

Fotovoltaika jako obnovitelný zdroj

Petr Sládek

Významné trendy z hlediska energetiky

Ekonomický růst je ovlivňován především populací, hrubým domácím produktem, energetickou náročností hospodářských odvětví, účinností při výrobě a spotřebě energie, rozvojem urbanistických oblastí, elektrifikací, dopravní obslužností. Ukazuje se, že trvale udržitelný rozvoj je možné zajistit jen harmonickým vyvážením tří pilířů 3E, které zásadním způsobem ovlivňují a jsou ovlivňovány lidskou činností: Ekonomika (a z ní vyplývající potřeba energie), Energetika (dostupnost zdrojů) a Ekologie (vliv těžby surovin, a výroby a spotřeby energie na životní prostředí). Je jednoznačně prokázáno, že ekonomický růst je doprovázen růstem spotřeby primární a především elektrické energie (i přes úsporná energetická opatření), a uspokojování rostoucích energetických potřeb přináší nevratné zásahy do životního prostředí. Je zřejmé, že díky omezeným zásobám fosilních paliv (uhlí, ropa, plyn) lidstvo musí hledat nové zdroje energie. Produkce elektřiny a tepla bývá často diskutována jenom z technologického hlediska, ale přitom je potřeba brát v úvahu i otázky ekonomické, politické, sociální a vše musí být vnímáno jako jeden komplex.

Dnes lidstvo spotřebovává za rok víc než 11,5 Gtoe = 5 140 EJ¹ energie, z toho elektrická energie 16 661 TWh = 65,6 EJ (údaje za rok 2005). Primární energetický sektor ve světě dnes využívá fosilní paliva (uhlí 25,3%, ropa 35%, zemní plyn 20,7%), uran (6,3%) a obnovitelné zdroje (velké vodní elektrárny 2,2%, biomasa 10%, ostatní 0,5%). Tyto zdroje jsou pak spotřebovávány v elektroenergetice, teplárenství, dopravě, průmyslu, domácnostech a službách. Světová výroba elektrické energie je zajišťována z elektráren uhelných (40,3%), plynových (19,7%), jaderných (15,2%), vodních (16%), olejových (mazut) (6,6%) a ostatních (2,2%). V Bílé knize je uvedeno: „Z doby, během níž jsou ještě dostupné pohodlné a levné fosilní zdroje energie a během níž je nutno vyvinout nové technologie a zařízení a zajistit tak trvalý a uspořádaný přerod celosvětové energetiky do definitivně nové podoby, zbývá již málo: období ekonomické příhodnosti je daleko kratší, než doba fyzické dostupnosti „konvenčních“ zdrojů energie.“ Urychlené zavedení obnovitelných zdrojů (dnes mají podíl kolem 12% z celkové spotřeby energie) energie vyžaduje vytváření k tomu příznivých podmínek či na motivaci souvisejících nutných změn - a to s dostatečným předstihem.

S velkým znepokojením je očekáváno, že světové emise CO₂ ze spalování fosilních paliv vzrostou z 27,135 miliard tun CO₂/rok v r. 2005 na 45 miliard tun CO₂/rok v r. 2030. Současná jaderná energetika "šetří" životní prostředí eliminací asi 2,4 miliard tun CO₂/rok. Přitom úsporná opatření (především snižování energetické náročnosti při výrobě a spotřebě energie) v průmyslově vyspělých zemích povedou ke snížení podílu těchto zemí na emisích ze 70% v r. 1990 na 42% v r. 2030. Naopak extrémní absolutní nárůst je očekáván v rozvojových zemích, především Číně a Indii. Uhlíková elektrárna o ekvivalentním výkonu 1000 MW_e spotřebovává ročně 2 až 6 miliónů tun paliva (podle typu uhlí) a vyprodukuje 6,5 miliónu tun CO₂ (960 t CO₂/GWh). Analogická plynová elektrárna spotřebovává ročně 2-3 miliardy m³ plynu a produkuje 480 t CO₂/GWh. Olejová (mazut) elektrárna stejného výkonu spotřebovává ročně

¹ jednotka 1 toe (tonne of oil equivalent) = 0,447 TJ, 1Gtoe (gigatone) = 10⁹toe, 1EJ = 10¹⁸J

1,5 miliónu tun topného oleje a produkuje 730 t CO₂/GWh. Elektrárna na spalování biomasy o stejném výkonu by představovala zábor půdy pro pěstování biomasy na rozloze 6.000 km², větrná elektrárna by zabrala 100 km² a sluneční 50 km². Naproti tomu bezemisní jaderná elektrárna o výkonu 1000 MW_e spotřebuje ročně jen 35 t paliva a zabírá rozlohu několika km².

Technologie jsou již dnes pokročilé natolik, že umožňují významnější pronikání energie z obnovitelných zdrojů do hlavního proudu energetiky a společenských infrastruktur. Vládami zemí EU (u nás 8% do roku 2010) jsou pevně stanovené cíle zvyšování podílu energie z obnovitelných zdrojů na primárních energetických zdrojích a zdrojích elektrické energie. Většinou se uvádí následující dělení obnovitelných zdrojů (mimo velkých vodních elektráren, dále je uveden procentuální podíl na celosvětové výrobě energie z obnovitelných zdrojů):

• Malé vodní elektrárny	16,4%
• Biomasa + spalovny odpadu	79,9%
• Solární - teplo	0,3%
• Solární - fotovoltaické	<0,05%
• Větrné	0,2%
• Geotermální	3,2%
• Přílivové	<0,05%

Každý druh obnovitelných zdrojů energie má své přednosti, ale také svá omezení a limity. Např. naše republika nemá pro využití větrné energie tak výhodné podmínky jako přímořské státy. Příhodné lokality se u nás téměř vždy nacházejí ve vyšších nadmořských výškách, obvykle nad 600m n. m. Ale máme-li před sebou „větrnou“ mapu ČR s vyznačením izochar rychlostí větru je vidět, že zcela převažují území, kde rychlost nepřesahuje 4 m/s. Oblasti s vyšší rychlostí připomínají mapu zvláště chráněných území a rezervací. Možnost výstavby „větrných farem“ je v těchto územích velmi limitovaná, a bereme-li vážně ochranu přírody a krajiny, je prakticky nemožná.

Stejně jako disponibilita větru i disponibilita slunce má náhodný charakter, což samo o sobě představuje značný technický problém a ze samotné podstaty plyne, že tzv. koeficient ročního využití se mění s lokalitou.

Sluneční záření dopadající na povrch České republiky poskytuje ročně asi 90 000 TWh² energie. Ploch použitelných pro fotovoltaické systémy je 50,2 km², což reprezentuje ročně asi 5,5 TWh, dosud však instalované fotovoltaické systémy poskytují jen 0,002 TWh ročně. Mezi jejich nevýhody patří vyšší vstupní náklady, které jsou však kompenzovány dlouhou, prakticky bezúdržbovou životností (20 let a více). Výhody lze nalézt v možnostech vykrytí špiček spotřeby elektrické energie v případech, kdy se odběr realizuje zejména v denních hodinách.

Jedna z velkých předností nabízená fotovoltaikou je možnost vyrábět elektřinu v oblastech, které nejsou napojeny na elektrické rozvodné sítě. To je významná skutečnost, protože v současné době elektrifikace narůstá pomaleji, než je růst lidské populace. Dnes např. z přes 6,4 mld. obyvatel Země nemají více jak 2 miliardy lidí žádný přístup k elektřině, a mnohem více lidí nemá možnost připojení na elektrickou síť. Je docela možné, že během 40 let toto číslo může narůst na 5 miliard. Klíčovým momentem ekonomického rozvoje a

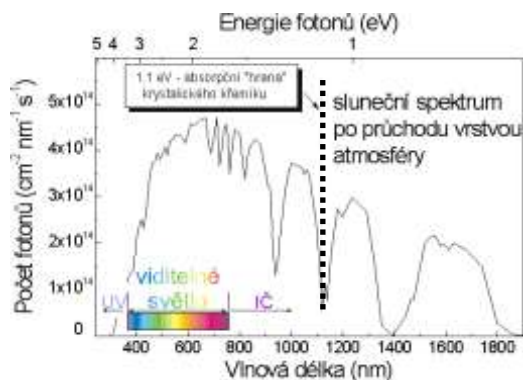
² jednotka 1 TWh (terawatthodina) = 10⁹ kWh, 1TWh = 3,6.10¹² J

modernizace některých zemí je fakt že převážná většina jejich obyvatelstva je bez elektrických zdrojů. V současnosti je světový instalovaný výkon k 31.12.2006 odhadován na cca 5,7 GW_p.

Fotovoltaická přeměna

Přímá přeměna slunečního záření na elektřinu pomocí fotovoltaické přeměny (FV) má několik značných výhod: sluneční FV systém představuje nevyčerpatelný zdroj nevyžadující další náklady a je přístupný kdekoli na světě, i ve vesmíru. Množství energie dodávané Sluncem je o 5 řádů vyšší než spotřeba elektrické energie, která je nezbytná k chodu moderní civilizace. Nemá mechanicky se pohybující části, nepotřebuje mazivo, což vede ke konstrukci snadno ovladatelné elektrárny, nevyžadující údržbu. Neprodukuje žádné emise.

Mezi současné nevýhody patří zatím poměrně drahé výrobní náklady (...ale snižující se), potřeba velkých ploch pro články s nižší účinností a degradace, tj. snížení účinnosti zejména u amorfních FV článků. Navíc je zřejmé, že intenzita slunečního záření kolísá. Pro hodnocení instalovaného výkonu se používá jednotek tzv. W_p , resp. kW_p , čímž se rozumí špičkový dosažený výkon. Průměrný skutečný výkon je nižší. Navíc plný teoretický fyzikální potenciál zdrojů energie nemůže být vždy uvažován. Ten je dán jednak počtem slunečních dní, jednak



hodnotou tzv. solární konstanty. Je to výkon dopadajícího slunečního záření na 1m² plochy. Na dvoře Pedagogické fakulty Masarykovy univerzity v Brně (Pdf MU) byla za slunného dne (26. června 2001, 12h) naměřena hodnota solární konstanty 721 W/m².

Obr. 1 Sluneční spektrum po průchodu atmosférou pod úhlem 48° od normály (tzv. spektrum AM1,5). Současně je vyznačena absorpční hrana krystalického křemíku.

Sluneční články

Již v minulém století byla u selenu pozorována změna elektrického odporu při osvětlení a fotovoltaický jev (vznik elektrického napětí při osvětlení) na kontaktu s kovem. Fotovoltaická přeměna v solárních člancích je založena na fotoelektrickém kvantovém jevu v polovodičích.

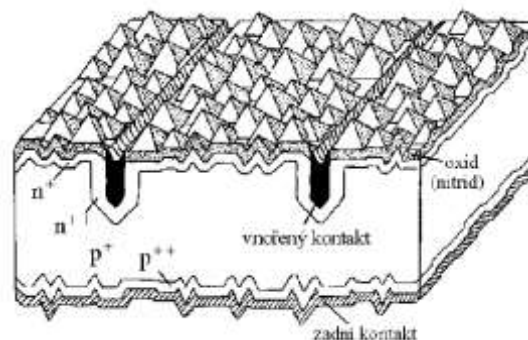
První skutečné fotovoltaické sluneční články (dále jen “sluneční články”) byly připraveny z monokrystalů křemíku v Bellových laboratořích v USA v roce 1954. Ty již měly účinnost 6%, více než desetinásobnou ve srovnání se selenovými články. Byly logickým vyústěním výzkumu polovodičů, teoreticky založeny na výsledcích kvantové mechaniky a technologicky na zvládnutí přípravy velmi čistého křemíku a jeho dopování. Křemík není průhledný, ale absorbuje celé viditelné a ultrafialové spektrum a část infračerveného spektra až po tzv.

absorpční hranu, tedy větší část celého slunečního spektra. Na obr. 1 je znázorněno spektrum slunečního záření po průchodu atmosférou spolu s absorpční hranou křemíku.

Aby sluneční článek sloužil jako zdroj proudu, musí v něm nastat oddělení elektronů a děr. Sluneční článek není homogenní polovodič, ale skládá se z části mající elektronovou vodivost (materiál typu n , například křemík s příměsí fosforu) a části mající děrovou vodivost (materiál typu p , například křemík s příměsí boru). Na přechodu $p-n$ dojde k oddělení díry a elektronu a na přívodních kontaktech vznikne napětí (v případě křemíku 0,5-0,6 V) a připojíme-li ke kontaktům spotřebič, protéká jím elektrický proud. Ten je přímo úměrný počtu absorbovaných fotonů a tedy i ploše celého slunečního článku.

Fotovoltaický sluneční článek je tedy polovodičová dioda (přechod $p-n$) mající velkou plochu (decimetry čtvereční), spodní celoplošný kovový kontakt (reflektor) a vrchní kovový kontakt (mřížku, hřeben) zabírající velmi malou plochu (4-8% plochy článku), aby nestínil.

Skutečná struktura je mnohem složitější, jak je vidět na obr. 2, s cílem zmenšení všech možných ztrát (reflexe světla, rekombinace nosičů proudu) a realizace co největší účinnosti přeměny sluneční energie v energii elektrickou. Teoretická účinnost v případě článku z krystalického křemíku je okolo 30%. Vyšší teoretickou účinnosti lze dosáhnout u článků složených z různých materiálů s různou absorpční hranou nebo koncentrací světla, která zvyšuje (logaritmicky) získané napětí.



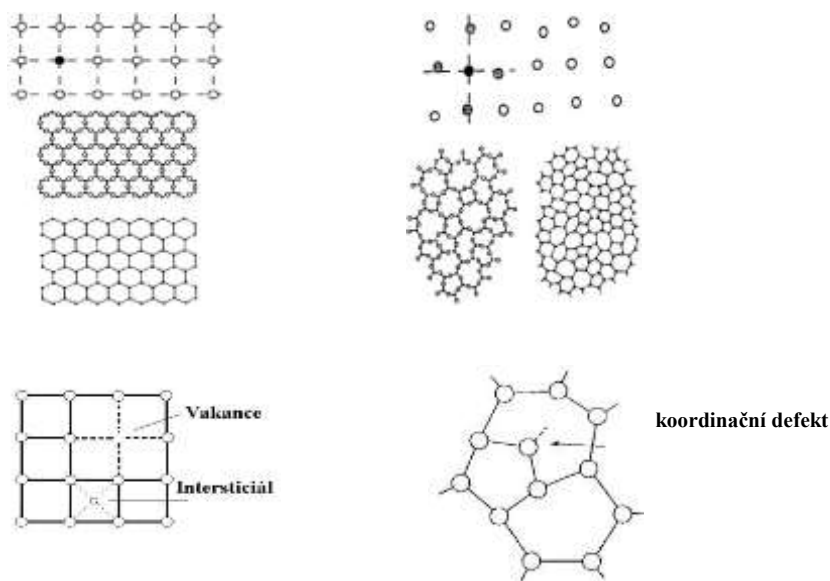
Obr. 2 Schematické znázornění struktury křemíkového solárního článku se zanořenými kontakty na přední straně. Texturovaný povrch pro snížení reflexe a zvýšení „light trapping“ efektu je vytvářen využitím anizotropního leptání křemíku na rovině $\langle 100 \rangle$. Vrstva oxidu, případně nitridu křemíku je použita pro pasivaci povrchu křemíku a pro snížení reflexních ztrát. Zadní kontakt (Al) funguje jako zpětný reflektor.

Pro výrobu solárních fotovoltaických panelů (FV) se v současné době využívá buď krystalických článků, zejména na bázi křemíku, dále amorfních vrstev hydrogenizovaného křemíku a slitin s germániem a v poslední době pak mikrokrytalických či nanokrytalických vrstev. Křemíkové krystalické fotovoltaické články na mají sice vyšší účinnost (kolem 16%), ale je potřeba je deponovat v tlusté vrstvě (desítky mikronů), tím je jejich výroba dražší a časově náročnější. Většinou je možno je rozeznat podle tmavě modrého zbarvení. Nafialovělé články na bázi nanokrytalického (amorfního) křemíku jsou deponovány v tenké vrstvě (desetiny, jednotky mikronu), jejich stabilizovaná účinnost je kolem 6-7%. Přes nižší účinnost jsou ekonomicky výhodnější, ale vykazují degradační efekt, kdy se jejich účinnost při expozici světlu snižuje. Tento jev je reverzibilní. V poslední době se výzkumná činnost zaměřuje na kombinaci mikrokrytalické a nanokrytalické vrstvy.

Pro výkonové využití (střešní systémy, fotovoltaické elektrárny) se tedy převážně využívá panelů na bázi krystalického křemíku, pro nízkovýkonové aplikace (kalkulačky) pak panelů na bázi nanokrystalického (=amorfního) křemíku.

Jak je vidět, křemík zůstal dominantním FV materiálem, zahrnujícím asi 98% z celkové světové produkce. Ploché moduly z krystalického křemíku (monokrystalický a mikrokrystalický Si) reprezentují zhruba 80% celkové produkce. Pokračující převaha křemíku odráží skutečnost, že na rozdíl od ostatních materiálů, těží z mohutné průmyslové výroby integrovaných obvodů. Proto mnoho technologických procesů, které byly již vyvinuty mohlo být snadno rozšířeno i do výroby křemíkových slunečních článků. Stabilizovaná produkce je také u FV modulů na bázi amorfního křemíku (a-Si), které těží z možností velkoplošné depozice v tenké vrstvě. U článků na bázi amorfního křemíku bylo dosaženo v posledních letech nárůstu účinnosti použitím amorfního karbidu křemíku (a-SiC), který umožňuje nejenom kontrolu dopování, ale také možnost ovlivnění šířky pohyblivostní mezery. Další trendy jsou nabízeny použitím depozice dvou (tandemových), popř. až čtyřnásobně vrstvených přechodů při použití vedle hydrogenovaného amorfního křemíku (a-Si:H) např. slitin amorfního křemík-germánium (a-SiGe) a mikrokrystalického křemíku (μ -Si).

Snížení nákladů je přímo spojeno se zvýšením účinnosti článků. Mnoho úsilí bylo vyvinuto na každém kroku procesu výroby účinného FV systému. Od základního výzkumu



depozice vlastního materiálu, heteropřechodů s vhodnou volbou šířky zakázaného pásu, studia jejich degradace, po vytvoření neodrážejících povrchových textur u antireflexních povrchů s dostatečnou odolností proti mechanickému namáhání, např. při použití flexibilních substrátů.

Obr. 3a) Krystalická struktura

b) Nanokrystalická (amorfní) struktura

V devadesátých letech šlo zejména o studium hlavní nevýhody a-Si:H (je to ve skutečnosti neuspořádaná slitina křemíku s 5-10% vodíku, který pasivuje většinu defektů v materiálu) tj. tvorby nových defektů v materiálu následkem silného osvětlení, tzv. Staeblerův-Wronského jev. Základním strukturálním rozdílem mezi amorfním a krystalickým

křemíkem je jistá deviace v úhlech vazeb (ideálně cca 109°) a délce vazeb (vzdálenosti sousedních atomů) -viz obr. 3. Tyto deviace mají za následek vznik "chvostových" stavů v energetickém pásovém spektru. Některé teorie předpokládají, že " chvostové " stavy valenčního pásu jsou spojeny s odchylkami v úhlech vazeb, naopak chvostové stavy vodivostního pásu souvisí s odchylkami v délce vazeb. Rozuspořádání mříže vede ke vzniku koordinačního defektu - nenasycených vazeb křemíku, které mohou být neutrální nebo záporně či kladně nabitě. Nenasycené vazby tvoří energetické stavy v pohyblivostní mezeře, což nepříznivě ovlivňuje jejich součástkové aplikace. Proto jsou pasivovány atomy vodíku. Světelné záření a zvýšená teplota vazby Si-H rozrušují, resp. znovuvytváří. Takto vzniklé změny v hustotě stavů v pohyblivostní mezeře tenkých vrstev amorfních polovodičů jsou na KF PdF MU studovány pomocí optoelektronických metod.

Dále jsou studovány mechanické vlastnosti tenkých vrstev a struktur jako je mikrotvrdość, houževnatost, pružnost dynamickou metodou mikrovpichu a jejich vazba na podmínky depozice a výsledné vlastnosti fotovoltaických článků, pro možnost depozice fotovoltaických článků na elastické folie.

40kWp Fotovoltaický systém na budově PdF MU

V současnosti je třetím rokem v provozu 40kW_p fotovoltaický systém na budově PdF MU v Brně. Jedná se o panely s instalovaným výkonem 40 kW_p , umístěné jednak na ploché střeše (30+5 kW_p), jednak ve vertikálním pásu (5kW_p) v horní části fasády budovy Poříčí 31 (obr. 4).

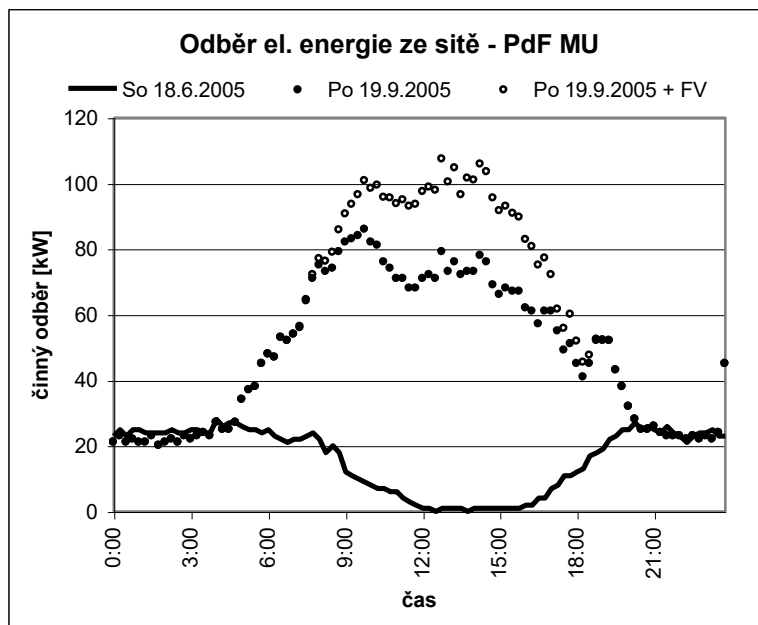


Obr. 4 Fotovoltaický systém na budově PdF MU v Brně, Poříčí 31

Fotovoltaický systém na bázi krystalického křemíku byl dodán v rámci projektu Ministerstva životního prostředí, které poskytlo na projekt dotaci ve výši 90%. Před instalací bylo potřeba žádat o souhlas památkáře (budova je v samém okraji památkové zóny), kteří požadovali snížit o něco sklon střešních panelů, čímž dochází k poklesu výtěžnosti.

Celý fotovoltaický systém je napojen v hlavním rozvaděči na vnitřní silnoproudou síť fakulty, která zahrnuje tři budovy. Je tak do budoucna umožněno dodávat vyrobenou elektrickou energii do rozvodné sítě.

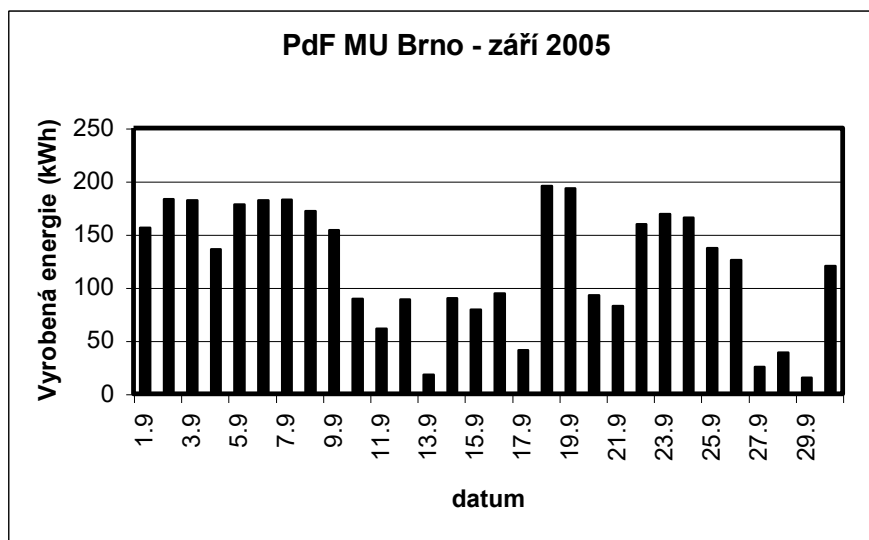
FV panely na jedné střeše jednoho čtyřpodlažního školního objektu pokrývají v létě téměř denní potřebu elektrické energie fakulty. Na obr. 5 je vidět, že dne 18.6.2005 mezi 12-16



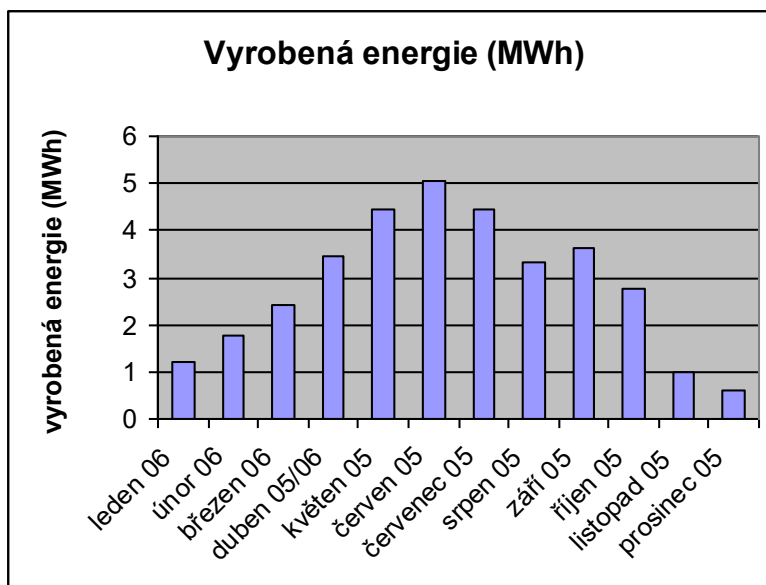
hodinou byla potřeba fakulty pokryta plně, v pondělí 19.9.2005 se snížil špičkový odběr v poledních a odpoledních hodinách. Tento příznivý stav platí za slunného dne, pro dny kdy je zataženo a slunce je níže na obloze – zimní měsíce, výkon FV panelů klesá na 5-10% jejich špičkové hodnoty (obr. 6,7).

Je zřejmé, aplikace fotovoltaického systému na školní budovu velmi dobře vykrývá její spotřebu elektřiny a že navíc odpadá potřeba úschovy vyrobené elektrické energie.

Obr. 5 Odběr elektrické energie ze sítě se současnou dodávkou z 40 kW_p FV systému na PdF MU v Brně – slunečné dny, pro 19.9.2005 je doplněna křivka spotřeby, tj. odběr ze sítě + odběr z FV systému



Obr. 6 Elektrická energie vyprodukovaná v období od 1.9.2005 do 30.9.2005 z 40 kWp FV systému na PdF MU v Brně (transformovaná střídači)



Obr. 7 Elektrická energie vyprodukovaná v jednotlivých měsících v průběhu jednoho roku z 40 kWp FV systému na PdF MU v Brně (transformovaná střídači)

Fotovoltaické články umístěné na střeše a fasádě budovy pedagogické fakulty mají mimo výroby elektrické energie ještě další, neméně důležitý cíl. Jsou podpůrným pilířem pro výchovu mladé generace k udržitelnému rozvoji. Ve vstupních vestibulech je vyhrazeno místo pro dva informační panely, na nichž bude zobrazován aktuální stav ve výrobě elektrické energie přímou konverzí z dopadajícího slunečního záření a další sledované parametry jako je teplota či informace o větru a v neposlední řadě informace o snížení emisí CO₂.

Očekáváme, že jedním z nejvýznamnějších dopadů umístěného fotovoltaického systému na naší fakultě bude větší rozšíření povědomosti o obnovitelných zdrojích energie přes budoucí učitele a jejich žáky na značnou část populace.

Některé údaje použity z http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2007/key_stats_2007.pdf

Úloha pro žáky: Měření solární konstanty

Solární konstanta je příkon sluneční energie dopadající na povrch Země vztažený na jednotku plochy. V tabulkách je uváděna hodnota $S = 1\,327\text{ Wm}^{-2}$, což je ale hodnota měřená bez vlivu atmosféry. ČR nepatří ke státům, kam dopadá sluneční záření nejvíce. I tak má vcelku dobré podmínky jej využívat. Dopadne tu na 1m^2 za rok 3GJ solární energie na vodorovnou plochu, 3,6GJ na plochu skloněnou pod úhlem $30\text{-}60^\circ$ a 2,5GJ na plochu svislou. (Údaje byly uvedeny v internetovém časopise “Quick magazin”.) Nejvhodnější sklon pro celý rok je 45° . Naměřené hodnoty však nezáleží pouze na sklonu absorbující plochy, ale také na počasí, na kvalitě ovzduší a na ročním období. Většina solárního záření dopadne v období od března do října. (asi 80%) Naše naměřené hodnoty se nebudou tedy přibližovat tabulkové hodnotě, ale v létě při slunečném počasí by se hodnota mohla dostat až na $S = 800\text{ Wm}^{-2}$.

Pomůcky:

- hliníkový váleček s načerněnou horní plochou
- polystyrén
- digitální teploměr
- stopky
- miska s vodou + černá folie

Měření solární konstanty I

- Solární konstanta je příkon sluneční energie dopadající na povrch Země vztažený na jednotku plochy.
- V tabulkách je uváděna hodnota $S = 1\,327\text{ Wm}^{-2}$, což je ale hodnota měřená bez vlivu atmosféry.
- ČR nepatří ke státům, kam dopadá sluneční záření nejvíce. I tak má vcelku dobré podmínky jej využívat. Dopadne tu na 1m^2 za rok 3GJ solární energie na vodorovnou plochu, 3,6GJ na plochu skloněnou pod úhlem $30\text{-}60^\circ$ a 2,5GJ na plochu svislou.

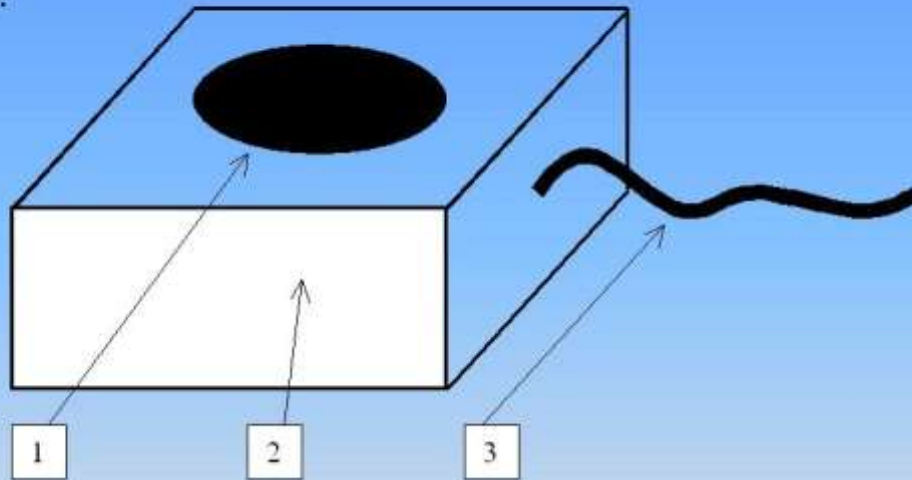
- Nejvhodnější sklon pro celý rok je 45°. Naměřené hodnoty však nezáleží pouze na sklonu absorbující plochy, ale také na počasí, na kvalitě ovzduší a na ročním období. Většina solárního záření dopadne v období od března do října. (asi 80%) Naše naměřené hodnoty se nebudou tedy přibližovat tabulkové hodnotě, ale v létě při slunečném počasí by se hodnota mohla dostat až na $S = 800 \text{ Wm}^{-2}$.

29

- Solární konstantu budeme počítat podle vztahu:
-
- $$S = \frac{m \cdot c}{A} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta \tau}$$
-
- S...solární konstanta
- m...hmotnost válečku
- c...měrná tepelná kapacita (v tomto případě hliníku)
- A...obsah plochy, na kterou dopadá sluneční záření
- ΔT ...přírůstek teploty
- $\Delta \tau$...přírůstek času

30

Pomůcky:

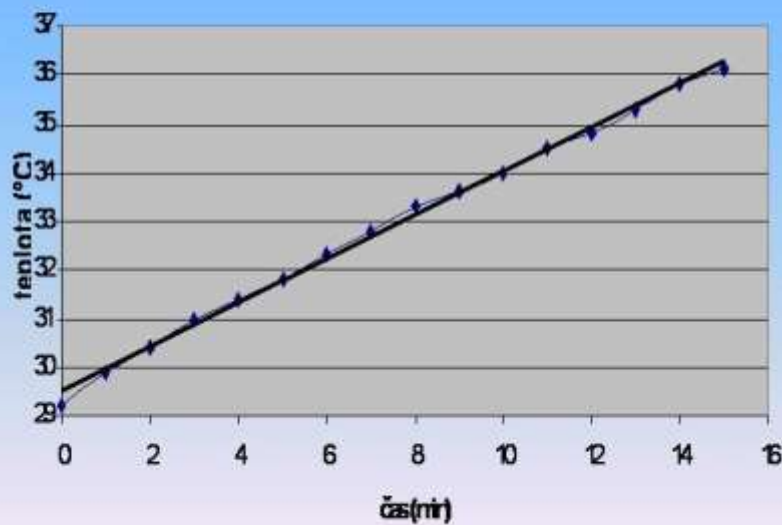


- 1) Hliníkový váleček s načerněnou vrchní plochou
- 2) Polystyrenová izolace
- 3) Digitální teploměr (jeho čidlo)

Dále jsou nutné stopky a, v případě nepříznivé počasí, žárovka o příkonu 100W.

Příklad naměřených hodnot:

τ min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
T °C	29,2	29,9	30,4	31	31,4	31,8	32,3	32,8	33,3	33,6	34	34,5	34,8	35,3	35,8	36,1



$$S = \frac{m \cdot c}{A} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta \tau}$$

$$S = 724 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Solární konstanta byla naměřena 26. 6. 2001 na dvorku PdF MU a její hodnota je $724 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Počasí bylo ideální. Bylo slunečně a ani jeden z několika mráčků nestínil během měření. Z výsledku je patrné, že během měření dopadalo na 1m^2 tolik energie, že by to stačilo na svícení sedmi žárovkami o příkonu 100 W, nebo tolik energie, že bychom mohli přivést k varu litr vody, která měla pokojovou teplotu, do osmi minut.

33

Měření solární konstanty II

Do nízké misky z polystyrénu vyložené černou fólií nalijeme vodu /0,1-0,2l/, umístíme na slunce a měříme v čase postupně stoupající teplotu vody.

Určíme průmět plochy kolmo ke slunečním paprskům např. 200 cm^2 , takže výkon slunečního záření dopadajícího do misky bude asi 20W.

34

Měření solární konstanty - II

Tmavá fólie záření pohltí, ohřeje vodu, za 1 minutu by tedy měla přijmout teplo 1200J.

Je-li v misce 0,2 l vody, měla by její teplota díky slunečnímu záření stoupat každou minutu asi o 1°C. Výpočet solární konstanty je kolem 700 W/m².

Na celou Zemi dopadá $1,8 \cdot 10^{17}$ W.