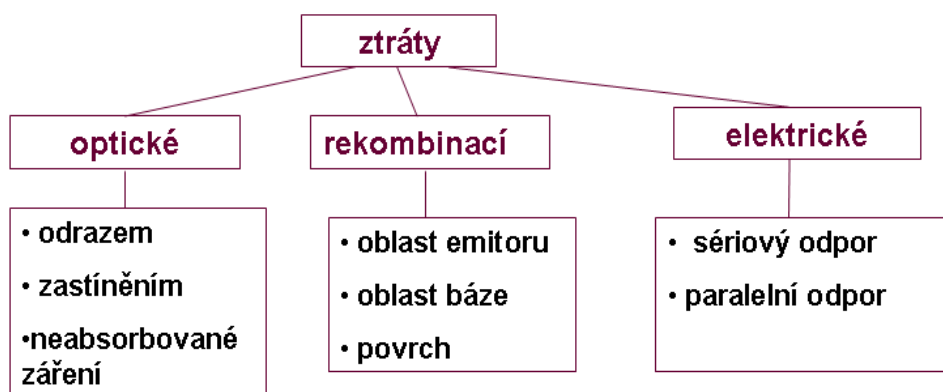
Obr. 1.15. Prognóza závislosti účinnosti FV článků na teplotě a intenzitě záření v případě článků s vysokým a nízkým sériovým odporem

Účinnost fotovoltaických článků dále závisí na intenzitě dopadajícího záření a na velikosti sériového a paralelního odporu. V případě malého sériového odporu R_s účinnost článků s rostoucí intenzitou záření roste, dosahuje maxima a až při velkých intenzitách záření začíná klesat. V případě velkého sériového odporu účinnost článků s rostoucí intenzitou záření klesá (tento efekt se projevuje zejména u tenkovrstvých FV článků). Příklady závislosti účinnosti FV článků na teplotě a intenzitě záření jsou demonstrovány na obr.1.16.



Obr. 1.16. Vliv teploty na V-A charakteristiku křemíkového FV článku

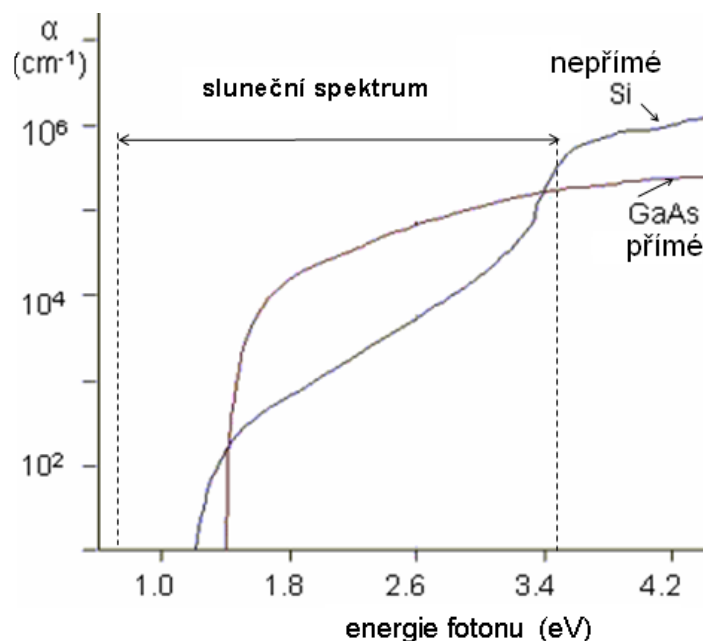
K dosažení maximální hodnoty J_{PV} je třeba maximální generace G nosičů v oblasti blízké k přechodu PN (nebo heteropřechodu) a minimální ztráty. Jednotlivé typy ztrát jsou znázorněny na obr.1.17.



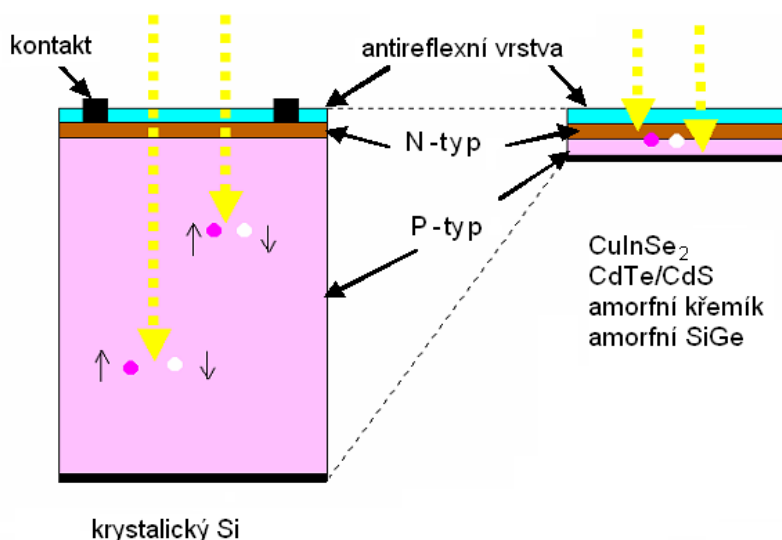
Obr. 1.17. Ztráty ve strukturách fotovoltaických článků

Minimalizace optických ztrát je spojena s realizací antireflexní vrstvy a texturace povrchu, Minimalizace rekombinačních ztrát je spojena s kvalitou použitého materiálu a vhodným technologickým procesem. Sériový odpor článku závisí na geometrii kontaktů a rezistivitě materiálu jednotlivých vrstev.

Konstrukce FV článků závisí na pásové struktuře výchozího materiálu. Pokud má materiál tzv. přímou pásovou strukturu (např. GaAs), absorpční koeficient pro fotony s $h\nu \geq W_g$ velmi rychle roste s jejich energií, takže světlo je plně absorbováno v tenké vrstvě silné jednotky μm . Pokud je pásová struktura nepřímá (např. křemík), absorpční koeficient roste s energií fotonu pozvolně a



Obr. 1.18. Závislost absorpčního koeficientu na různých typech pásové struktury polovodiče



Obr. 1.19. Konstrukce FV článků z materiálů s různým typem pásové struktury

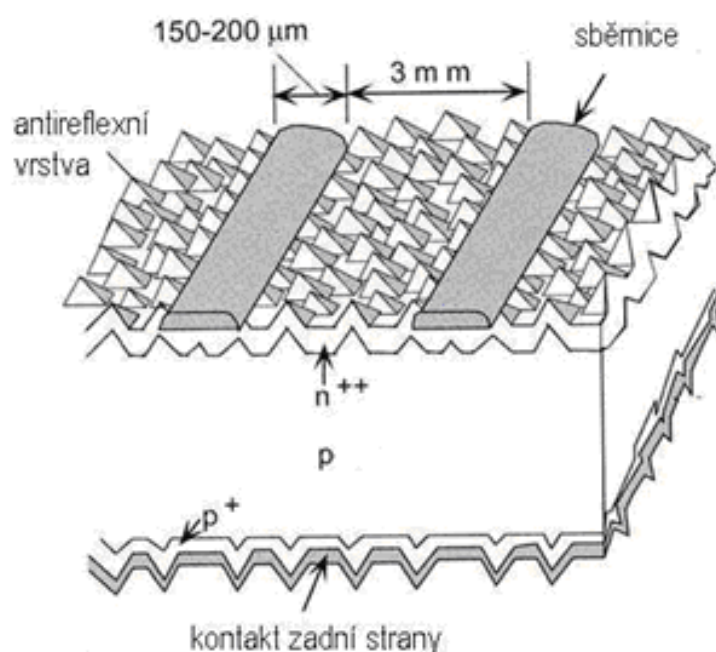
pro absorpci dlouhovlnné části slunečního spektra je třeba materiál o tloušťce řádově stovky μm . Porovnání závislostí absorpčního koeficient na energii

fotonu je provedeno na obr.1.18. Rozdíl v konstrukci článků s různým typem pásové struktury je schématicky znázorněn na obr.1.19.

1.3. Technologie fotovoltaických článků a modulů.

1.3.1. Fotovoltaické články a moduly z krystalického křemíku

Křemík je velmi vhodný materiál pro výrobu fotovoltaických článků, protože z hlediska šířky 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.



Obr. 1.20. Struktura reálného FV článku

Teoretická účinnost [2] ideálního křemíkového článku dosahuje 33%.

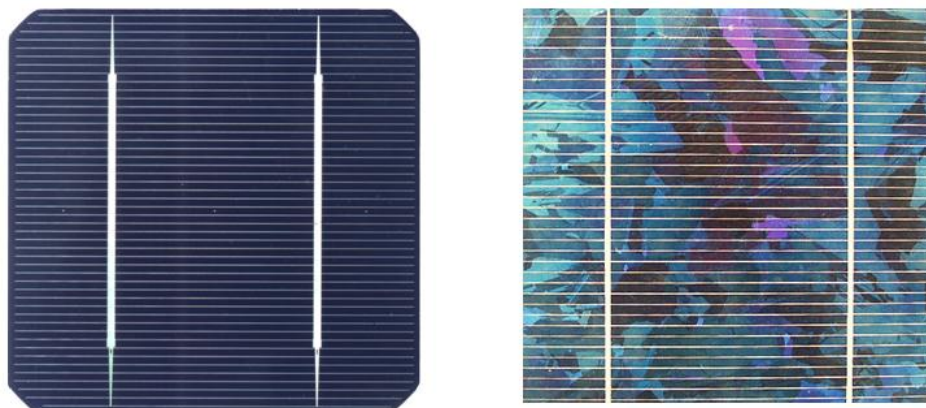
Výchozím materiálem pro výrobu FV článků z krystalického křemíku jsou křemíkové destičky (obvykle typu P) čtvercového tvaru o rozměrech až 200x200 mm a rezistivitě řádově jednotky Ωcm . Počátek výroby FV článků byl spojen s monokrystalickým (CZ) křemíkem. Potřeba snížení ceny vstupního materiálu vedla v sedmdesátých letech k vývoji multikrystalického křemíku (řízené tuhnutí taveniny v blocích). 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. Monokrystalické nebo multikrystalické ingoty musejí být rozřezány na destičky o tloušťce cca 0,15-0,3 mm, povrchová vrstva destiček, zhmožděná řezáním, musí být odleptána. Příprava destiček rozřezáním ingotu je relativně nákladná operace, při které je znehodnoceno téměř 50% materiálu ingotu.

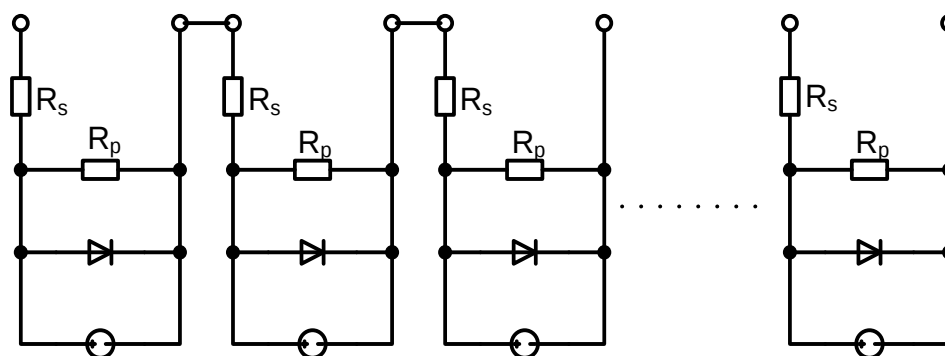
Z jedné křemíkové destičky je vyroben jeden FV článek. Struktura běžného článku je schématicky znázorněna na obr.1.20. Po chemickém opracování destičky (leptání, texturace, čištění) je jednostranně vytvořen přechod PN difúzí fosforu ve vzdálenosti 0,2 – 0,5 μm od povrchu. Po odstranění fosforsilikátového skla vzniklého při difúzi je povrch pokryt antireflexní vrstvou (SiN_x nebo TiO_2) Po depozici antireflexní vrstvy jsou realizovány kontakty sběrnice, obvykle pomocí vodivých past nanesených na povrch článků sítotiskem.. Na stranu s přechodem PN (na vrstvu N^+) je sítotiskem nanесena sběrnice (Ag pasta) a na zadní stranu je sítotiskem nanесen kontakt (Al-Ag pasta). Po vysušení pasty následuje vypálení, při kterém dojde k rozrušení antireflexní nitridové vrstvy a vytvoření ohmických kontaktů. Pomocí této techniky byla výrazně zjednodušena a zlevněna technologie kontaktování článků (odstranění fotolitografie a vakuových depozičních technologií). Poté se odstraní povrchový zkrat na hranách článku. Vzhled FV článků z monokrystalického a multikrystalického křemíku je porovnán na obr. 1.21 (články s nejčastěji používanou geometrií sběrnice předního kontaktu). U realizovaných článků jsou změřeny parametry a články jsou tříděny podle proudu v bodě maximálního výkonu I_{mp} . Tato technologie je relativně jednoduchá a podstatnou část nákladů při výrobě fotovoltaických článků představuje výchozí materiál, tj. destičky z krystalického křemíku.

Jednotlivé FV články z krystalického křemíku mají pracovní napětí okolo 0,5 V a proudovou hustotu několik desítek mA/cm^2 ($\approx 35 \text{ mA/cm}^2$). Je proto třeba spojit jednotlivé články do série do funkčních bloků – modulů, jak je znázorněno na obr. 1.22. Pro sériové spojení je třeba, aby všechny články měly stejný proud I_{mp} . Ve zjednodušeném přiblížení, znázorněném na obr. 1.23, může být modul charakterizován jedinou hodnotou sériového odporu a

paralelního odporu a voltampérová charakteristika m do série zapojených článků má tvar analogický vztahu (1.12)



Obr. 1.21. Porovnání vzhledu monokrystalického a polykrystalického c-Si článku



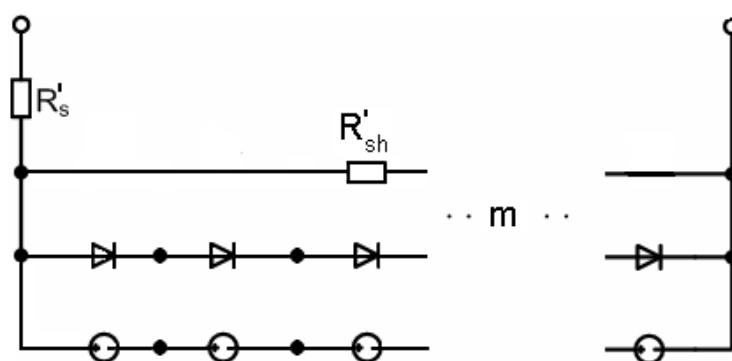
Obr. 1.22. Sériové spojení článků v modulu – náhradní schéma

$$I = I_{pV} - I_{01} \left[\exp \left(e \frac{U + R_s' I}{mkT} \right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp \left(e \frac{U + R_s' I}{mn_2 kT} \right) - 1 \right] - \frac{U + R_s' I}{R_{sh}} \quad (1.13)$$

$$I = I_{pV} - I_{01} \left[\exp \left(e \frac{U + R_s' I}{mkT} \right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp \left(e \frac{U + R_s' I}{mn_2 kT} \right) - 1 \right] - \frac{U + R_s' I}{R_{sh}}$$

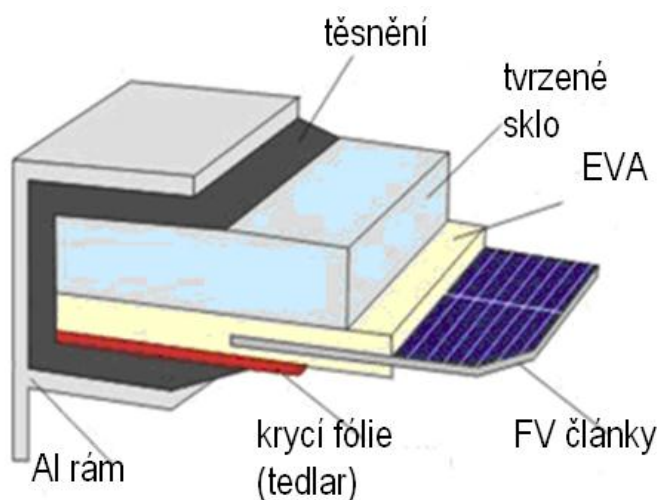
U modulu je pak možno stanovit parametry U_{OC} , I_{SC} , I_{mp} , U_{mp} , P_m , FF a účinnost, jako u FV článků. Tyto parametry se udávají za standardních testovacích podmínek a měří se nejčastěji zábleskovou metodou (flash test).

Pokud je v řetězci sériových článků částečně či úplně zastíněn, dochází k výraznému poklesu výkonu modulu a zastíněný článek je výrazně zatížen. Články, nebo části řetězce se proto přemostují překlenovacími diodami.



Obr. 1.23. Zjednodušené náhradní schéma modulu, sestaveného z m sériově spojených článků

V reálném provozu musí být FV články chráněny před nepříznivými vlivy okolního prostředí. Do série spojené FV články se zpravidla spojují s vysoce průhledným tvrzeným sklem pomocí EVA, zadní strana je kryta vícevrstvou pevnou fólií z plastu. Struktura modulu je znázorněna na obr. 1.24. Moduly jsou opatřeny hliníkovým rámem pro uchycení k nosným konstrukcím a na zadní stěně jsou opatřeny svorkovnicí s kabelovými vývody a překlenovacími diodami.



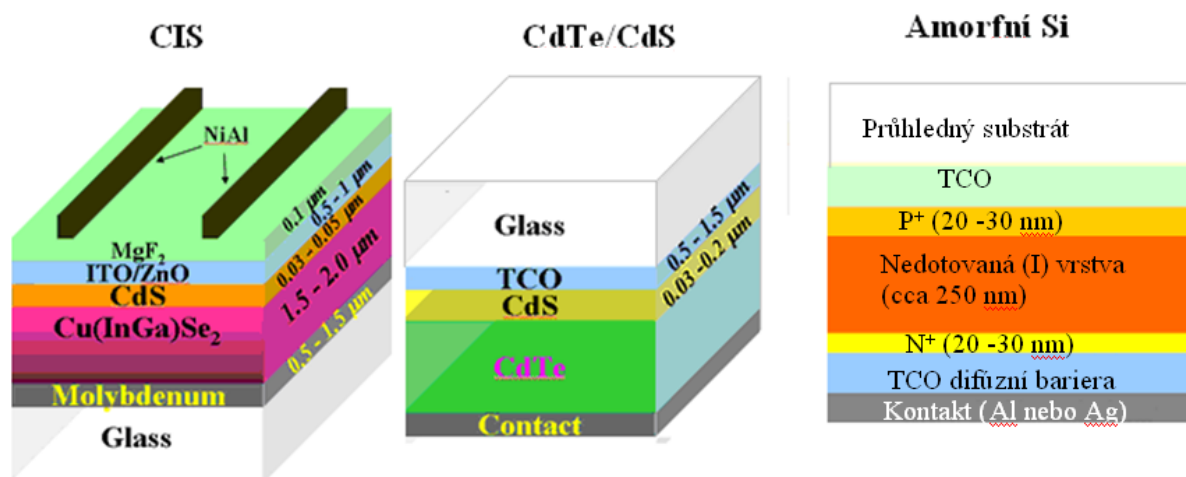
Obr. 1.24 Struktura FV modulu s články z krystalického křemíku.

Fotovoltaické moduly jsou při provozu zahřívány absorbovaným slunečním zářením a pracují tak za podmínek značně odlišných od standardních testovacích podmínek. Jejich pracovní teplota závisí na intenzitě dopadajícího záření, teplotě okolí, tepelném odporu modulu a rychlosti proudění okolního vzduchu. Proto je jako parametr udávána hodnota teploty NOCT (normal

operating conditions temperature), která se udává pro sluneční záření o intenzitě $G = 800 \text{ W/m}^2$, teplotu okolí 20°C a rychlost větru 1 m/s . Pokud se měří teplota článků čidlem umístěným na zadní straně modulu, je skutečná teplota článků o něco vyšší (až o 3°C – v závislosti na intenzitě záření).

1.3.2. *Technologie tenkovrstvých fotovoltaických článků a modulů.*

U materiálů s vysokým absorpčním koeficientem je možné realizovat fotovoltaický článek ve vrstvě o tloušťce několika μm , což představuje výrazné úspory polovodičového materiálu. Tenkovrstvé články a moduly představují v současné době zhruba 15% celkové produkce a vyrábějí se z CdTe, amorfního křemíku (někdy v kombinaci s mikrokrystallickým křemíkem) a CuInSe_2 (případně $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}_2$). Tenkovrstvé FV články byly vyvíjeny prakticky souběžně s články z krystalického křemíku (v roce 1990 představovala produkce tenkovrstvých modulů 30% z celkové produkce).. Pro tenkovrstvé články a moduly je nutná technologie výroby, umožňující realizovat reprodukovatelně tenké vrstvy o vysoké účinnosti fotovoltaické přeměny energie a vysoké stabilitě.



Obr. 1.25. Struktury různých typů tenkovrstvých fotovoltaických článků

Tenké vrstvy nejsou samonosné a je třeba je deponovat na vhodný substrát. Důležitým konstrukčním a technologickým problémem je dosažení nízkého sériového odporu R_s . Vzhledem k vysokému příčnému odporu vrstev se z přední (osvětlované) strany fotovoltaického článku odvádí proud pomocí vrstvy transparentního vodivého oxidu (TCO). Který v řadě případů slouží rovněž jako

antireflexní vrstva. Vrstva TCO často slouží jako difúzní bariéra na kovovém kontaktu. Příklady struktur běžných tenkovrstvých FV článků jsou znázorněny na Obr.1.25.

Tenké vrstvy jsou deponovány různými technologiemi; napařováním, naprašováním, chemickou depozicí z plynné fáze (CVD), elektrochemicky, apod. Vrstvy TCO (SnO_2 , ITO, ZnO) jsou obvykle naprašovány. Vrstvy amorfního nebo krystalického křemíku jsou obvykle deponovány chemickou depozicí z plynné fáze, založené na dekompozici silanu



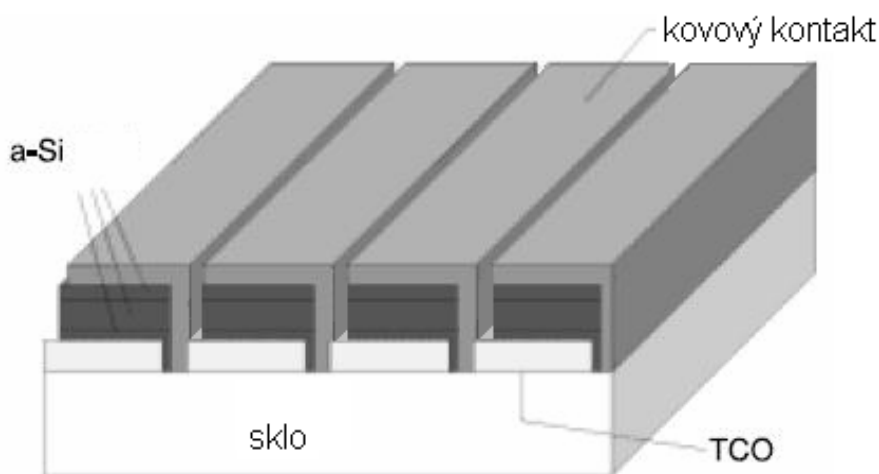
Při přidání diboranu (B_2H_6) do směsi silanu s vodíkem narůstá vrstva dotovaná bórem (P^+), pokud je do směsi přidán fosfin (PH_3), narůstá vrstva dotovaná fosforem.

Rychlost růstu a struktura vrstvy (amorfní nebo mikrokrytalický křemík) závisí na teplotě podložky a koncentraci silanu ve směsi s vodíkem (nižší koncentrace silanu vede k růstu mikrokrytalického Si).

V tenkovrstvé technologii často nejsou realizovány jednotlivé články, ale celý modul v sekvenci technologických operací:

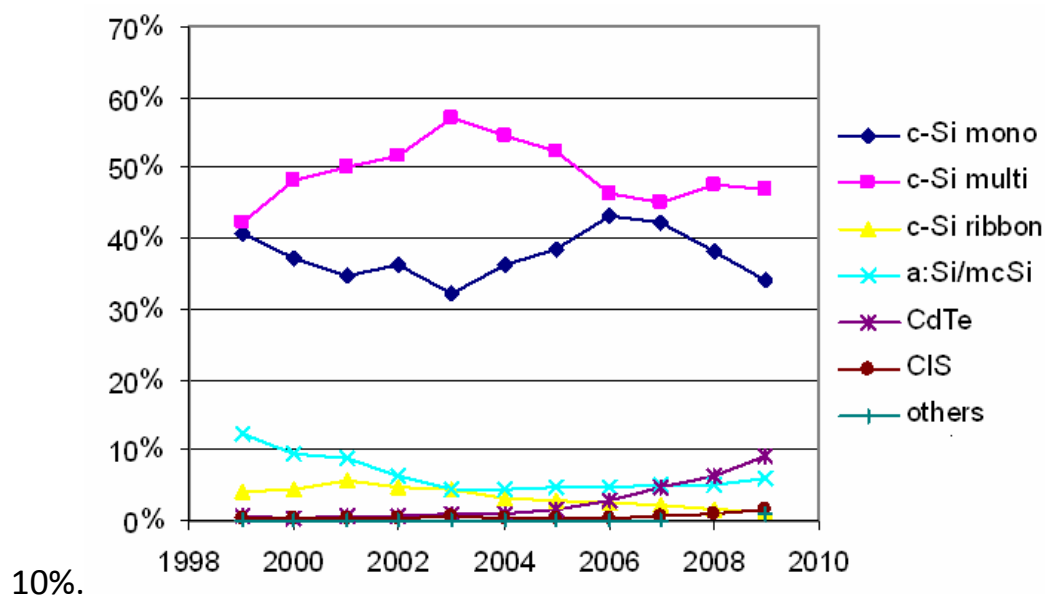
- na nosnou podložku (obvykle sklo) je deponována vrstva TCO (transparentní vodivý oxid)
- laserem odděleny oblasti jednotlivých článků ve tvaru proužků (odstranění TCO)
- následuje plasmatická depozice tenkovrstvého článku
- následuje odstranění struktury článku laserem v proužku těsně přiléhajícím k hranici
vymezené prvním laserovým řezem
- poté je deponován kovový kontakt (obvykle naprašováním)
- následuje třetí řez laserem, odstraňující proužek kovového kontaktu tak, aby vznikla

struktura modulu se sériově zapojenými články, jak je schématicky znázorněno na obr.1.2.6.



Obr. 1.26. Struktura tenkovrstvého modulu na transparentní podložce

Na zadní stranu modulu je pomocí EVA přilaminována krycí vrstva (sklo nebo polymer) a vývody svedeny do svorkovnice. Účinnost tenkovrstvých modulů je v rozmezí 6 až



Obr. 1.27. Vývoj podílu jednotlivých technologií na celkové produkci FV modulů

Tenkovrstvé články a moduly mohou být realizovány rovněž na ohebných fóliích, což zjednodušuje některé střešní aplikace. Problémy se stabilitou deponovaných vrstev (tenkovrstvé moduly s deklarovanou životností 20 let jsou nabízeny až po roce 2002) 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 m² a dochází k postupnému nárůstu produkce tenkovrstvých fotovoltaických modulů, jak vyplývá z diagramu na obr.1.27.

1.4. Současné trendy v oblasti fotovoltaických článků a modulů

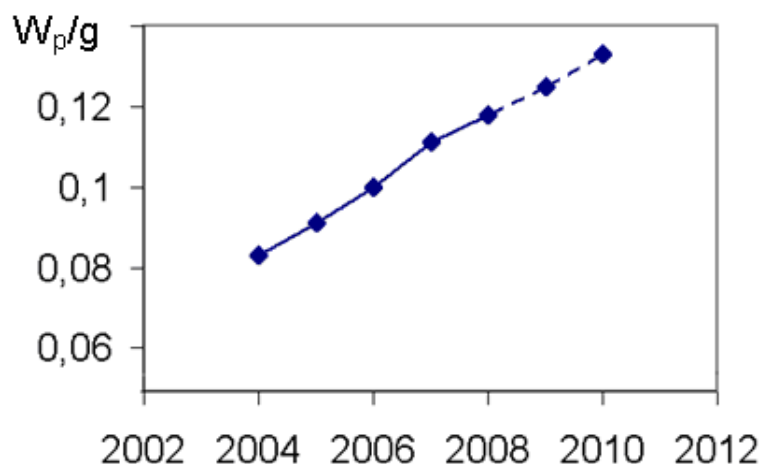
Pro rozvoj fotovoltaiky jako efektivního zdroje elektrické energie v systémech připojených k rozvodné síti je třeba, aby klesla cena FV modulů na úroveň blízkou 1 €/W_p (cena celého systému na úroveň pod 2,5 €/W_p). K dosažení tohoto cíle je třeba

- snížit cenu výchozího materiálu
- zjednodušit a zlevnit technologii výroby
- zvýšit konverzní účinnost FV článků.

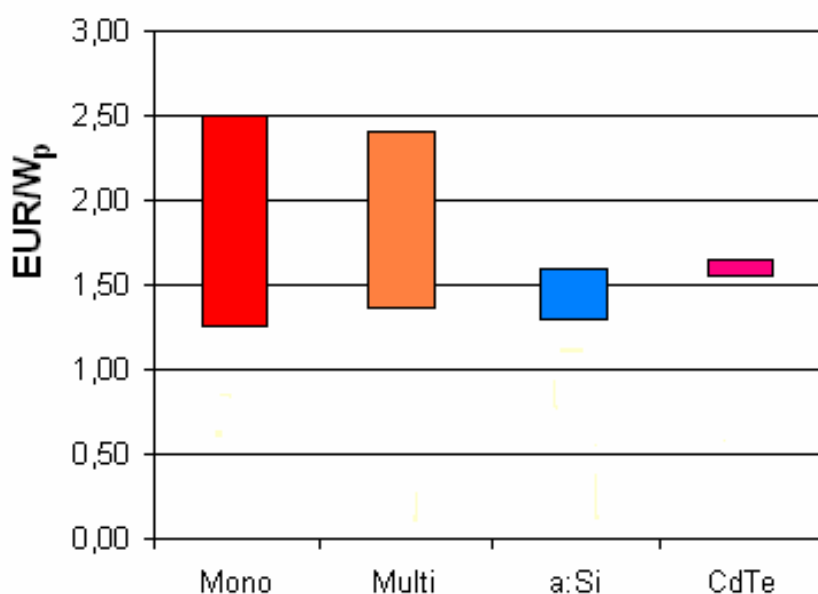
Články z krystalického křemíku

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

Je proto jedním ze základních trendů snižování tloušťky destiček na 200 – 150 μm, což vede spolu se zvyšováním účinnosti článků k výraznému zvyšování výkonu produkovaného stejným množstvím křemíku, jak je znázorněno na obr.1.28. Kromě toho bylo dosaženo snížení spotřeby energie při přípravě výchozího materiálu. V období 2000 až 2007 došlo [3] ke snížení spotřeby energie potřebné pro výrobu 1kg polykrystalického křemíku čistoty 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 €/W_p. Zároveň probíhá vývoj v oblasti zkvalitňování technologických procesů tak aby se účinnost zvyšovala ze současných 12 -17 % na úroveň 18 – 22%. Porovnání cen různých typů modulů na začátku roku 2010 je znázorněno na obr. 1.29.



Obr. 1.28. Růst měrného výkonu FV článků z krystalického Si (vztaženo ke spotřebě Si)



Obr. 1.29. Rozpětí ceny jednotlivých typů modulů v roce 2010

Tenkvrstvé 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 poroste.

Trendy v období příštích pěti let

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 využívají kvantových jevů v kvantových tečkách nebo kvantových jamách
- organické články
- Grätzlovy články (články na bázi nanočástic 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. Nelze proto v následujících pěti letech očekávat výraznější rozšíření těchto technologií.

1.5. Literatura ke kapitole 1

- [1] Fonash S.J., „Solar Cell Device Physics“, Academic Press, 1981.
- [2] Wagemann, H.G. and Eschrich, “Grundlagen der photovoltaischen Energiewandlung:, Stuttgart, Teubner, 1994

- [3] Goetzberger A., Knobloch J., Bernhard V., „Crystalline Silicon Solar Cells“, John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- [4] Photovoltaic and Photoactive Materials – Properties, Technology and Applications (edited by J.M. Marshall and D. Dimova-Malinovska), NATO Science Series, Kluwer Academic Publishers, 2002
- [5] Handbook of Photovoltaic Science and Engineering (edited by A. Luque and S. Hegedus), J. Wiley & Sons, 2003
- [6] Würfel, P., „*Physics of Solar Cells*“, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2005
- [7] Markvart, T. and Castaner, L., *Solar Cells – Materials, Manufacture and Operation*, Elsevier, 2005
- [8] Fontaine, B., Fraile, D., Latour, M., Lenor, S., Philbin, P. and Thomas, D. „*Global market outlook for photovoltaics until 2013*“ EPIA, 2009
- [9] Swanson, R.M. „Approaching the 29% limit efficiency of silicon solar cells“, IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2005.
- [10] Hesse, K., Schindlbeck, E. and Freiheit, H.-Ch, „An overview on silicon feedstock“, 22nd European Photovoltaics Solar Energy Conference, 2007
- [11] Denis De Ceuster, et al, „Low Cost, high volume production of >22% efficiency silicon solar cells“ 22nd European Photovoltaics Solar Energy Conference, 2007

2. KOMPONENTY A FUNKCE FV SYSTEMŮ (P.WOLF)

Základem fotovoltaických (FV) systémů je generátor tvořený soustavou FV článků či FV panelů. Ty jsou vzájemně propojené tak, aby bylo dosaženo požadovaných parametrů napětí a proudu, jejich energie je rozváděna a případně měněna na energii střídavou. Dle typu systémů je energie využívána buď přímo v místě instalace, nebo dodávána do distribuční soustavy.

2.1. Jednotlivé prvky FV systému

2.1.1. *FV panel*

Fotovoltaické panely (moduly) byly popsány v předcházející kapitole, proto je zde uveden pouze příklad typu s elektrickými parametry.

Technické parametry

Rozměry: 1500 mm x 800 mm

Hmotnost: 17kg

Elektrické parametry při STC

(standardní testovací podmínky 25 °C, 1000W/m²)

Výkon v bodě max. výkonu (P_{MPP}): 180W

Napětí naprázdno (V_{OC}): 43,0V

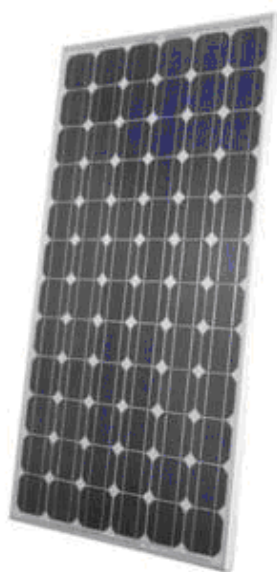
Proud nakrátko (I_{SC}): 5,50A

Napětí v bodě max. výkonu (V_{MPP}): 35,0V

Proud v bodě max. výkonu (I_{MPP}): 5,14A

2.1.2. *Střídač*

Střídač je základním elektrickým zařízením každého fotovoltaického systému, který využívá střídavou elektrickou energii. Zajišťuje konverzi stejnosměrného proudu přiváděného na vstup na střídavý proud s požadovanými parametry a kvalitou. Jsou-li na vstup připojovány přímo FV panely, je navíc třeba zajistit jejich optimální provoz, tzn. sledovat bod maximálního výkonu. V případě systémů pracujících paralelně se sítí je navíc třeba splnit všechny požadavky na zajištění bezpečnosti provozu (sledování napětí, frekvence, impedance sítě, vypnutí dodávky energie při poruše, bezpečné odpojování, případně galvanické oddělení). Tyto funkce může plnit buď přímo střídač, nebo mohou být zajištěny pomocí dalších zařízení. Řada střídačů navíc umožňuje připojení datové komunikační linky pro monitorování provozu systému. Další požadavky jsou kladeny na účinnost, poruchovost, odolnost, krytí, teplotní rozsah použití,

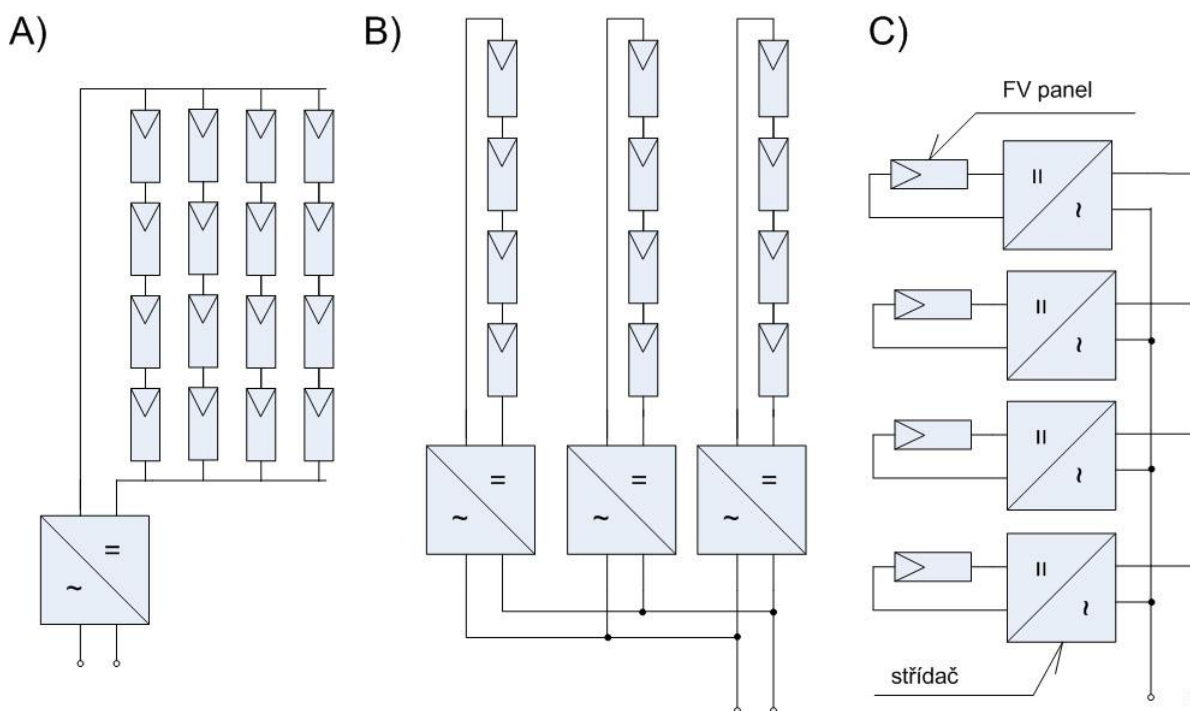


Obrázek 2.1 Monokrystalický FV panel

rozměry, hmotnost, design, jednoduchost instalace atd. Existují střídače pro využití v systémech pracujících paralelně se sítí (on-grid), v systémech pro autonomní nebo pro kombinovaný provoz.

Z hlediska výkonů se dělí na tzv. modulové střídače (střídač je připojen pouze k jednomu FV modulu), řetězcové nebo stringové (každý střídač je připojen k několika FV panelům vzájemně propojeným do série, případně i paralelně) a velké centrální střídače (připojené na stovky až tisíce FV panelů). S modulovými

střídači se setkáme velmi zřídka, výlučně u malých systémů. Středně velké elektrárny využívají řetězcových střídačů. V případě velkých elektráren se používá koncept jak velkých centrálních střídačů, tak i velkého množství řetězcových střídačů. Některé střídače mají vestavěný transformátor pro galvanické oddělení výstupu. Ten sice mírně snižuje účinnost, nicméně toto oddělení je potřeba v případě připojení tenkovrstvých FV panelů. Jeden pól na stejnosměrné straně je pak zpravidla přizemněn.



Obrázek 2.2 Centrální (A), řetězcové (B) a modulové střídače (C)

Účinnost střídačů není konstantní, úzce souvisí s provozním stavem – napětím a výkonem na vstupu střídače. Při výběru je důležité zohlednit provozní parametry střídače během celého roku, jelikož pokles o 1% u 1MW_p FV systému způsobí roční ztrátu až 130 000Kč. Celoroční účinnost lze definovat jako

$$\eta_A = \frac{E_{A_AC}}{E_{A_DC}}, \quad x^2 = -1 \quad (2.1)$$

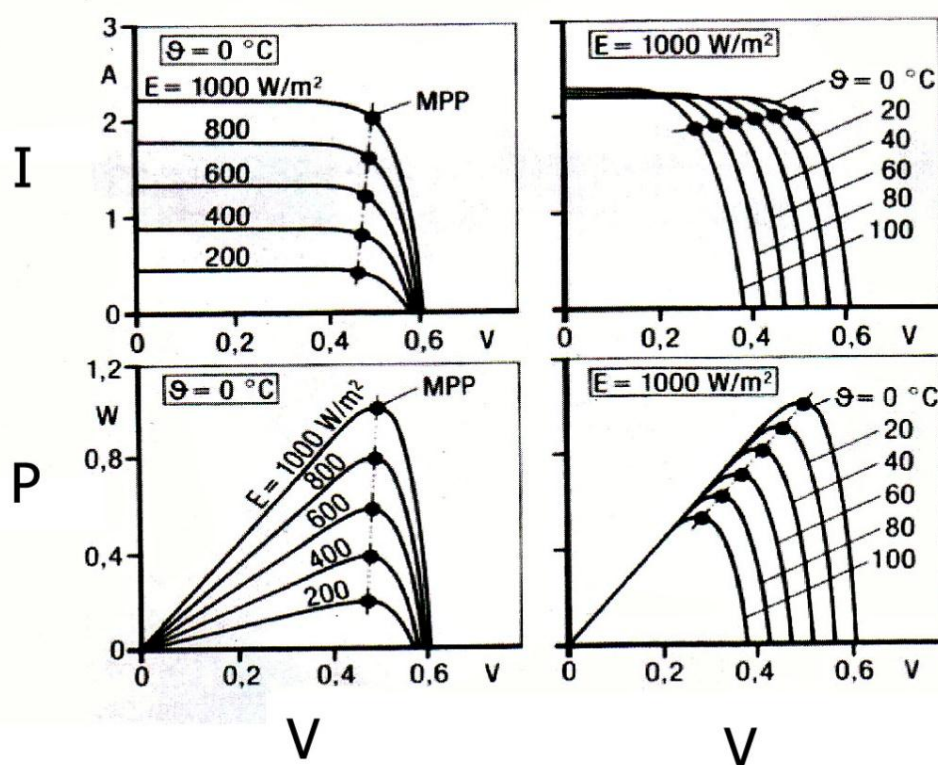
kde E_{A_AC} a E_{A_DC} značí celkovou roční energii na výstupu, resp. vstupu střídače.

Pro provoz systému v klimatických podmínkách střední Evropy se pro zhodnocení střídačů zavedl parametr, který udává celoroční účinnost definovanou jako

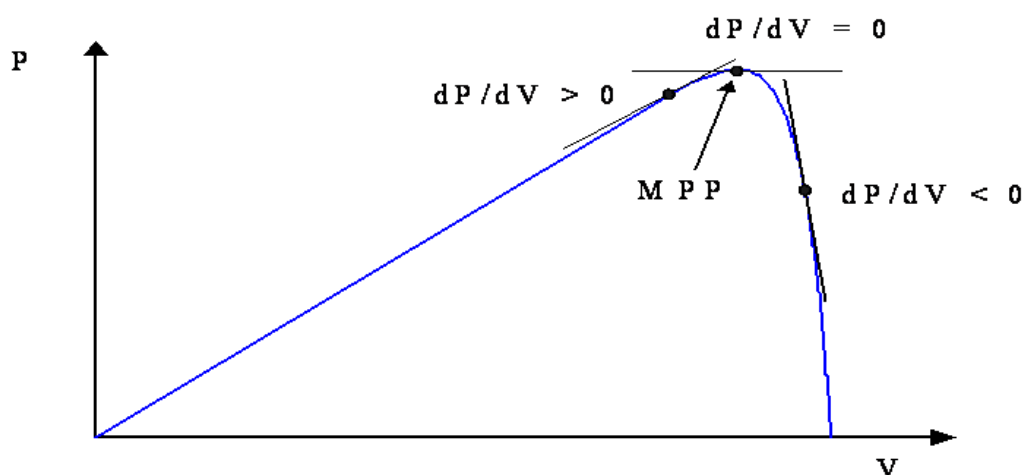
$$\eta_{EURO} = 0,03 * \eta_{5\%PN} + 0,06 * \eta_{10\%PN} + 0,13 * \eta_{20\%PN} + 0,1 * \eta_{30\%PN} + 0,48 * \eta_{50\%PN} + 0,2 * \eta_{100\%PN} \quad (2.2)$$

kde $\eta_{5\%PN}$ značí účinnost při 5% nominálního výkonu střídače apod.

Bod maximálního výkonu je závislý na provozních podmínkách FV panelů (teplotě a intenzitě záření). Pouze levné regulátory nabíjení s nízkými výkony pracují s konstantním napětím FV panelů. Většina vyráběných střídačů obsahuje algoritmus sledování bodu maximálního výkonu pro zajištění maximální výtěžnosti energie. Algoritmus obvykle spočívá v měření vstupního výkonu, provedení drobné odchylky vstupního napětí a proudu a porovnání s předchozím stavem. V případě zjištění derivace $dP/dV > 0$ je aktuální vstupní napětí střídače příliš malé a opačně.



Obrázek 2.3 Posun bodu maximálního výkonu (MPP) v závislosti na teplotě a intenzitě záření



Obrázek 2.4 Určení bodu maximálního výkonu (MPP) pomocí derivace výkonu

2.1.3. Komponenty pro elektroinstalaci FVE

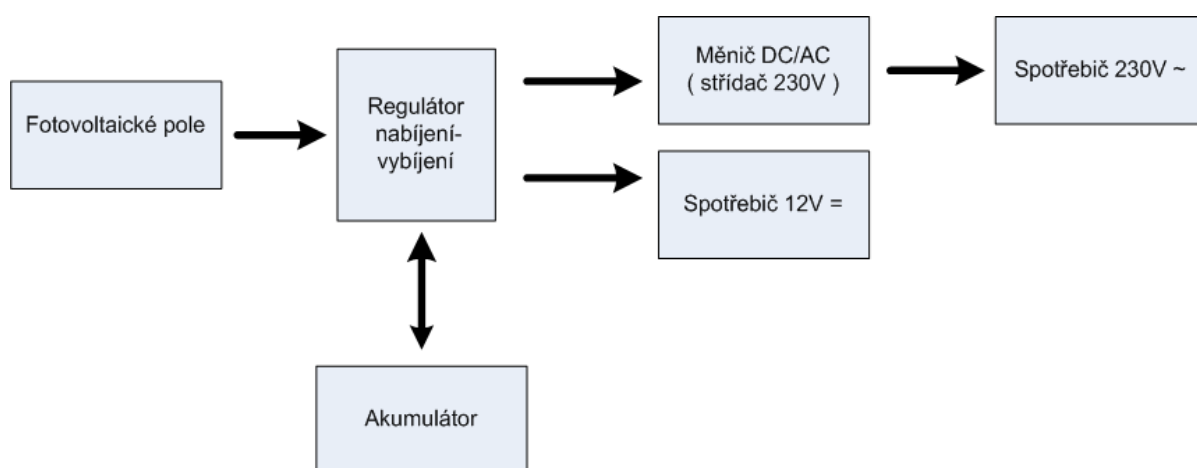
Většina komponent pro elektroinstalaci fotovoltaických elektráren je běžně využívána při rozvodu a distribuci elektrické energie, nicméně fotovoltaika má i jistá specifika. Řada prvků je rozmístěna ve venkovním prostředí na velké ploše, což přináší požadavky na odolnost vůči povětrnostním vlivům (potřebné krytí, odolnost vůči UV záření a teplotním výkyvům, ochrana před bleskem a přepětím). Komponenty musí být navrženy na dobu životnosti instalace, která je 20 let i více, nebo musí být snadno vyměnitelné. Musí být počítáno s proměnnými elektrickými parametry a musí být zachována bezpečnost za každých okolností. Mezi FV panely a střídačem musí být vhodně voleny všechny komponenty pro provoz při stejnosměrném napětí včetně jisticích prvků. Často se toto napětí může pohybovat až kolem 1000V. Je třeba dodržet požadavky na souběhy vedení nízkého a vysokého napětí, stejnosměrného a střídavého proudu a dostatečně oddělit výkonové a datové propoje.

2.2. Základní rozdělení FV systémů z hlediska provozu

Z hlediska způsobu provozu můžeme fotovoltaické systémy rozdělit na autonomní (označované též off-grid), systémy připojené k elektrické síti (on-grid) a systémy hybridní.

2.2.1. *Autonomní systémy*

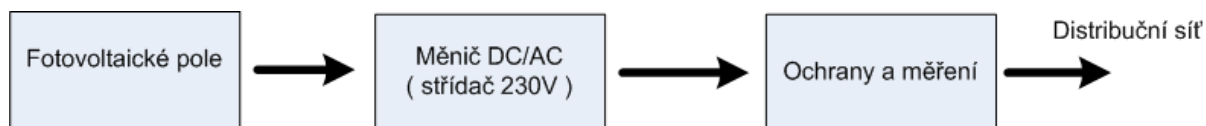
Obvykle bývají instalovány v místech, kde není k dispozici elektrická rozvodná soustava. Mohou být malé jednoúčelové (např. napájení parkovacího automatu) nebo univerzální (např. pro napájení domků v celé vesnici). Jelikož se obvykle časově plně nekryje získaná energie z FV panelů s odběrem spotřebičů, je třeba využít akumulační prvek. Nejčastěji jím bývají olověné akumulátory.



Obrázek 2.5 Blokové schéma autonomního systému

2.2.2. *Systém pracující paralelně se sítí*

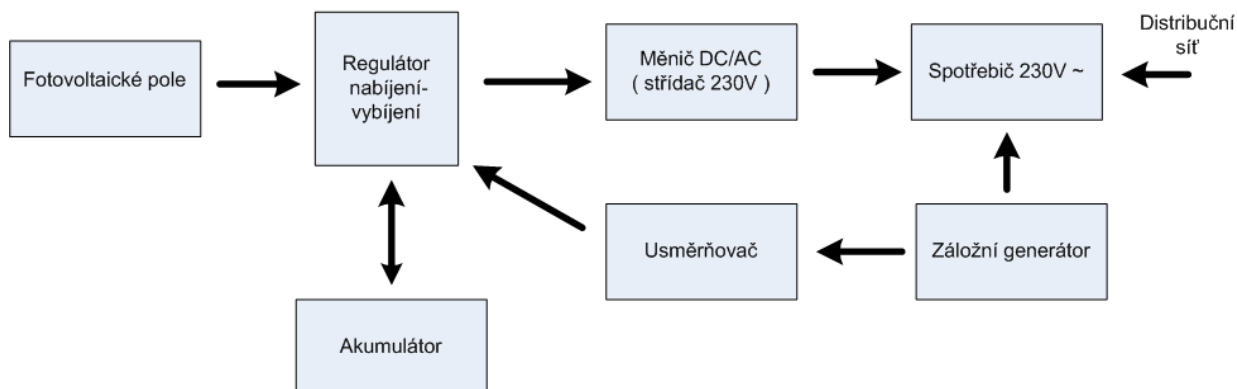
Výhodou těchto systémů je, že nepotřebují akumulační prvek. Energie je buďto primárně spotřebovávána v rámci objektu, kde je umístěna FV elektrárna, nebo je plně dodávána do sítě. V obou případech je třeba splnit mimo jiné požadavky na bezpečnost provozu a kvalitu vyráběné elektrické energie dané normami a předpisy pro provozování distribučních sítí (PPDS).



Obrázek 2.6 Blokové schéma systému pracujícího paralelně se sítí

2.2.3. Hybridní systém

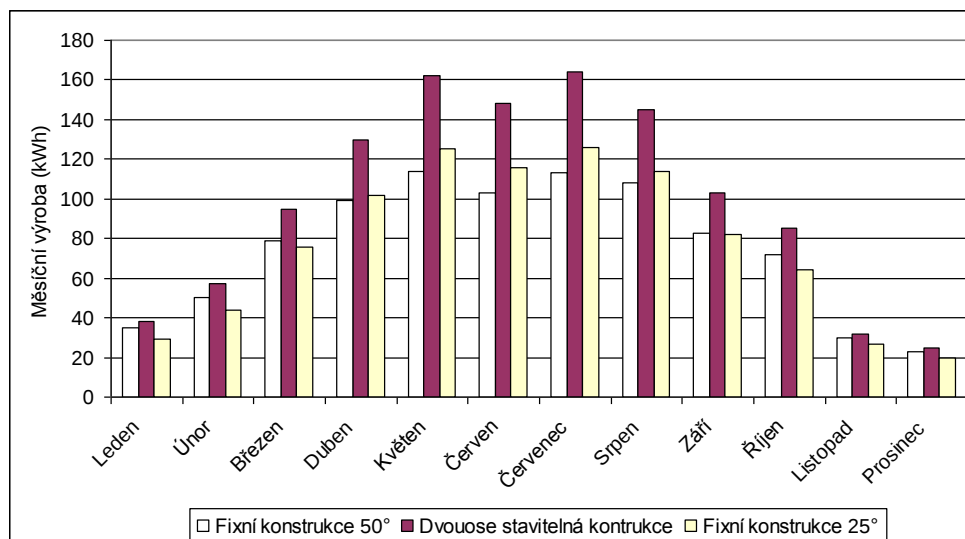
Hybridní systém obvykle kombinuje různé zdroje elektrické energie nebo různé typy akumulace. Zajímavá je např. kombinace sluneční a větrné energie, kdy lze zajistit výrazné zlepšení časové stability takového zdroje. Další možností je současné získávání elektrické a tepelné energie pomocí kombinovaných fotovoltaicko-termálních kolektorů.



Obrázek 2.7 Blokové schéma hybridního systému

2.3. Provedení FV systémů z hlediska typů konstrukce

Fotovoltaické panely jsou uchycovány na nosné konstrukce, které jsou buďto fixní (statické) nebo otočné. V případě fixních konstrukcí se v podmínkách ČR



Obrázek 2.8 Průměrná měsíční výroba fotovoltaického systému 1kWp v podmínkách ČR

doporučuje směřování na jih a sklon 25°–35° od horizontální roviny. Autonomní systémy využívané celoročně je vhodné instalovat s ještě větším sklonem pro zvětšení energetického zisku v zimních měsících.

Fotovoltaický systém o výkonu 1kWp využívající panely dvouose natáčené za sluncem je schopný vyrobit v podmínkách ČR až 1200kWh ročně, což je o cca. 26% více nežli v případě fixního systému (cca. 950kWh). Je však třeba brát v úvahu náklady spojené s otočnou konstrukcí (trekem), jejich případnou poruchovost a požadavek na větší vzájemné odstupy kvůli stínění. Z těchto důvodů je většina instalací v ČR instalována na fixních konstrukcích.

2.4. Ochrana proti blesku a přepětí

Fotovoltaické panely a řada dalších komponent systému bývá instalována na venkovních silně exponovaných místech, kde hrozí poškození vlivem vzniku přepětí nebo přímého zásahu bleskem. V případě instalací na rodinných domech je pravděpodobnost přímého úderu blesku malá (jedou za stovky let), u velkých instalací však hrozí úder v průměru jednou za několik let.

Ochranou může být i pojištění, kdy je třeba kromě instalace pojistit také ušlý zisk. Často se v případě instalací na objektech řeší jako připojištění vlastní stavby. Dále budou diskutovány technické prostředky pro ochranu instalace.

Při návrhu je třeba určit míru rizika. Norma ČSN EN 62305-2 uvádí 4 kategorie, na FV instalace nebývají kladeny velké požadavky a často se řadí do 3. kategorie. U velkých FV instalací lze navíc zajistit zákaz vstupu osob při bouřce (poučení pracovníků).

Cílem provedených opatření je podle důležitosti nejprve zajistit bezpečnost osob a zabránit vzniku požáru a poté ochránit zařízení. Hromosvod zajišťuje ochranu osob a zabraňuje vzniku požáru. Dle nových poznatků se upřednostňuje provedení oddáleného hromosvodu, kdy zařízení nejsou spojena s hromosvodnou soustavou, naopak je zanechána určitá vzdálenost, typicky 40-60 cm. Pro vnitřní ochranu zařízení postačují svodiče přepětí (II.stupně).

Spojený (neoddálený) hromosvod je klasické, dříve běžné používané provedení. Všechny vodivé části (rámy FV panelů, konstrukce...) jsou elektricky připojeny

na hromosvodnou soustavu. Není třeba zajistit odstupovou vzdálenost, zařízení však není efektivně chráněno proti zničení. Pro vnitřní ochranu zařízení je třeba zvolit dražší svodiče přepětí a bleskových proudů (I.+II. stupně).

V případě realizace FV systému na objektu s instalovaným hromosvodem lze často využít současného hromosvodu a zemnicí soustavy, někdy je třeba změnit či doplnit systém jímacích tyčí. U nové FV elektrárny na pozemku se vytvoří mřížová zemnicí soustava (20x20m) v hloubce 50-70cm. V případě závrtných kovových tyčí často postačuje elektrické propojení konstrukcí a zemnicí pásek kolem obvodu FVE.

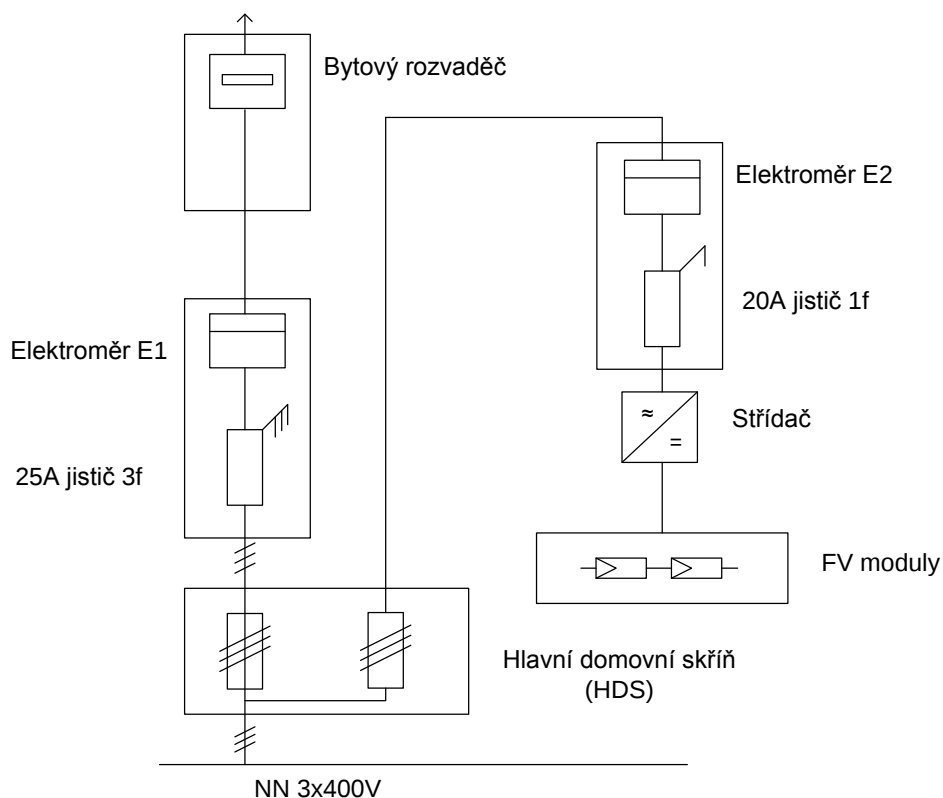
Jsou-li v rámci FV systému instalovány i datové rozvody, můžeme se rozhodnout je též chránit pomocí přepětiových ochran. Instalaci je třeba provést tak, aby hrozilo minimální zavlčení a přeskok přepětí na datové linky. Při volbě typu a počtu ochranných prvků je vhodné zohlednit riziko a ekonomické hledisko.

2.5. Způsob připojení FV elektráren

Z hlediska připojení do distribuční soustavy lze v ČR dle legislativních podmínek a předpisů provozovatelů distribučních soustav využít dvě základní formy podpory a technického provedení FV elektrárny.

2.5.1. *Varianta využití v případě přímého výkupu*

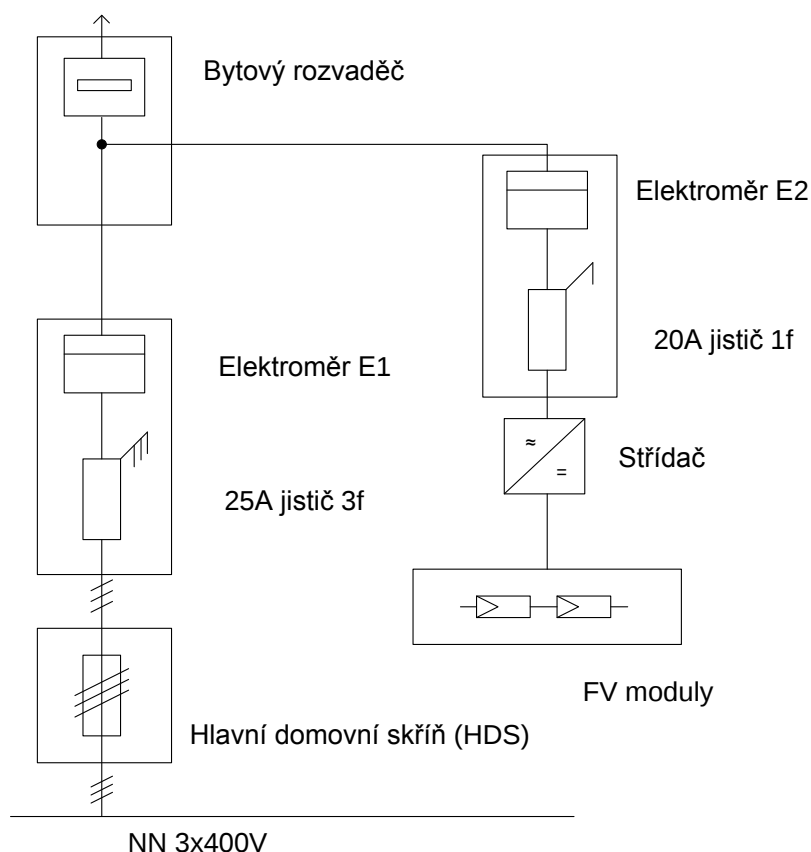
- Provozovatel FV elektrárny bude dodávat veškerou vyrobenou energii do distribuční soustavy (měřeno elektroměrem E2).
- Energii pro svoji vlastní spotřebu může nadále nakupovat dle předchozích podmínek (měřeno elektroměrem E1).
- Provozovatel přenosové soustavy má povinnost vykoupit veškerou energii vyrobenou obnovitelným zdrojem za předem stanovenou cenu pro daný rok.



Obrázek 2.9 Schéma připojení formou přímého výkupu

2.5.2. Varianta využití „zeleného bonusu“

- Provozovatel FV elektrárny využívá vyrobenou energii přednostně pro svou vlastní spotřebu.
- Za veškerou vyrobenou energii z FV elektrárny dostává tzv. „zelený bonus“.
- Pokud aktuálně vyrábí více energie, nežli spotřebovává, může navíc prodávat přebytky energie pomocí distribuční sítě za tržní cenu energie
- Pokud aktuálně spotřebovává energii vyrobenou z FV elektrárny, šetří tím za nákup energie z distribuční sítě.
- Pokud spotřebovává více energie, nežli vyrábí, může tuto energii nadále nakupovat dle předchozích podmínek.



Obrázek 2.10 Schéma připojení formou „zeleného bonusu“

2.6. Servis a monitoring solárních elektráren

Pro dosažení maximální výtěžnosti instalovaného FV systému je třeba vhodně zvolit jeho údržbu a zajistit včasné zjištění problémů, jejich rychlou lokalizaci a odstranění. Pomocí vhodně navrženého systému sledování provozu elektrárny lze zajistit zvýšení výtěžnosti až o několik procent.

Údržba spočívá v kontrole stavu jednotlivých elektrických zařízení (panely, střídače, kabeláž, rozvaděče). Dle uvážení lze provádět též čištění FV panelů (především čištění od sněhu může mít značný přínos) a údržbu místní zeleně, aby nezpůsobovala stínění.

V případě větších systémů se vyplatí provádět pravidelné prohlídky a instalovat monitorovací systém s dálkovým přenosem a zajistit sledování a rychlé servisní zásahy. Výpadek 1MW bloku elektrárny může totiž způsobit finanční ztrátu až 60 000Kč denně.

Dálkový monitorovací systém obvykle spočívá v datovém propojení střídačů, senzorů elektrických i neelektrických veličin (senzor intenzity záření a teploty), stavu jisticích a vypínacích prvků, pulzního výstupu elektroměru a odesílání těchto dat na vzdálený server. Data jsou následně vyhodnocována a případně generována poplachová hlášení přes email či SMS. V případě systémů tvořených řetězcovými střídači lze většinu informací získávat přímo ze střídačů. Pokud jsou použity centrální měniče, je vhodné instalovat řadu proudových senzorů a sledovat tak jednotlivé části paralelně propojených větví s panely. Jedině sledováním jednotlivých úseků můžeme zaručit detekci výpadku nebo poklesu výkonu části elektrárny.

2.7. Rozvoj fotovoltaiky a legislativní podmínky v ČR

Fotovoltaické systémy instalované v České republice do roku 2005 sloužily hlavně jako zkušební a výzkumná zařízení pro sledování jejich funkčnosti v našich klimatických podmínkách, testování různých technologií panelů, uchování energie, její konverze a využití. Drobné instalace vznikaly převážně při univerzitách a výzkumných ústavech. Význam těchto zařízení byl z hlediska vyrobené energie druhořadý, jako zdroj energie mohl být považován jen malý počet autonomních zařízení postavených pro zásobování odlehlých míst. Překážkou pro širší využití byla pořizovací cena a nedostatek zkušeností, byl však znám velký budoucí potenciál a úspěšné příklady využívání tohoto zdroje v zahraničí. Pro širší využití tohoto obnovitelného zdroje bylo třeba připravit legislativní podmínky a zvýšit informovanost o tomto novém odvětví. K přelomu došlo v roce 2005, kdy byl schválen zákon č. 180/2005 Sb. O podpoře obnovitelných zdrojů ze dne 31.3.2005, který se stal základem podpory obnovitelných zdrojů v ČR v souladu se směrnicemi Evropského společenství.

Jeho účelem bylo:

- Podpořit využití obnovitelných zdrojů energie
- Zajistit trvalé zvyšování podílu obnovitelných zdrojů
- Přispět k šetrnému využívání přírodních zdrojů a k trvale udržitelnému rozvoji
- Vytvořit podmínky pro naplnění indikativního cíle podílu elektřiny na hrubé spotřebě v ČR ve výši 8% k roku 2010 a pro další zvyšování tohoto podílu po roce 2010

Dále stanovil, že:

- Provozovatel distribuční soustavy (DS) je povinen přednostně připojit výrobce z obnovitelného zdroje energie (OZE). Je povinen připojit takovýto zdroj, pokud tímto nebude prokazatelně omezen či ohrožen provoz DS.
- Podpora bude zajištěna formou přímého výkupu či zeleného bonusu, výrobce může tento způsob 1x ročně změnit
- Výkupní ceny se stanoví na rok dopředu, meziroční pokles může být maximálně 5%.
- Výkupní ceny musí zaručit 15letou návratnost investice.

Dalšími legislativními opatřeními byly zejména:

Vyhláška 475 ze dne 30.11.2005, kterou se provádějí některá ustanovení o podpoře využívání obnovitelných zdrojů

Vyhláška 364 ze dne 18.11.2007, kterou se mění vyhláška č. 475

Prodlužuje předpokládanou životnost fotovoltaické výroby a současně podporu na 20let.

Uvádí požadavky na účinnost FV zdroje (pro zajištění finanční návratnosti).

Vyhláška 426 ze dne 11.10.2005 o podrobnostech udělování licencí pro podnikání v energetických odvětvích

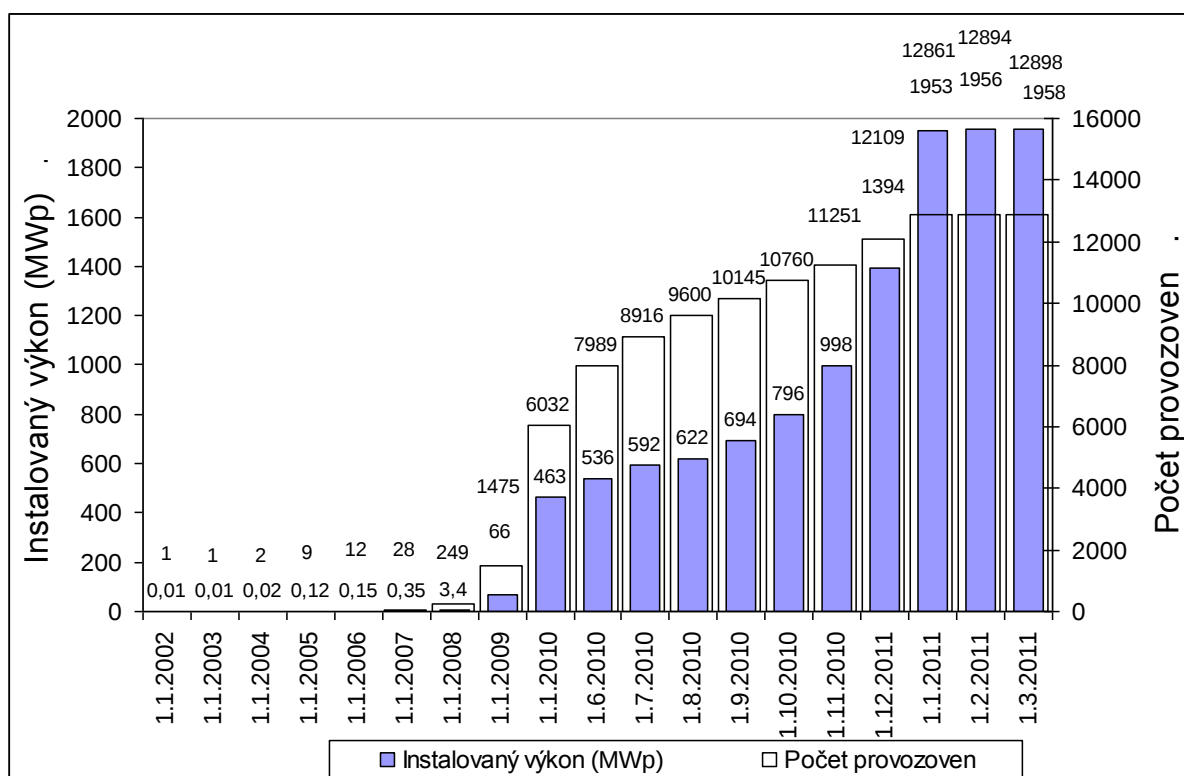
Vyhláška 363 ze dne 18.11.2007, kterou se mění vyhláška č. 426/2005 Sb.

I když zpočátku existovaly různé dotační programy pro podporu výroby elektrické energie pomocí fotovoltaiky (např. částečné hrazení pořizovacích nákladů programy zajišťovanými SFŽP, MPO), časem se přešlo na výlučnou podporu pouze pomocí garantovaných výkupních cen energie. K tomuto kroku mimo jiné vedla snaha o efektivní využívání instalovaných systémů. Garantované výkupní ceny jsou stanoveny vždy na celý následující rok dopředu Energetickým regulačním úřadem (ERU). Bouřlivý rozvoj fotovoltaiky ve světovém měřítku spolu s poklesem pořizovacích cen komponent v posledních letech znamenal zásadní průlom. Bohužel na změny vláda a jednotlivé orgány včas nereagovaly, což mimo jiné způsobilo masivní nárůst instalovaného výkonu. Toto odvětví se na čas stalo skutečnou „továrnou na peníze“ místo

původně zamýšlené snahy o dlouhodobě udržitelné průmyslové odvětví generující přiměřený zisk. Důsledkem jsou všechny problémy plynoucí z unáhlené rychlé výstavby, včetně poškození fotovoltaiky v očích veřejnosti. Většina výkonu je soustředěna na instalace na volné půdě místo využitelných ploch na střechách, většina výkonu je připojena do sítí VN místo lokálního zásobování objektů. Z instalovaného výkonu mají provozovatelé FV elektráren výrazně vyšší zisky nežli bylo nutné, což se promítá v cenách elektrické energie ostatních spotřebitelů. V České republice bylo během několika let vytvořeno zcela nové odvětví s obrovským obratem a množstvím pracovních míst, které ke konci roku 2010 vlivem nových opatření týkajících se změn podpory a zastavením vydávání nových připojovacích povolení téměř zaniklo.

Tabulka 2.1 Počáteční výkupní ceny pro FV systémy instalované v daném roce

Datum uvedení do provozu	Přímý výkup (Kč/MWh)	Zelený bonus (Kč/MWh)	Pozn.
Před 2006	6,28	5,67	
2006	13,20	12,59	
2007	13,20	12,59	ceny zachovány
2008	13,46	12,65	
2009	12,89	11,91	výkon do 30kW
	12,79	11,81	výkon nad 30kW
2010	12,25	11,28	výkon do 30kW
	12,15	11,18	výkon nad 30kW
<i>od března 2010 bylo pozastaveno vydávání kladných stanovisek pro nové instalace</i>			
2011	7,50	6,50	výkon do 30kW
	5,90	4,90	výkon 30-100kW
	5,50	4,50	výkon nad 100kW



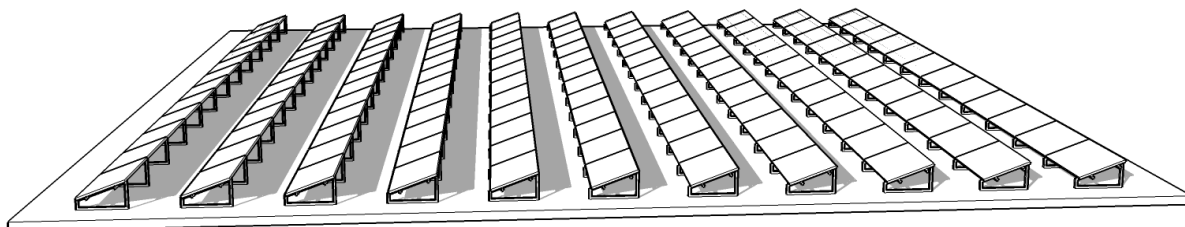
Obr. 2.11 Instalovaný výkon a počet instalací v ČR

3. FV INSTALACE NA PLOCHÝCH STŘECHÁCH BUDOV (K. STANĚK)

3.1. Úvodem

Tento text slouží jako rozšíření prezentace a jako orientační podklad pro navrhování FV instalací na plochých střechách.

Ploché střechy s dostatečnou rezervou únosnosti jsou zvláště vhodné pro FV instalace. Ty jsou na rozdíl od systémů na terénu často prováděné v řadách tvořených po výšce pouze jedním panelem. Důvodem je snaha o snížení zatížení větrem, které působí na panely a konstrukční prvky instalace.

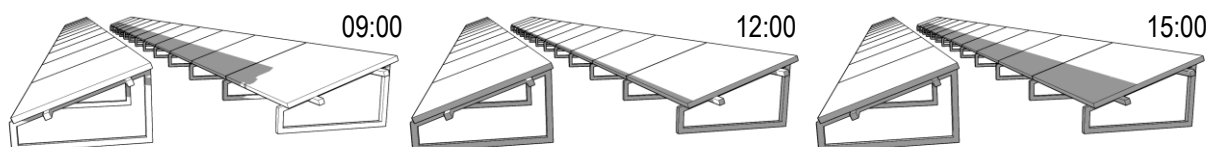


Obrázek 3.1 Běžná střešní FV instalace s řadami tvořenými jedním FV panelem.

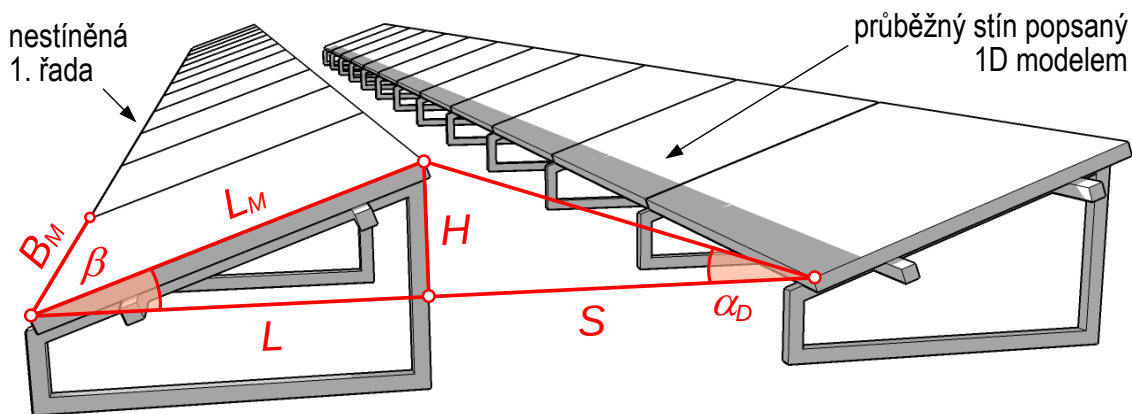
Tyto instalace mají dvě klíčová specifika, která dále rozebereme podrobněji. Jedná se o (1) vliv vnitřního stínění a rozestupy řad a (2) nároky na kotvení.

3.2. Vnitřní stínění a pokrytí střešní plochy

K vnitřnímu stínění u FV instalací na plochých střechách dochází, stíní-li si navzájem jednotlivé řady panelů. Tato situace nevyhnutelně nastane v zimních měsících s nízkým sluncem, pokud nenavrháme značné rozestupy mezi řadami. Na druhou stranu vliv vnitřního stínění je podstatný pouze ve dnech s malou oblačností, a takových není v zimních měsících mnoho.



Obrázek 3.2 Příklad vnitřního stínění pro 21. prosinec.



Obrázek 3.3 Základní geometrické veličiny FV instalace na ploché střeše.

Otázka tak zní, jaké rozestupy mezi řadami volit, abychom se vyhnuli přílišným ztrátám, ale zároveň dosáhli vysokého pokrytí střešní plochy.

Nejprve zavedeme základní geometrické vztahy (Obrázek 3.3). Klíčovou veličinou je tzv. návrhový úhel, α_D [°], který určuje rozestupy mezi řadami, S [m]. Pro ty platí

$$S = \frac{H}{\tan \alpha_D} = \frac{L_M \cdot \sin \beta}{\tan \alpha_D} \quad [\text{m}] \quad (3.1)$$

kde H [m] je rozměr FV panelu promítnutý do svislé roviny, β [°] je sklon FV panelů od (vodorovné) roviny střechy a L_M [m] je rozměr FV panelu. Celkový úsek střešní plochy připadající na jednu řadu FV panelů, $S+L$ [m], získáme jako

$$S + L = \frac{L_M \cdot \sin \beta}{\tan \alpha_D} + L_M \cdot \cos \beta \quad [\text{m}] \quad (3.2)$$

kde L [m] je rozměr FV panelu promítnutý do roviny střechy. Zavedeme-li šířku FV panelu jako B_M [m], pak pro jeho plochu platí

$$A_M = L_M \cdot B_M \quad [\text{m}^2] \quad (3.3)$$

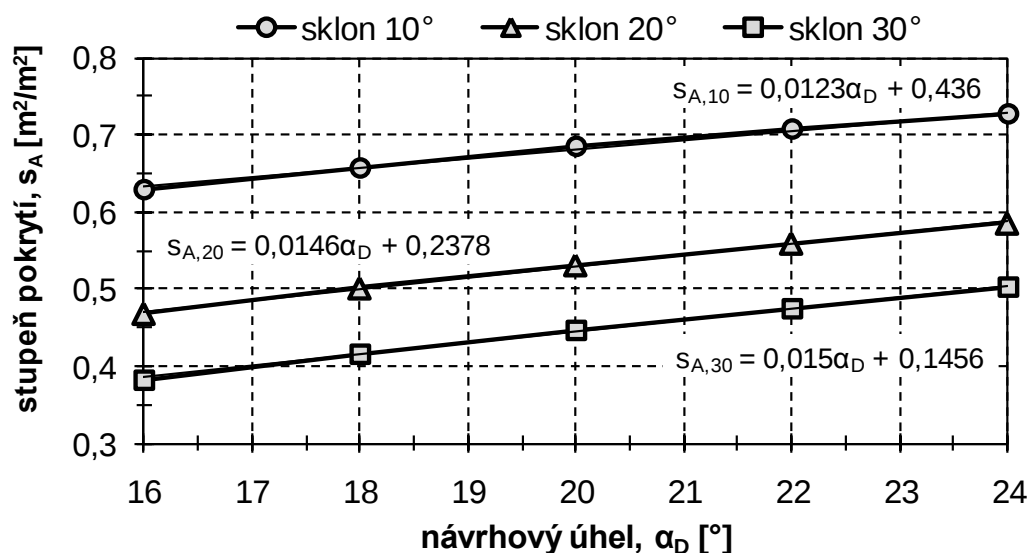
Plocha střechy, A [m²], potřebná k instalaci jednoho panelu je

$$A = (S + L) \cdot B_M \quad [\text{m}^2] \quad (3.4)$$

S využitím vztahů (3.1) až (3.4) můžeme vypočítat plošnou hustotu instalace, tj. plochu panelů vztaženou k ploše střechy, jako

$$s_A = \frac{A_M}{A} = \left(\frac{\sin \beta}{\tan \alpha_D} + \cos \beta \right)^{-1} \quad [\text{m}^2/\text{m}^2] \quad (3.5)$$

Veličinu s_A [m^2/m^2] pojmenujeme jako stupeň pokrytí střešní plochy. Rovnicí (3.5) jsme pro něj získali vyjádření závislé pouze na dvou veličinách: (1) sklonu FV panelů β a (2) návrhovém úhlu α_D .



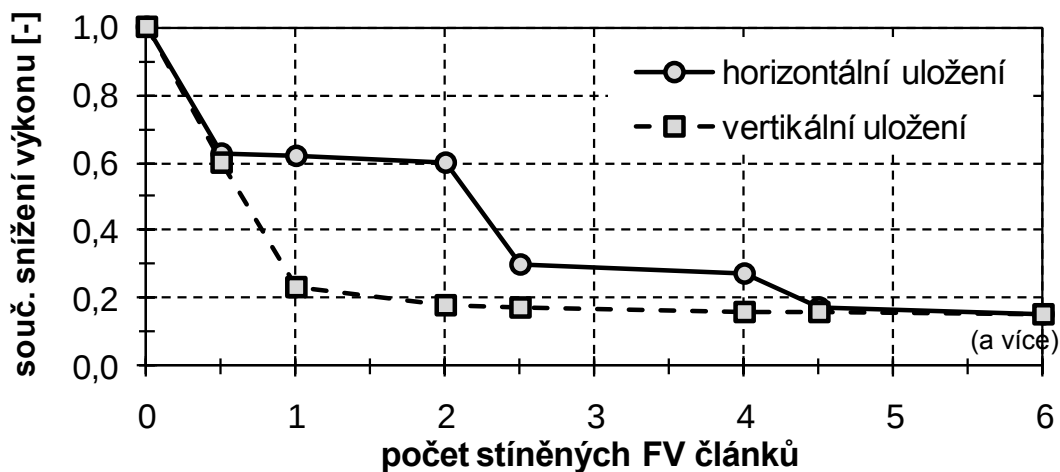
Obrázek 3.4 Stupeň pokrytí střešní plochy v závislosti na sklonu a návrhovém úhlu. Uvedené lineární aproximace jsou odvozené pro rozsah α_D od 16° do 24°.

Návrhový úhel α_D se standardně volí rovný výšce slunce nad obzorem v poledne zimního slunovratu (21. prosinec). Např. pro Prahu (50,1° s. š.) dostaneme $\alpha_D = 16,5^\circ$, pro Brno (49,2° s. š.) $\alpha_D = 17,4^\circ$ apod. Jedná se o dobré první přiblížení, problém však lze studovat podrobněji. Další analýzu omezíme na FV panely na bázi krystalického křemíku (c-Si), které jsou použity u 90 % současných instalací.

Podstatné je chování c-Si FV panelu při jasné obloze při částečném zastínění z blízkého zdroje (předchozí řady). Při vzájemném stínění jednotlivých řad je panel stíněn vždy od spodní hrany. Pokles výkonu však závisí na způsobu jeho uložení. Klíčovou roli zde hrají překlenovací diody, které se projeví jen v případě horizontálního uložení (Obrázek 3.5).



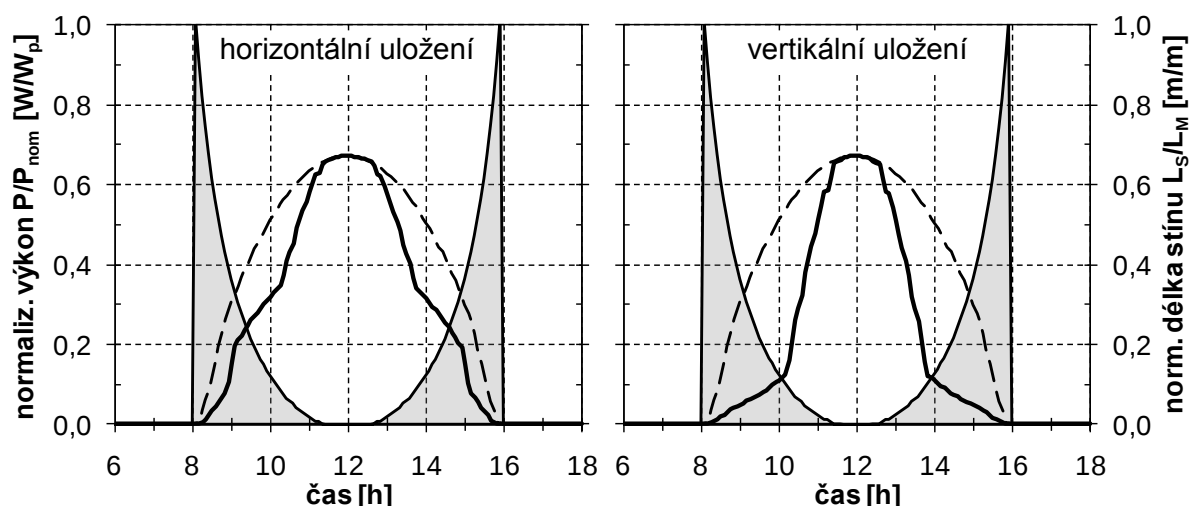
Obrázek 3.5 Schéma běžného c-Si FV panelu s články do série a se třemi překlenovacími diodami. Vyznačeny jsou směry stínění v závislosti na jeho uložení.



Obrázek 3.6 Součinitel snížení výkonu c-Si FV panelu s články do série při částečném stínění při jasné obloze v závislosti na způsobu uložení.

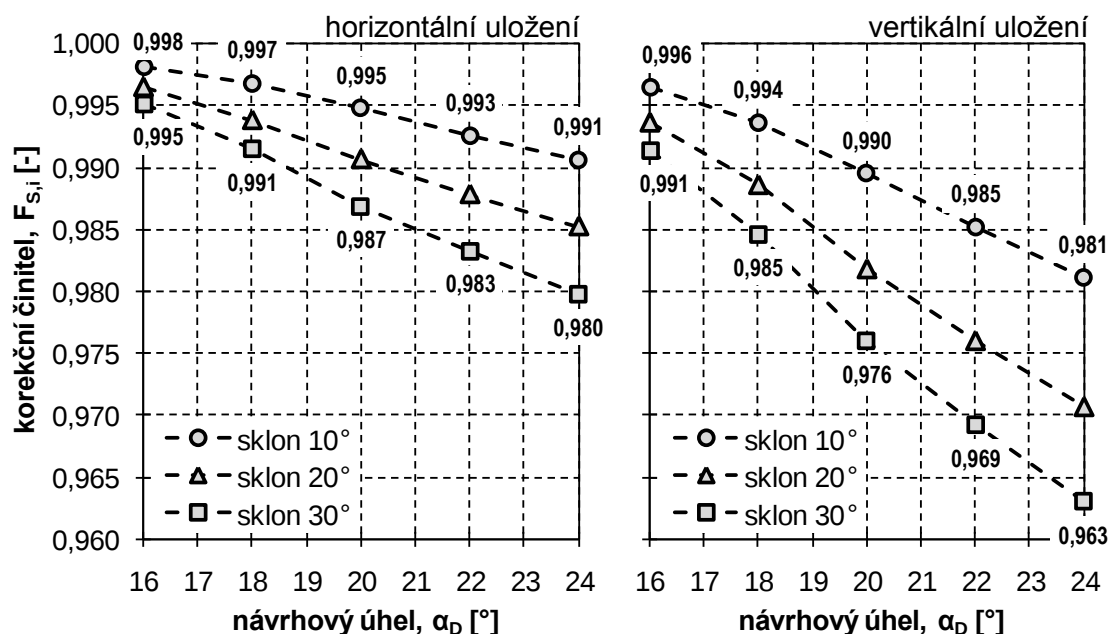
Je zřejmé, že překlenovací diody při horizontálním uložení zajišťují odstupňovaný pokles výkonu panelu, v tomto případě ve třech krocích (3 diody). Naproti tomu při vertikálním uložení již jeden zastíněný článek znamená pokles výkonu na úroveň, která odpovídá jen difuzní složce záření (Obrázek 3.6). Příklad vlivu vnitřního stínění na výkon FV panelu během zimního slunovratu s jasnou oblohou uvádí Obrázek 3.7 (stanoveno výpočtem).

□ délka stíněné aktivní plochy — — nestíněný norm. výkon — stíněný norm. výkon



Obrázek 3.7 Pokles výkonu c-Si FV panelu pro 21. prosinec s jasnou oblohou v závislosti na způsobu uložení. Lokalita Praha, orientace jih, sklon $\beta = 30^\circ$, návrhový úhel $\alpha_D = 16,5^\circ$.

Souhrnný vliv vnitřního stínění na roční produkci FV panelů můžeme vyjádřit ve formě korekčního činitele vnitřního stínění, $F_{S,i}$ [-]. Hodnoty pro instalaci na ploché střeše s jižní orientací ukazuje Obrázek 3.8. Výpočet je proveden pro lokalitu Praha (50,1° s. š., 14,2° v. d.) a klimatický rok z databáze Meteonorm.



Obrázek 3.8 Korekční činitel roční produkce vlivem vnitřního stínění v závislosti na sklonu, návrhovém úhlu a způsobu uložení FV panelů.

Pokles roční produkce při horizontálním uložení FV panelů je, při stejném návrhovém úhlu a sklonu panelů, přibližně poloviční oproti uložení vertikálnímu

(Obrázek 3.8). Nepříznivý vliv vnitřního stínění také klesá pro níže skloněné panely, což je dáno posunem těžiště jejich produkce do letních měsíců.

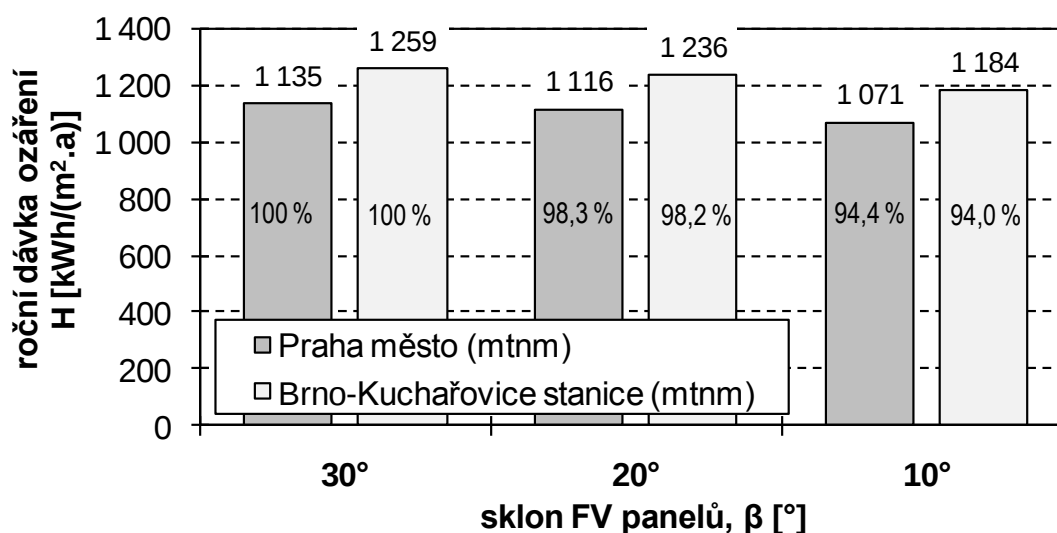
Následující tabulka ukazuje, jaký návrhový úhel bychom museli volit pro jižně orientovanou instalaci na ploché střeše, pokud by měl být pokles roční produkce 1 %. A dále, jakého stupně pokrytí střešní plochy bychom za tohoto požadavku dosáhli. Výpočet je opět proveden pro lokalitu Praha.

sklon, β	10°	20°	30°
způsob uložení panelů	návrhový úhel, α_D [°]		
horizontální	24,7	20,3	18,7
vertikální	19,9	17,4	16,3
	stupeň pokrytí střešní plochy, s_A [-]		
horizontální	0,74	0,53	0,43
vertikální	0,68	0,49	0,39

Z rozboru plyne, že běžný přístup, kdy se návrhový úhel α_D volí rovný výšce slunce nad obzorem v poledne zimního slunovratu, je v případě jižně orientovaných instalací bezpečný, a pro řadu případů až příliš. Pro nejnejpříznivější případ vertikálně uložených panelů ve sklonu 30° je pokles v roční produkci vlivem vnitřního stínění na úrovni 1 %. U ostatních uspořádání je však možné bez navýšení ztráty dosáhnout vyššího pokrytí střešní plochy, např. při horizontálním uložení panelů ve sklonu 20° o 36 %.

3.3. Produkce elektrické energie

První informací pro výpočet produkce FV systému je dostupné množství slunečního záření v dané lokalitě, které dopadá v rovině FV panelů. Značí se jako dávka ozáření, H [kWh/(m².a)]. Obrázek 3.9 ji udává pro dvě lokality v závislosti na sklonu panelů s jižní orientací. Zpracováno pomocí databáze Meteonorm.



Obrázek 3.9 Roční dávka ozáření v rovině FV panelů s jižní orientací v závislosti na sklonu.

Ve výpočtu roční produkce vyjdeme ze jmenovitých účinností hlavních prvků systému, kterými jsou FV panely a DC/AC měniče napětí. Tyto účinnosti označíme pro panely jako η_{STC} [-] (t.j. při standardních testovacích podmínkách, STC) a pro měniče η_{EURO} [-] (tzv. EURO-účinnost). V podmínkách skutečného provozu musíme samozřejmě zohlednit další ztráty. Jejich přehled pro jižně orientovanou instalaci s běžnými c-Si FV panely uvádí následující tabulka.

druh ztráty	DC strana [%]
spektrální ztráty	1,0
ztráty odrazem	3,1
teplotní ztráty	2,9
ztráty vlivem nízké hladiny ozáření	4,4
ztráty vlivem odchylek el. parametrů	2,0
ztráty v DC vedení	1,3
výkonový součinitel na DC straně, PR_{DC} [-]	0,86
	AC strana [%]
ztráty na DC/AC měničích	$(1 - \eta_{EURO}) \times 100$
ztráty v AC vedení	1,0

výkonový součinitel na DC straně, PR_{AC} [-]	$\eta_{EURO} \times 0,99$
---	---------------------------

Zvolíme-li EURO-účinnost měničů ve výši 95 %, obdržíme celkový výkonový součinitel systému, PR [-], ve tvaru

$$PR = PR_{DC} \cdot PR_{AC} = 0,86 \cdot 0,95 \cdot 0,99 = 0,81 \quad [-] \quad (3.6)$$

Tato hodnota představuje jakousi optimistickou dolní mez ztrát. Často je nutné připočítat ztráty vlivem zvýšeného horizontu, vlivem zašpinění panelů, ztráty při transformaci na vysoké napětí a v neposlední řadě ztráty vlivem blízkých zdrojů stínění, ke kterým u instalací na budovách často dochází (antény, komíny, sloupy el. vedení, stromy, ostatní budovy apod.).

Každý 1 m² FV panelů tak ročně vyrobí elektrickou energii ve výši

$$e = \eta_{STC} \cdot PR \cdot F_{s,i} \cdot H \quad [\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})] \quad (3.7)$$

kde $F_{s,i}$ [-] je korekční činitel vnitřního stínění. To představuje produkci vztahenou na 1 m² střešní plochy ve výši

$$e_A = e \cdot s_A \quad [\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})] \quad (3.8)$$

kde s_A [m²/m²] je stupeň pokrytí střešní plochy.

Pokud bychom chtěli produkci vztáhnout na 1 kW_p instalovaného výkonu, bude

$$e = PR \cdot F_{s,i} \cdot H \quad [\text{kWh}/(\text{kW}_p \cdot \text{a})] \quad (3.9)$$

Nyní použijeme výsledky z kapitoly 3.2 k odhadu roční produkce FV systému s c-Si FV panely na jižně orientované ploché střeše. Pro vliv vnitřního stínění zavedeme podmínku poklesu roční produkce ve výši 1 %, tedy $F_{s,i} = 0,99$. Jmenovitou účinnost FV panelů zvolíme ve výši $\eta_{STC} = 14$ %. Výsledky shrnuje následující tabulka.

sklon, β	10°	20°	30°
způsob uložení panelů	roční produkce na 1 m ² panelů, e [kWh/(m ² ·a)]		
horizontální / vertikální	120,2	125,3	127,4

	roční produkce na instalovaný kW_p , e [$\text{kWh}/(\text{kW}_p \cdot \text{a})$]		
horizontální / vertikální	859	895	910
	roční produkce na 1 m^2 střešní plochy, e_A [$\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$]		
horizontální	88,9	66,4	54,8
vertikální	81,7	61,4	49,7

Ze srovnání plyne, že při horizontálním uložení panelů ve sklonu 20° vyrobíme na stejné ploše střechy ročně o 33,6 % elektřiny více, než při vertikálním uložení ve sklonu 30° . Přitom rozdíl produkce vztažený na jednotku instalovaného výkonu činí jen 1,6 %, což představuje malý vliv na návratnost investice.

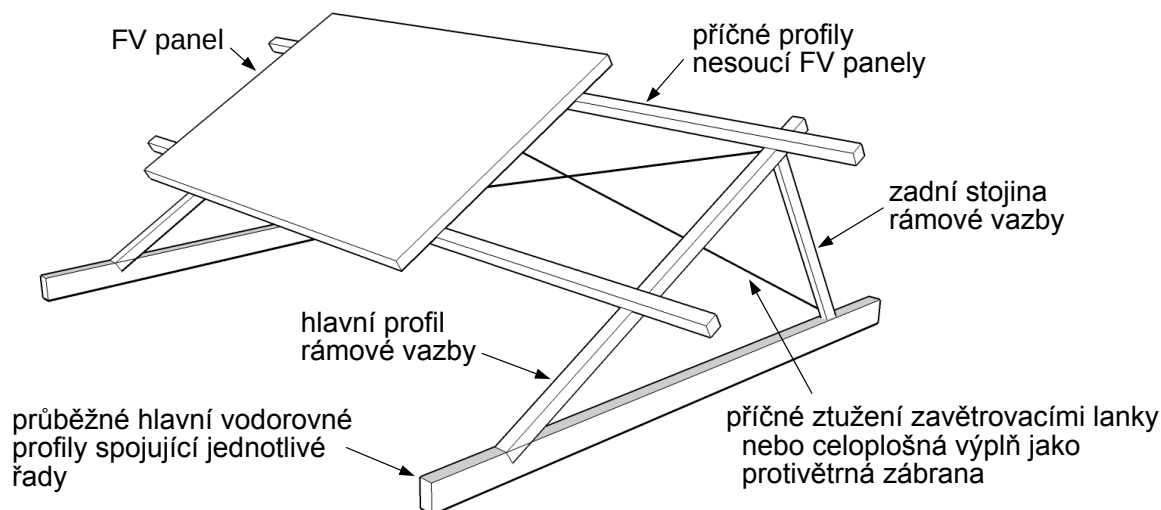
3.3.1. *Kotvení FV instalace na ploché střeše*

Pro návrh samotné konstrukce FV instalace a jejího upevnění na ploché střeše jsou rozhodující nahodilá klimatická zatížení sněhem a větrem. Zatímco zatížení sněhem rozhoduje hlavně o volbě profilů podpůrné konstrukce, ze zatížení větrem plynou nároky na upevnění.

Pro upevnění FV instalace na plochou střechu přicházejí v úvahu dva způsoby: (1) zátěžové (gravitační) kotvení nebo (2) přímé kotvení. Přímé kotvení předpokládá průniky bodových kotev střešním pláštěm, ale představuje minimální přitížení nosné konstrukce objektu. Klíčovým požadavkem je zde bezvadné ošetření průniků tak, aby byla zachována hydroizolační funkce střešního pláště. U zátěžového upevnění je rozhodující dostatečná rezerva únosnosti konstrukce objektu. Kombinace obou způsobů upevnění se spíše nedoporučuje.

V každém případě je v rámci projektu nutné provést posouzení stávajícího stavu konstrukce objektu z hlediska statické spolehlivosti s ohledem na možnost přitížení od FV instalace. Ve většině případů je rozhodující posouzení na II. mezní stav (tzv. stav použitelnosti), a to zejména u vodorovných prvků konstrukce zastřešení. Neboli sledujeme, zda přitížení vnesené FV instalací nevyvolá jejich nadměrné deformace, v tomto případě průhyby. Výsledkem statického posudku je rezerva únosnosti konstrukce objektu odpovídající

limitním deformacím. Poté je možné zvolit odpovídající způsob upevnění FV instalace.



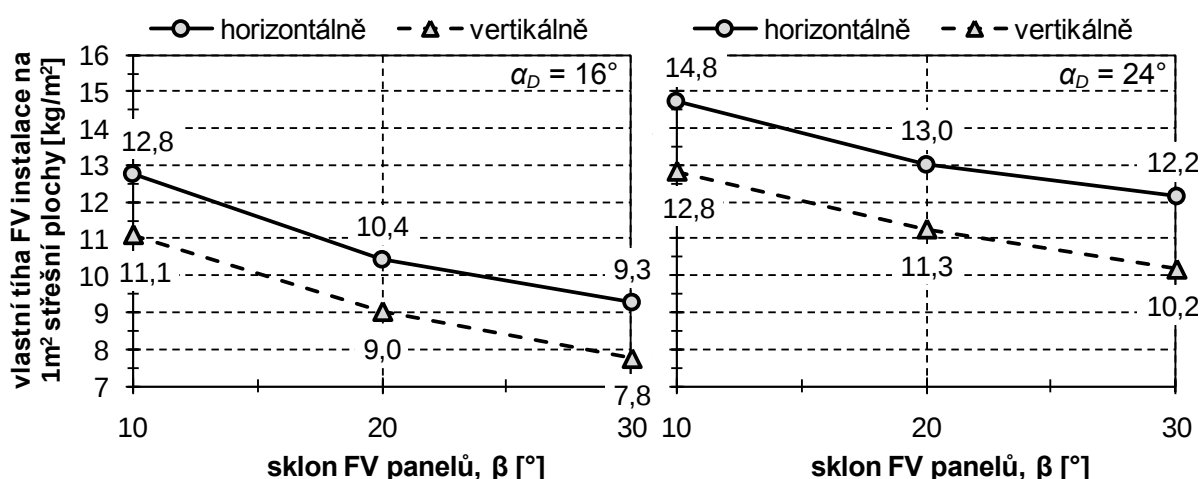
Obrázek 3.10 Hlavní prvky běžné podpůrné konstrukce FV panelů pro instalace na plochých střechách.

Vlastní tíha samotných FV panelů a kovové či dřevěné podpůrné konstrukce přepočtená na 1m^2 střešní plochy je malá. Orientační hodnoty v kg/m^2 v závislosti na způsobu uložení FV panelů (horizontální, vertikální), jejich sklonu θ a návrhovém úhlu α_D uvádí Obrázek 3.11. Ve výpočtu jsou uvažovány rámové FV panely s předním krycím sklem a zadní plastovou fólií o rozměru $1,6 \times 1,0 \text{ m}$ a s plošnou hmotností $12,5 \text{ kg/m}^2$. Podpůrná konstrukce je uvažovaná hliníková s nerezovými kotevními prvky. Řady jsou po výšce tvořené pouze jedním panelem, viz Obrázek 3.10. Výpočet je proveden pro návrhové úhly 16° a 24° , které můžeme považovat za mezní. Pro mezilehlé návrhové úhly lze interpolovat.

Obrázek 3.11 ukazuje, že přetížení střechy od panelů a podpůrné konstrukce je vyšší pro horizontálně uložené panely. To je dáno vyšším podílem profilů podpůrné konstrukce na stejný počet panelů. A přetížení střechy samozřejmě roste se "zahušťováním" instalace podle rostoucího návrhového úhlu (tj. zkracováním odstupů mezi řadami).

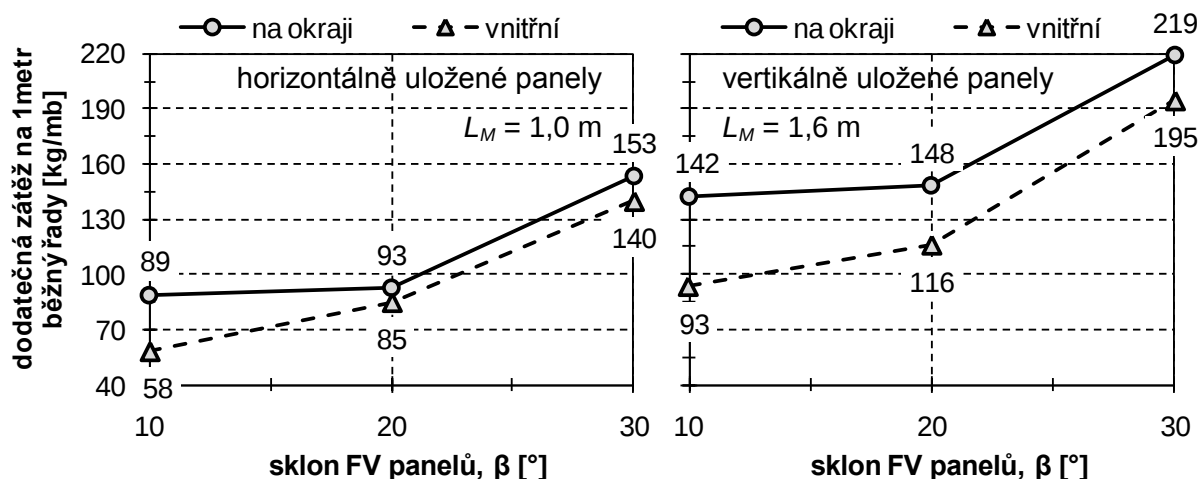
Pokud se rozhodneme pro zátěžové upevnění FV instalace, pomáhá nám účinky větru částečně kompenzovat vlastní tíha panelů a podpůrné konstrukce, ale

zdaleka ne dostatečně. Proto musíme každou řadu v místě rámových vazeb dále přitížit. Účinkem větru může dojít ke třem jevům: (1) klopení řad, (2) posunutí řad a (3) nadzdvihnutí řad. Klopení řad vyloučíme jejich vzájemným propojením hlavními vodorovnými profily (dostatečně tuhými). Nebezpečí posunutí, ale zejména nadzdvihnutí, částečně zmírníme připevněním protivětrných zábran (celoplošných výplní) ze zadní strany řad. Zbývající účinky větru musíme kompenzovat dodatečným přitížením. Protože vítr má největší sílu při okrajích střechy za atikou, můžeme problém dále rozdělit na okrajové a vnitřní řady. Následující příklad orientačně vymezuje velikost dodatečného přitížení.

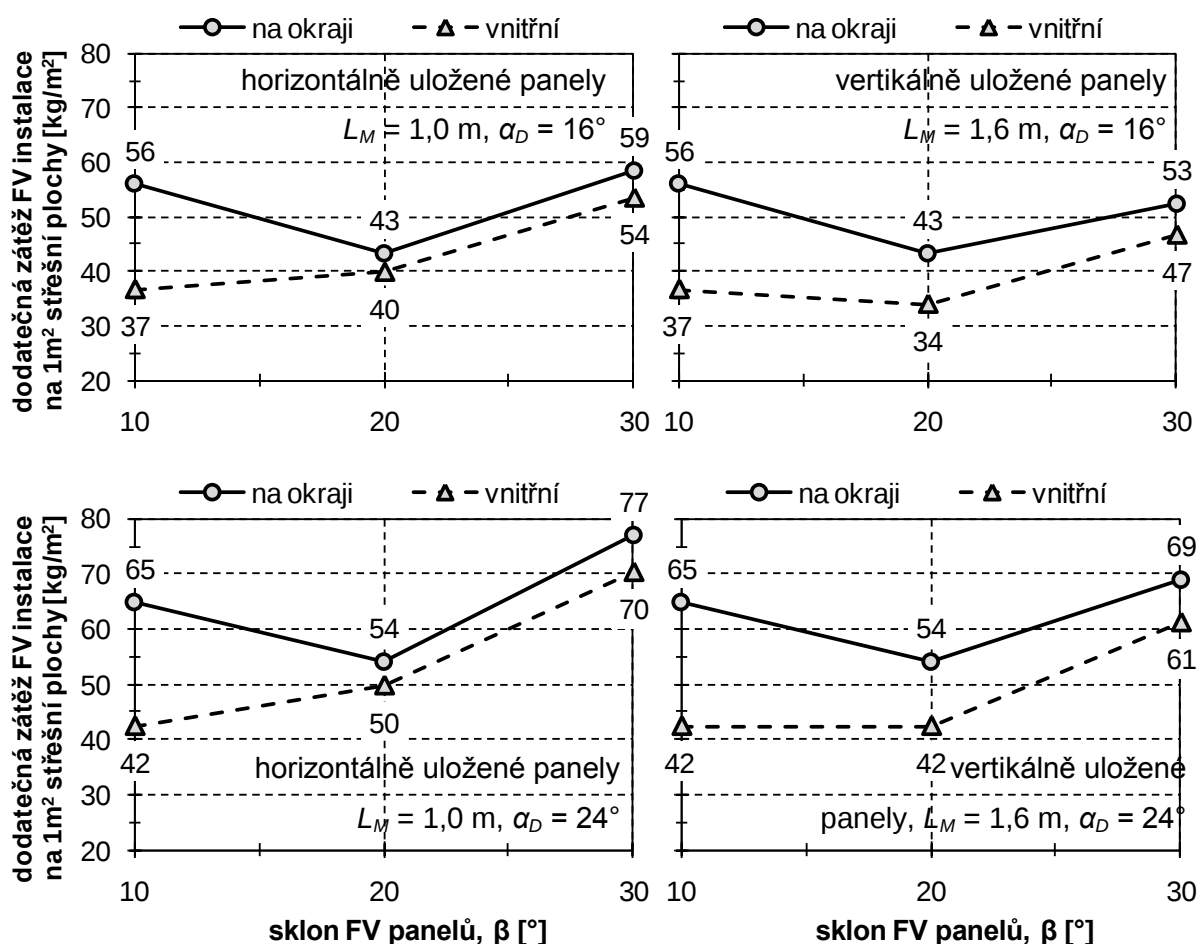


Obrázek 3.11 Vlastní tíha FV panelů a podpůrné k-ce vztažená na 1 m² střešní plochy v závislosti na způsobu uložení FV panelů, sklonu a návrhovém úhlu.

Výpočet je proveden pro lokalitu ve II. větrné i sněhové oblasti, čemuž odpovídá např. okolí Brna. Je uvažována kategorie terénu II (krajina s nízkou vegetací). Plochá střecha s výškou atiky 0,2 m je uvažována ve výšce 12 m nad terénem. FV panely a schéma instalace jsou uvažovány stejné jako v předchozím výpočtu a je počítáno s propojením jednotlivých řad a s protivětrnými zábranami na zadní straně. Obrázek 3.12 uvádí hodnoty dodatečné zátěže řad FV panelů v kg/mb (vztažené na 1 metr běžný řady) v závislosti na způsobu uložení FV panelů, jejich sklonu β a poloze na střeše (na okraji, vnitřní).



Obrázek 3.12 Dodatečná zátěž FV instalace vztažená na 1 mb řad v závislosti na způsobu uložení FV panelů, sklonu a poloze na střeše (na okraji, vnitřní).



Obrázek 3.13 Dodatečná zátěž FV instalace vztažená na 1 m² střešní plochy v závislosti na způsobu uložení FV panelů, sklonu a poloze na střeše (na okraji, vnitřní).

Je zřejmé, že s rostoucí výškou horní hrany panelů nad střešní rovinou roste potřebné přitížení - ať už je to dáno rostoucím sklonem či způsobem uložení.

Jaké lze očekávat výsledné dodatečné plošné přetížení střešní konstrukce v kg/m^2 ukazuje Obrázek 3.13. Svou roli zde opět hraje hustota instalace vyjádřená pomocí návrhového úhlu α_D . Pro mezilehlé návrhové úhly lze interpolovat.

Celkové výsledné přetížení střešní konstrukce je potom součtem vlastní tíhy FV panelů a podpůrné konstrukce a dodatečné zátěže. S touto hodnotou porovnáváme rezervu v únosnosti konstrukce objektu. Vezmeme-li například FV instalaci s horizontálně uloženými panely o rozměru $1,6 \times 1,0 \text{ m}$ ($L_M = 1,0 \text{ m}$), ve sklonu $\beta = 20^\circ$ a návrhovým úhlem $\alpha_D = 20^\circ$, potom vlastní tíha panelů a podpůrné konstrukce bude cca 12 kg/m^2 (Obrázek 3.11). Dodatečná zátěž pro vnitřní řady bude 45 kg/m^2 a pro řady na okraji 49 kg/m^2 (Obrázek 3.13). Zaokrouhlíme-li tuto hodnotu na 50 kg/m^2 , obdržíme celkové přetížení střešní konstrukce FV instalací $q_k = 12 + 50 = 62 \text{ kg/m}^2$. Tuto zátěž musí nosná konstrukce objektu bezpečně přenést.

Pokud je rezerva únosnosti konstrukce objektu nižší než zatížení od navržené FV instalace, nezbývá než "naředit" řady, snížit sklon FV panelů či zvolit horizontální uložení. V případě malých rezerv existuje na trhu také řada specializovaných řešení, která pracují s malým sklonem panelů (okolo 10°) a optimalizovaný uspořádáním pro snížení účinků větru. Příkladem je systém Alu Light od firmy Schletter nebo Solar Roof Tile od firmy Sunpower.

Řešením je také samozřejmě přechod na přímé kotvení, to však není možné vždy. Překážkou může být sama konstrukce zastřešení nebo fakt, že instalace je na pronajaté střeše bez možnosti zásahu.

Centrum pro rozvoj výzkumu pokročilých řídicích a senzorických technologií
CZ.1.07/2.3.00/09.0031

Ústav automatizace a měřicí techniky
VUT v Brně
Kolejní 2906/4
612 00 Brno
Česká Republika

<http://www.crr.vutbr.cz>

info@crr.vutbr.cz