

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní
Katedra termomechaniky

Obor : Strojírenství
Zaměření : Energetické stroje a zařízení

BAKALÁŘSKÁ DIPLOMOVÁ PRÁCE

Název tématu : **Praktická aplikace fotovoltaických článků**

Vypracoval : Martin Beneš
Vedoucí práce : Prof. Ing. Josef Olehla, Csc.

Počet stran : 50
Počet tabulek : 18
Počet obrázků : 26



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení	Martin B e n e š
Studijní program	bakalářský – 2341 R Strojírenství
Obor	Stroje a zařízení
Zaměření	Energetické stroje a zařízení

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje bakalářská práce na téma:

Praktická aplikace fotovoltaických článků

Zásady pro vypracování:

(uveďte hlavní cíle bakalářské práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Princip fotovoltaických článků
2. 1) Sluneční záření z hlediska geometrie dopadu na osluněnou plochu – výpočet
2) Sluneční záření – intenzita – výpočet
3. Experimentální měření výkonu fotovoltaických článků
4. Výpočet výkonu FČ, účinnosti, zapojení
5. Ekonomický rozbor

Forma zpracování bakalářské práce:

- původní zpráva: 30
- grafické práce: 15

Seznam literatury (uveďte doporučenou odbornou literaturu):

- 1) Cihelka, J.: Vytápění a větrání, SNTL Praha 1969
- 2) Journal of Solar Energie (časopis)

Vedoucí bakalářské práce:

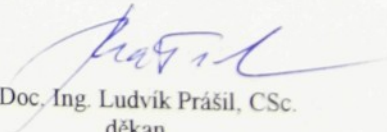
Prof. Ing. Josef Olehla, CSc.

Konzultant bakalářské práce:

Ing. Petr Strádal




Doc. Ing. Jiří Unger, CSc.
vedoucí katedry


Doc. Ing. Ludvik Prášil, CSc.
děkan

V Liberci dne 30. 10. 2001

Poděkování

Prof. Ing. Josef Olehla, Csc.

Děkuji vám za všestrannou podporu a odborné konzultace, které jste mi laskavě poskytl během vedení mé práce. Velice si vážím vaší pomoci, návrhů a připomínek, a také toho, že jste si vždy našel čas na řešení problémů vzniklých s mou bakalářskou diplomovou prací.

Ing. Petr Strádal

Děkuji vám za vaši podporu a významnou pomoc při začátcích mé práce na této bakalářské diplomové práci.

Ing. Josef Šorm (Střední průmyslová škola v Liberci)

Děkuji vám za váš čas, profesionální rady a poskytnutá data o solárním zařízení FVS 2000. Velmi si vážím vaší ochoty a kolegiality.

Technická univerzita v Liberci

Závěrem bych chtěl poděkovat TUL za vše, co pro mě udělala a za podmínky vytvořené ke studiu. Pro mě a mé rodiče bylo velkým potěšením a zadostiučiněním, že jsem mohl vystudovat tuto univerzitu. Z hlediska intelektuálního a společenského mi studium na TUL přineslo mnohem více zkušeností a znalostí než jsem při začátku studia mohl očekávat.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou (*bakalářskou, doktorskou*) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo) a § 35 (o nevýdělečném užití díla k vnitřní potřebě školy).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užit své diplomové (*bakalářské, doktorské*) práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Datum

Podpis

Místopřísežné prohlášení

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci dne 23. Května 2002

OBSAH:

Úvodní strana	
Zadání diplomové práce	
Poděkování	
Místopřísežné prohlášení	
Anotace	
1)	
Princip fotovoltaických článků	1
Polovodiče vlastní a příměsové	2
Materiály vhodné pro fotovoltaickou přeměnu	3
Slunce zdroj energie	4
Míra využití slunečního záření	5
Plocha pro fotovoltaické a fototermické panely	5
Přednosti fotovoltaických zdrojů elektřiny	6
2)	
Sluneční záření z hlediska geometrie dopadu na osluněnou plochu a jeho intenzita	7
Průchod slunečního záření atmosférou	7
Intenzita slunečního záření	8
Parametry určující polohu slunce nad obzorem	8
Přímé sluneční záření	11
Difuzní sluneční záření	11
Výsledný energetický účinek slunečního záření	12
Teoreticky možné množství energie	12
Skutečné množství energie	13
Největší úskali popsané metody	14
pomůcka pro výpočet energie dopadajícího slunečního záření	15
3)	
Experimentální měření výkonu fotovoltaických článků	30
Měření první: Technická univerzita v Liberci	30
Měření druhé: Střední průmyslová škola strojní Liberec	35
Ověření teoretické výpočtové metody	36
4)	
Zapojení, účinnosti a výkon	40
Typy článků z hlediska technologického a konstrukčního	40
Vliv teploty na výkon solárního článku	42
Výkon solárního článku	42
Možnosti zapojení solárních článků	44

5)	Ekonomický rozbor	46
	Historie a vývoj ceny solárních článků	46
	Kalkulace ceny solárního zařízení	47
	Praktický příklad kalkulace ceny fotovoltaické instalace	48
	Návratnost finanční a energetické investice	49
	Osvěta a dotace	49
	Moderní trendy ve fotovoltaice – výhled do budoucna	50

Bakalářská diplomová práce

Téma: Praktická aplikace fotovoltaických článků

Anotace:

Tato práce pojednává o problematice fotovoltaických systémů použitých jako zdrojů elektrické energie.

Tato práce se zabývá teorií fotovoltaických článků, geometrií dopadu slunečních paprsků, výpočty dopadajícího slunečního záření, měřením výkonů fotovoltaických instalací a ekonomickými aspekty dané problematiky.

Práce také obsahuje porovnání teoretických výpočtových metod s hodnotami naměřenými na fotovoltaických instalacích.

Theme: Practical Application of Photovoltaic Elements

Annotation:

This work covers the field of photovoltaic systems used as a source of electric energy.

It also pursues the theory of photovoltaic elements, geometry of sunrays incidence, calculations of the incidence of the sun radiance, the measurement of power of the photovoltaic installations and economic aspects of the given issue.

The work also contains the comparison of the theoretical calculation methods with the values measured on photovoltaic installations.

Seznam použitých veličin :

I_0 [W/m^2]	sluneční konstanta
I_n [W/m^2]	intenzita záření na plochu kolmou ke slunečním paprskům při daném znečištění ovzduší
$I_{\check{c}}$ [W/m^2]	intenzita záření na plochu kolmou ke slunečním paprskům při dokonalé čistém ovzduší
Z [-]	součinitel znečištění atmosféry
δ [$^\circ$]	sluneční deklinace
φ [$^\circ$]	zeměpisná šířka
τ [$^\circ$]	časový úhel v obloukových stupních
h [$^\circ$]	výška slunce nad obzorem
a [$^\circ$]	azimut slunce
a_s [$^\circ$]	azimut osluněné plochy
α [$^\circ$]	sklon plochy od vodorovné roviny
γ [$^\circ$]	úhel dopadu slunečních paprsků
ε [-]	součinitel závisející na výšce slunce nad obzorem a na nadmořské výšce daného místa
H [m]	nadmořská výška v metrech
r [-]	reflexní schopnost okolních ploch pro sluneční paprsky, tzv. albedo
I_{ph} [W/m^2]	intenzita přímého slunečního záření na vodorovnou plochu
I_{dh} [W/m^2]	intenzita difuzního záření na vodorovnou plochu
$I_{stř}$ [W/m^2]	střední intenzita slunečního záření
n [-]	počet dní v měsíci
$Q_{S \text{ den}}$ [Wh/m^2]	energie dopadající na plochu za den
$Q_{S \text{ den teor}}$ [Wh/m^2]	teoretická energie dopadající na plochu za den
$Q_{S \text{ měs}}$ [Wh/m^2]	energie dopadající na plochu za měsíc
τ_{teor} [h]	teoretická doba slunečního svitu
τ [h]	poměrná doba slunečního svitu
τ_{skut} [h]	skutečná doba slunečního svitu

Princip fotovoltaických článků

Jestliže některé látky osvětlujeme, pak tyto látky buď mění odpor, nebo ze svého povrchu uvolňují elektrony. Tyto jevy se souhrnně nazývají fotoelektrický jev neboli fotoefekt. Fotovoltaická přeměna a její intenzivní výzkum je vázán na šedesátá léta, kdy bylo třeba vyvinout zdroje energie pro kosmické účely. Základem fotovoltaické (fotoelektrické) přeměny je přímé působení slunečního záření na elektrony v pevných látkách.

V každé pevné látce je určitý počet volných elektronů (a kladných děr) - nositelů elektrického náboje. Jejich koncentrace kolísá podle druhu materiálu: v izolantech je asi 10^{16} až 10^{18} (na jeden metr krychlový), v klasických polovodičích 10^{21} až 10^{22} a ve vodičích přesahuje 10^{28} . Každý volný i vázaný elektron má určitou energii.

V osamoceném atomu jsou energetické hladiny obsazeny podle Pauliho principu a jejich energie jsou znázorněny energetickým pásovým schématem. V krystalické mřížce, v níž je směstnáno velké množství atomů, se elektronové obaly jednotlivých atomů navzájem ovlivňují (jejich funkce se překrývají, přičemž Pauliho princip zůstává v platnosti). Energetické hladiny jednotlivých atomů se proto musí navzájem poněkud lišit a protože je atomů v mřížce velké množství (řádově 10^{22}) - vytvářejí tzv. dovolený pás. To platí v každé hladině; to znamená, že kolik má osamocený atom hladin, tolik je v krystalu energetických pásů a dále kolik je v krystalu atomů, tolik je v jednotlivém pásu hladin. Mezery mezi dovolenými pásy (tzv. zakázané pásy) jsou prázdné, neboť v nich elektrony nemohou existovat. Šířka dovolených a zakázaných energetických pásů závisí na druhu atomů v krystalické mřížce. Počet dovolených energetických stavů v krystalu je značně větší než počet elektronů, které je obsazují. Elektrony se neustále snaží zaplňovat nejnižší hladiny. Obsazení energetického stavu W je dáno Fermiho funkcí (tj. pravděpodobnost obsazení této energetické hladiny nosiči elektrického proudu)

Fermiho hladina W_f je energetický stav, pro nějž podle platí $f(W_f) = 0,5$. Fermiho hladina zůstává spojitá při styku dvou různých materiálů. Nejvyšší obsazený pás v krystalu se nazývá valenční pás a odpovídá stavu valenčních elektronů v atomu. Rozložení elektronů ve vodivostním pásu určuje elektrické a tepelné vlastnosti krystalu - podobně jako vnější (valenční) elektrony v atomu určují jeho elektrické vlastnosti.

Polovodiče – vlastní a příměsové

Polovodiče jsou podobné izolantům, ale rozdíl mezi polovodičem a izolantem je v tom, že zakázaný pás mezi valenčním pásem a následujícím vyšším pásem dovolených energií (tzv. vodivostní pás) je u polovodičů menší než u izolantů (dielektrik). Tak například u germania je 0,7 eV, kdežto u kysličníku hlinitého je 10 eV. Elektrony v polovodičích mohou tedy snadno přeskóčit úzký zakázaný pás a dostat se do pásu vodivosti. Potřebnou energii (asi 1 eV) mohou dostat buď s tepelného pohybu v krystalu, nebo absorpcí dopadajícího záření.

Čím je teplota vyšší nebo dopadající záření intenzivnější, tím více elektronů se dostane do vodivostního pásu. Vybuzené elektrony jsou volné a mohou přebírat energii z elektrického pole a pohybovat se krystalem jako elektrický proud. Polovodiče s úzkým zakázaným pásem mezi pásem valenčním a vodivostním se nazývají vlastní polovodiče.

Častěji se však setkáváme s příměsovými polovodiči (zvanými též nevlastní polovodiče). Přidáním cizích atomů do krystalové mřížky se naruší její periodičnost a do energetického schématu se přidají nové energetické hladiny. Příměsové atomy mohou dodat navíc elektrony, záporné nosiče náboje; v tomto případě mluvíme o typu N polovodičů. Když příměsové atomy v krystalu mají nedostatek valenčních elektronů, vytvářejí kladnou díru (chybějící valenční elektron v mřížce). Elektrický proud pak může procházet posunem kladných děr v elektrickém poli. Tento druh krystalu se nazývá polovodič typu P. Oba druhy polovodičů s příměsí se nazývají příměsové polovodiče.

K získání elektrické energie ze slunečního záření je třeba splnit tři podmínky:

1) Foton musí být pohlcen a jeho energii se musí excitovat elektron do vyššího vodivostního pásu. Proto musí mít fotony dostatečnou energii k překonávání zakázaného pásu W_g ; tedy $h\nu \geq W_g$, kde W_g je šířka zakázaného pásu. U křemíkových článků je $W_g = 1,1$ eV; každý foton slunečního záření s energií $h\nu \geq 1,1$ eV (čili s vlnovou délkou menší rovno 1,1 mikrometru) vytvoří jednu dvojici elektron-díra. Nadbytečná energie $h\nu - W_g$ se přemění v teplo krystalu. Tím se ovšem zmenšuje účinnost článku. Teoreticky dosažitelná účinnost křemíkových článků je 20 až 22%; to znamená, že 1 metr čtverečný těchto článků postavených kolmo ke slunečním paprskům může dávat výkon asi 200W.

2) Vytvořené dvojice elektron-díra musí být včas separovány, aby se znovu nespojili. Ve slunečních článcích se toho dosahuje pomocí přechodu PN. Elektrické pole na přechodu PN rozděluje nově vzniklé dvojice elektron-díra tak, že se elektron pohybuje směrem k materiálu N a díry k materiálu P. Podstatnou vlastností přechodu PN je vyrovnání Fermiho energie v obou materiálech. Poněvadž Fermiho hladina je v materiálu N blízko horní meze zakázaného pásu, kdežto pro materiál P je blízko jeho dolní meze, musí se vyrovnáním Fermiho hladin vytvořit na přechodu PN elektrické pole. A právě toto pole rozděluje ve slunečním článku dvojice elektron-díra, které byly vytvořeny pohlcením fotonů.

3) Oddělené náboje musí být odvedeny ke spotřebiči, dříve než se opět spojí a ztratí svou potenciální energii.

Účinnost slunečních článků je podíl získané elektrické energie a sluneční energie dopadající na článek. Je omezena ztrátami světelnými (odrazem, neúplnou absorpcí, vnitropásovými přechody) i elektrickými (rekombinace, ztráty na sériovém a svodovém odporu apod.). U nejznámějšího druhu článků - křemíkových - představuje neabsorbované infračervené záření 23% ztráty při vnitropásových přechodech 33%, elektrické ztráty asi 22% ; na užitečný (teoretický) výkon zbývá asi 22%.

Materiály vhodné pro fotovoltaickou přeměnu

Křemíkové články jsou připravovány z monokrystalického křemíku a jejich velikost je omezena průřezem umělých křemíkových krystalů na plochu několika centimetrů krychlových. Dosahují skutečné účinnosti 12 až 15%. Jejich teorie i technologie jsou dobře známy, surovina pro výrobu je běžná, neboť křemík patří k nejhojnějším prvkům v zemské kůře. Jsou spolehlivé a osvědčili se v mnoha umělých kosmických tělesech. Byly použity v panelech až do výkonu mnoha kilowattů. Jsou však velmi nákladné; cena vhodného monokrystalického křemíku je 20 až 30 tisíc korun za jeden kilogram. Cena vlastních křemíkových článků může být značně zredukována automatizací jejich výroby.

Křemíkové sluneční články jsou nejběžnějším příkladem homogenních přechodů, to je přechodů PN získaných z téhož krystalu (monokrystalu) přidáním dvou různých příměsí. Naopak u heterogenních přechodů jsou P a N polovodiče různé látky, například AlGaS-GaS, Cu₂S-CdS. Křemík je ve čtvrtém sloupci Mendělejevovy periodické tabulky. Monokrystalické polovodiče z prvků třetího a čtvrtého sloupce (například arsenid galia, fosfid galia a další) mají vhodné vlastnosti pro fotovoltaickou přeměnu. Fotovoltaické měniče z nich sestrojené mají dosažitelnou účinnost až 20%.

Polovodiče z prvků druhého a šestého sloupce (například CdS, CdTe) jsou také vhodné pro fotovoltaickou přeměnu. Lze je použít ve formě drobných krystalků rozprostřených na velkých plochách. Poněvadž nejde o monokrystal, je jejich cena poměrně nízká.

Hovoříme-li o vhodných materiálech pro fotovoltaické měniče, je třeba se zmínit o přechodech kov-polovodič (Shottkyho diody). Mnohé organické látky dávají s kovy napětí 0,5 až 1 V, avšak pro velký odpor organických látek je proud velmi malý. Účinnosti jsou zatím malé; lze jich však použít ve formě tenkých pokovených organických fólií ve velkých plochách. Perspektivním se jeví nanášení tenké vrstvy křemíku (chemickým způsobem) na velkoplošné kovové panely.

Prakticky použitelné jsou články tenkých heterogenních přechodů Cu₂S-CdS, u nichž byla zatím dosažena účinnost až 8%. Rozprostřeny na velké plochy na zemi (například na střechách domů) představují perspektivní možnost fotovoltaické přeměny pro praktické účely. Nízká cena tenkých velkoplošných fotovoltaických měničů Cu₂S-CdS způsobila, že cena jedné kilowatthodiny elektrické energie je porovnatelná s cenou, kterou platí spotřebitel dnes za energii z klasických zdrojů. Vyžadují však hermetické opouzdření jako ochranu před kyslíkem a vodní parou.

Za zmínku stojí, že fotovoltaickou přeměnu světla v elektrickou energii lze uskutečnit také na přechodu křemík-elektrolit. U článku z monokrystalického křemíku a destilované vody (jako elektrolitu) bylo dosaženo účinnosti 2,7% ; teoreticky dosažitelná účinnost je 20%. Fotovoltaické napětí vzniká též na rozhraní elektrolitu s jinými polovodiči (například germanium, selen, CdS)

Slunce-zdroj energie

Slunce je vlastně dokonalý bezúdržbový termonukleární reaktor, který je z hlediska lidské existence věčný. Má výkon, který mnohonásobně převyšuje naše současné i budoucí energetické potřeby. Neprodukuje žádné exhalace a k distribuci jeho energie nejsou zapotřebí žádné rozvodné sítě. A hlavně jeho energie je zcela zdarma a pro každého.

Jen na povrch České republiky dopadne ročně přibližně 80 000 TWh energie v podobě slunečního záření. Na jeden metr čtverečný to je přibližně průměrně 0,9 až 1,1 MWh ročně v závislosti na geografické poloze a místních podmínkách. Přitom roční potřeba elektřiny v ČR je jen přibližně 50 TWh a tepla asi 270 TWh. Očekává se, že dnešní konečná spotřeba necelých 5 MWh elektřiny na obyvatele ročně postupně vzroste na asi 6,5 až 7 MWh, jak je tomu v západoevropských zemích.

Míra využití slunečního záření

Dnes komerčně vyráběné fotovoltaické panely s konverzní účinností 13 až 15 % dokáží využít 7,5 až 11,5 % veškeré energie dopadajícího záření, fototermické panely dokonce ještě daleko více 20 až 50%. Porovnáme-li to s ročním využitím jiných "energetických zařízení" pak zjistíme, že jak fototermické, tak fotovoltaické zdroje mají roční využití překvapivě vysoké.

Například účinnost fotosyntetické přeměny rostlin je jen asi 1%, využití energie fosilních paliv při přeměně na elektřinu je jen asi 30 až 45% u uhelných elektráren (s perspektivou zvýšení na 50%) a 40 až 60% u elektráren paroplynových (na zemní plyn nebo olej). Roční využití energetického zdroje patří k hlavním parametrům při posuzování energetické efektivity. Vývoj fotovoltaických zdrojů dále pokračuje a výsledky jsou rychle převáděny do výroby. Špičkové komerční články dnes mají účinnost až 18% a v laboratorních podmínkách se podařilo dosáhnout rekordních 27%.

Plocha pro fotovoltaické a fototermické panely

Panely se umísťují tak, aby energetická vytíženost byla co největší. Fotovoltaické panely musí být umístěny na nestíněném povrchu budovy, technické stavby (jako jsou např. protihlukové bariéry) nebo nehodnotného pozemku. Jsou obráceny aktivní stranou, přijímající sluneční záření, směrem k jihovýchodu až k jihozápadu. Panely mohou být postaveny nejen šikmo (sedlová střecha, rovná střecha s podpůrnou konstrukcí) ale i svisle (fasády), aniž se výrazněji sníží jejich výkon. Ideální úhel od vodorovné plochy v podmínkách ČR při celoročním užívání je 60 až 68°.

Velkou budoucnost má fotovoltaika integrovaná přímo do stavebních prvků - do střešní krytiny a do fasádních bloků. Ke komerčnímu využití dnes spějí i fotovoltaická okna. Pokud uvažíme pouze vhodné povrchy budov, dojdeme k údaji, že fotovoltaické zdroje by mohli přispívat do celkové energetické bilance ČR přibližně 5 až 10%, tedy 2,5 až 5 TWh ročně. Odpovídající plocha panelů činí asi 30 až 60 Km čtverečních a jmenovitý výkon 3,5 až 7 GWp. Z rodinného domu s plochou panelů 50 m čtverečních o účinnosti 13% = 4 až 5 MWh elektřiny ročně. A to je pouze na elektrickou potřebu dost a dost i pro čtyřčlennou rodinu.

Přednosti fotovoltaických zdrojů elektřiny :

- prvotní zdroj - sluneční záření - je zdroj z pohledu lidského bytí věčný
- sluneční záření je k dispozici prakticky kdekoli na zemi
- základním prvkem většiny solárních článků je křemík, nejrozšířenější prvek zemské kůry
- výroba ani provoz fotovoltaických panelů nezatěžují životní prostředí
- je ověřena dlouhodobá funkčnost a spolehlivost (20 až 50 let minimálně)
- výroba i spotřeba elektřiny je ne jednom místě
- odpadají ztráty přenosem a transformací
- není nutná nákladná centrální rozvodní síť - to osvobozuje spotřebitele od závislosti na dodavateli a na výpadcích sítě
- minimální nároky na údržbu, téměř žádné provozní náklady
- recyklovatelnost po ukončení života
- technika výroby elektřiny z fotovoltaických zdrojů je již dnes velmi dobře zvládnuta a toto nové průmyslové odvětví si už začíná vydělávat na další rozvoj

Sluneční záření z hlediska geometrie dopadu na osluněnou plochu a jeho intenzita

Tato kapitola obsahuje dvě části. V první části bude popsán jeden ze způsobů výpočtu celkové dopadající energie na obecně položenou osluněnou plochu bez uvedení výpočtu a v části druhé bude názorný příklad výpočtu této metody (proveden v excelu) s uvedením všech potřebných hodnot v přehledných tabulkách. Také zde budou vloženy nejzajímavější názorné grafy. Toto rozvržení jsem volil proto, abych se vyhnul nepřehlednosti textu a také proto, že druhá část je interaktivní což znamená, že jakékoli změny vstupních hodnot vlastně změni veškeré následující výpočty a výsledky.

Nutno podotknout, že výpočet vychází z hodnot, které se neustále mění a ve velké části jsou přibližné nebo zprůměrované. Kdybychom chtěli zajistit přesnější výpočty, museli bychom vycházet z hodnot naměřených a to buď meteorology nebo v ideálním případě z hodnot změřených na místě budoucí plánované instalace a v co nejdelším časovém horizontu. Obě tyto možnosti však zvyšují finanční nákladnost celého projektu a to tak razantně, že u menších instalací je tento výpočet na základě přibližných hodnot postačující.

Průchod slunečního záření atmosférou

Na hranici atmosféry země je intenzita slunečního záření $I_0 = 1340$ až 1390 W/m^2 , to je tzv. sluneční konstanta z toho paprsky o vlnové délce $0,2$ až $0,3 \mu\text{m}$ jsou významné pro přenos energie.

Součinitel znečištění atmosféry Z nám udává o kolik se zmenší intenzita záření po průchodu atmosférou. Jeho ovlivňujícími faktory jsou : rozptyl paprsků odrazem o molekuly plynů a absorpce záření víceatomovými plyny. Velikost součinitele Z závisí na obsahu příměsí ve vzduchu a na atmosférickém tlaku (na nadmořské výšce). Je definován Linkeho vztahem:

$$Z = (\ln I_0 - \ln I_n) / (\ln I_0 - \ln I_{\text{č}})$$

kde: I_0 je sluneční konstanta

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

$I_{\text{č}}$ je intenzita záření na plochu kolmou ke slunečním paprskům při dokonale čistém ovzduší

Při běžných výpočtech tento vzorec pro výpočet znečištění atmosféry nepoužíváme a řídíme se následující přibližnou tabulkou:

$Z = 3$	pro venkov bez průmyslových exhalací
$Z = 4$	pro města s průmyslovými exhalacemi
$Z = 2,5$	pro místa nad 1000 m n. m.
$Z = 2$	pro místa nad 2000 m n. m.

Součinitel znečištění atmosféry Z není v daném místě konstantní a mění se z denní i roční dobou. Ovlivňují ho i výkyvy ve výskytu exhalací, změny počasí a obsah vodních par ve vzduchu. Zachycovat energii slunečního záření se nám vyplatí pouze tam, kde součinitel znečištění atmosféry nepřekročí průměrnou roční hodnotu $Z = 3$.

Intenzita slunečního záření

Výchozí veličinou pro další výpočty je intenzita slunečního záření dopadajícího na povrch země, kterou ovlivňuje jednak součinitel znečištění atmosféry a jednak tloušťka vrstvy vzduch, kterou paprsky pronikají.

Parametry určující polohu slunce nad obzorem

V každém okamžiku je poloha slunce dána jeho výškou nad obzorem h a jeho azimutem a pro něž platí:

$$\sin h = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \tau$$

$$\sin a = (\cos \delta / \cos h) \sin \tau$$

kde: δ je sluneční deklinace, tj. zeměpisná šířka, kde v daný den ve 12 hodin v poledne je slunce kolmo nad obzorem

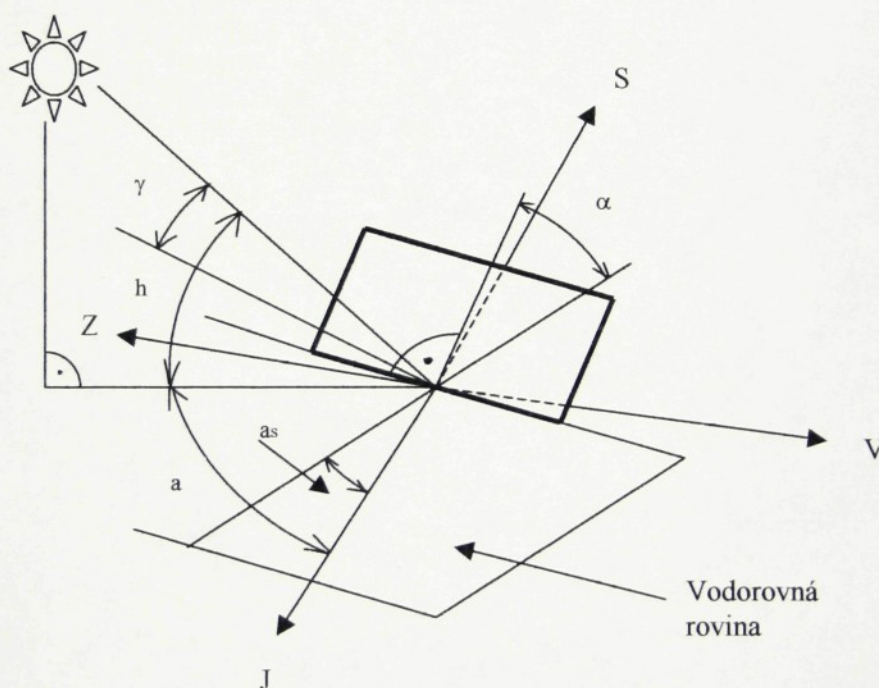
φ je zeměpisná šířka

τ je časový úhel v obloukových stupních měřený od 12 hodin v poledne (jedné hodině odpovídá úhel 15°)

Azimut slunce a se měří od jihu po směru otáčení hodinových ručiček jako kladná hodnota a naopak. h – výška slunce nad obzorem, a – azimut slunce, a_s – azimut osluněné plochy, α – sklon plochy od vodorovné roviny, γ – úhel dopadu slunečních paprsků.

Při určování azimutu slunce jsem narazil na následující problém: Vzorec uvedený v literatuře není použitelný pro časový úhel τ překračující plusminus 60° a to zejména v letních měsících. Správné hodnoty pro tyto nepřesné výpočty (v tabulce jsou zvýrazněny) získáme tak, že správným výsledkem je doplněk těchto hodnot do úhlu 180° .

Schéma pro výpočet intenzity slunečního záření na obecně položenou plochu



- h je výška slunce nad obzorem
- a je azimut slunce
- a_s je azimut osluněné plochy
- α je sklon plochy od vodorovné roviny
- γ je úhel dopadu slunečních paprsků

Pro běžné výpočty nám postačí znát deklinaci pro tzv. charakteristický den v měsíci. Z ní vypočítaná intenzita slunečního záření se považuje za střední (průměrnou) hodnotu pro celý příslušný měsíc. Jako charakteristický den se volí 21. Den v měsíci.

Sluneční deklinace pro charakteristický den

Den	Sluneční deklinace δ
22. XII.	$-23^{\circ}27'$
22. XI. a 21. I.	-20°
23. X. a 20. II.	$-11^{\circ}30'$
23. IX. a 21. III.	0°
23. VIII. a 21. IV.	$11^{\circ}30'$
23. VII. a 22. V.	20°
22. VI.	$23^{\circ}27'$

Pro přesnější určení sluneční deklinace pro libovolný den v roce platí:

$$\delta = 23,45^{\circ} \sin (\tau - 109^{\circ})$$

kde

$$\tau = 0,98^{\circ} D + 29,7^{\circ} M$$

je úhel určující pořadí daného dne v roce (datum); D je den v měsíci; M je číslo příslušného měsíce

Pro určení úhlu dopadu slunečních paprsků na obecně položenou plochu, což je úhel γ , který svírá normála osluněné plochy se směrem paprsků, musíme znát výšku slunce nad obzorem h a azimut slunce a . Pak pro něj platí:

$$\cos \gamma = \sin h \cos \alpha + \cos h \sin \alpha \cos (a - a_s)$$

kde: α je úhel sklonu osluněné plochy od vodorovné roviny
 a_s – azimutový úhel normály osluněné plochy měřený stejně jako azimut slunce

Přímé sluneční záření

Intenzita přímého záření na plochu kolmou ke směru paprsků :

$$I_{pn} = I_0 \exp (-Z/\varepsilon) \quad [\text{Wm}^{-2}]$$

kde I_0 je sluneční konstanta

Z - součinitel znečištění atmosféry

ε - součinitel závisející na výšce slunce nad obzorem a na nadmořské výšce daného místa

Součinitel ε se vypočte ze vztahu:

$$\varepsilon = \{9,38076 [\sin h + (0,003 + \sin^2 h)^{0,5}]/[2,0015 (1 - H 10^{-4})] + 0,91018$$

kde h je výška slunce nad obzorem

H – nadmořská výška v metrech

Intenzita přímého slunečního záření na obecně položenou plochu, jejíž poloha je určena azimutem a_s a úhlem sklonu α je potom dána vztahem

$$I_p = I_{pn} \cos \gamma \quad [\text{Wm}^{-2}]$$

kde γ je úhel dopadu paprsků na osluněnou plochu.

Difuzní sluneční záření

Záření odražené od okolních ploch a záření, které se odrazí od molekul plynů a nečistot v atmosféře, se nazývá difuzní záření. Jeho vlnová délka je shodná s vlnovou délkou záření přímého. Toto záření dopadá na osluněnou plochu i při zatažené obloze. Snižuje se zde sice odraz paprsků od okolí, ale na druhou stranu se zvyšuje rozptyl paprsků v atmosféře a proto můžeme počítat hodnotu difuzního záření při zatažené obloze přibližně stejně jako při obloze jasné. Intenzitu difuzního záření lze přibližně vypočítat takto:

$$I_d = 0,5(1 + \cos \alpha) I_{dh} + 0,5r (1 - \cos \alpha) (I_{ph} + I_{dh}) \quad [\text{Wm}^{-2}]$$

kde α je úhel sklonu osluněné plochy od vodorovné roviny

r – reflexní schopnost okolních ploch pro sluneční paprsky, tzv. albedo
($r = 0,15$ až $0,25$, nejčastěji $r = 0,2$)

I_{ph} – intenzita přímého slunečního záření na vodorovnou plochu

I_{dh} – intenzita difuzního záření na vodorovnou plochu

Pro intenzity záření I_{ph} a I_{dh} platí vztahy

$$I_{ph} = I_{pn} \sin h \quad [Wm^{-2}]$$

$$I_{dh} = 0,33 (I_o - I_{pn}) \sin h \quad [Wm^{-2}]$$

Výsledný energetický účinek slunečního záření

Výsledným zářením dopadajícím na plochu je prostý algebraický součet přímého a difuzního záření, daný vztahem:

$$I = I_p + I_d \quad [Wm^{-2}]$$

Pro charakteristické dny v jednotlivých měsících je tento vztah nutný pro další výpočty energie dopadající na osluněnou plochu. V rozmezí plusminus 2° zeměpisné šířky (přibližně odpovídá rozloze naší republiky) jsou rozdíly v intenzitě dopadajícího slunečního záření velmi malé a pro praktické výpočty zanedbatelné. Nepřesnosti ve výpočtech nastávají v rozmezí zeměpisné šířky plusminus 5° .

Energie dopadající na osluněnou plochu

Teoreticky možné množství energie

Za předpokladu, že slunce svítí nepřetržitě od východu až do západu se teoretické množství energie dopadající na obecně položenou osluněnou plochu vypočte jako plocha pod křivkou intenzity záření. U praktických výpočtů postačí, když se sečtou hodnoty intenzit slunečního záření pro jednotlivé hodiny slunečního svitu. Krajiní hodnoty τ_1 a τ_2 označují čas (hodinu) východu a západu slunce a platí pro ně vztah:

$$\cos \tau_{1,2} = -\tan \delta \tan \varphi$$

kde δ je sluneční deklinace
 φ – zeměpisná šířka

Teoretická (astronomická) doba slunečního svitu τ_{teor} leží mezi hodnotami τ_1 a τ_2 . S pomocí τ_{teor} lze také odvodit střední intenzitu slunečního záření vhodnou pro další výpočty.

$$I_{\text{stř}} = Q_{\text{S den teor}} / \tau_{\text{teor}} \quad [\text{Wm}^{-2}]$$

Orientace osluněné plochy od jižního směru by měla být maximálně plusminus 45° . V ideálním případě by měla být natočena v jižním směru, kdy $Q_{\text{S den teor}}$ dosahuje maximálních hodnot. V případě, kdy bychom chtěli využívat dopadající záření v průběhu celého roku nejefektivněji, musela by být osluněná plocha orientována v každém dni roku kolmo ke směru přicházejících paprsků. Tento problém by vyřešilo zařízení, popravdě velmi finančně nákladné, které by natačením jednak vodorovné osy (který by řídil úhel sklonu α tak, aby stále platilo $\alpha = 90^\circ - h$) tak i svislé osy (ten by řídil azimutový úhel a_s , tak aby stále platilo $a_s = a$) zajišťovalo stálé natočení osluněné plochy kolmo k dopadajícímu slunečnímu záření. V praxi však postačí, když má osluněná plocha sklon $\alpha = 30^\circ$ až 45° pro letní provoz a $\alpha = 60^\circ$ až 90° pro zimní provoz.

Skutečné množství energie

Střídáním oblačnosti a jasné oblohy během dne mezi východem a západem slunce nám znepříjemňuje výpočet dopadající energie, o to více, že tento jev je zcela nahodilý a poměrně nepředvídatelný. Při jasné obloze působí na osluněnou plochu intenzita celkového záření $I = I_p + I_d$, kdežto při obloze zatažené působí pouze intenzita difuzního záření I_d . Meteorologické údaje nám neposkytují informaci, kdy je pod mrakem a kdy je jasná obloha, ale pro usnadnění výpočtů můžeme vycházet z údaje o tzv. poměrné době slunečního svitu $\tau = \tau_{\text{skut}} / \tau_{\text{teor}}$, která je k dispozici za delší časové období (například za jeden měsíc). Z těchto údajů pak můžeme vypočíst skutečnou energii dopadající na osluněnou plochu takto:

$$Q_{\text{S den}} = \tau Q_{\text{S den teor}} + (1 - \tau) Q_{\text{d den}} \quad [\text{Wh/m}^2]$$

Pro výpočty skutečné energie dopadající na osluněnou plochu za měsíc nám potom slouží následující vztah:

$$Q_{\text{S měs}} = n Q_{\text{S den}} = n \tau Q_{\text{S den teor}} + n(1 - \tau) Q_{\text{d den}} \quad [\text{Wh/m}^2]$$

kde n je počet dní v měsíci

V zimních měsících by bylo dobré nastavovat úhel sklonu osluněné plochy α na výše uvedené hodnoty, to se ale s přihlédnutím ke skutečným hodnotám $Q_{s_{m\acute{e}s}}$ jeví jako liché. Protože poměr dopadajícího záření vyplívá jednoznačně lépe pro letní měsíce roku. Z tohoto důvodu se v našich klimatických podmínkách přistupuje k pevné instalaci osluněné plochy, kdy stačí aby byl úhel sklonu trvale nastaven na $\alpha = 30^\circ$ až 45° v průběhu celého roku.

Největší úskalí popsané metody

Prvním problémem se kterým se u metody setkáváme je volba součinitele znečištění atmosféry Z . Znečištění obecně je ovlivňováno velkým počtem víceméně nahodilých vlivů. Zde jsou některé z nich. Jednak musíme brát v potaz, že v zimních měsících je znečištění větší v důsledku vytápění, v letních měsících je zase hustší automobilový provoz. Dále je ovlivněno rozptylovými podmínkami a v neposlední řadě místními zdroji znečištění. Závisí také na denní a roční době a na obsahu vodních par ve vzduchu, který se zvyšuje s teplotou.

Průměrný měsíční součinitel znečištění atmosféry Z

Měsíc	horské oblasti	venkov	města	průmyslové oblasti
1	1,5	2,1	3,1	4,1
2	1,6	2,2	3,2	4,3
3	1,8	2,5	3,5	4,7
4	1,9	2,9	4	5,3
5	2	3,2	4,2	5,5
6	2,3	3,4	4,3	5,7
7	2,3	3,5	4,4	5,8
8	2,3	3,3	4,3	5,7
9	2,1	2,9	4	5,3
10	1,8	2,6	3,6	4,9
11	1,6	2,3	3,3	4,5
12	1,5	2,2	3,1	4,2
průměr	1,9	2,75	3,75	5

Druhým problémem je volba tzv. charakteristického dne v měsíci. Výpočty s ním můžeme použít pouze v případech, kdy jsou k dispozici i ostatní klimatické faktory (např. skutečná doba slunečního svitu) jen jako průměrné měsíční hodnoty. To ovlivňuje zejména sluneční deklinaci δ .

Třetím problémem je už zmiňovaný nutný přepočet azimutu slunce pro hodnoty hodinového úhlu nad 90° . V zásadě mnou použitý doplněk k úhlu je jednou z možností.

Čtvrtým problémem je volba albeda (reflexní schopnost okolních ploch), kdy zvolená hodnota $r = 0,2$ nemusí být vždy optimální a není výjimkou, když překročí i limitní hodnoty $r = 0,15$ až $0,25$.

Energie slunečního záření

pomůcka pro výpočet energie dopadajícího slunečního záření

Průchod slunečního záření atmosférou

sluneční konstanta neboli intenzita slunečního záření $I_0 = 1340$ až $1390 \text{ [W/m}^2\text{]}$

volím

$I_0 = 1360$

$Z=2$ pro místa nad 2000 m nad mořem

$Z=2,5$ pro místa nad 1000 m nad mořem

$Z=3$ pro místa s průmyslovými exhalacemi

$Z=4$ pro města s průmyslovými exhalacemi

Obecně se Z (znečištění atmosféry) udává $Z=3$

volím

$Z = 3$

Intenzita slunečního záření

Zmenšení sluneční konstanty závisí, jak na součiniteli znečištění atmosféry, tak na tloušťce vzduchu, kterou paprsky pronikají

Parametry určující polohu slunce nad obzorem

Směr dopadu slunečních paprsků je dán vzájemnou polohou slunce nad obzorem (vzhledem k zemi) a osluněné plochy. (obrázek viz předešlý text)

φ je zeměpisná šířka ve stupních

volím

$\varphi = 50$

sluneční deklinace δ pro charakteristický den v jednotlivých měsících ve stupních

leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec
-20	-11,5	0	11,5	20	23,45	20	11,5	0	-11,5	-20	-23,45

Výška slunce h [°] nad obzorem v denní době (hodině) τ

hodina	úhel τ	leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec
5	-105					6,065771	8,7556696	6,065771					
6	-90				8,78486	15,18892	17,748919	15,18892	8,78486				
7	-75			9,576579	18,40613	24,72953	27,224067	24,72953	18,40613	9,576579			
8	-60		9,335604	18,74724	27,88293	34,33385	36,848092	34,33385	27,88293	18,74724	9,335604		
9	-45	9,503390473	17,01788	27,03402	36,73534	43,5598	46,205445	43,5598	36,73534	27,03402	17,01788	9,50339	6,438307
10	-30	15,13513073	23,12699	33,82584	44,28435	51,73008	54,640796	51,73008	44,28435	33,82584	23,12699	15,13513	11,87911
11	-15	18,74994561	27,10973	38,3808	49,56528	57,71952	60,980087	57,71952	49,56528	38,3808	27,10973	18,74995	15,3526
12	0	20	28,5	40	51,5	60	63,45	60	51,5	40	28,5	20	16,55
13	15	18,74994561	27,10973	38,3808	49,56528	57,71952	60,980087	57,71952	49,56528	38,3808	27,10973	18,74995	15,3526
14	30	15,13513073	23,12699	33,82584	44,28435	51,73008	54,640796	51,73008	44,28435	33,82584	23,12699	15,13513	11,87911
15	45	9,503390473	17,01788	27,03402	36,73534	43,5598	46,205445	43,5598	36,73534	27,03402	17,01788	9,50339	6,438307
16	60		9,335604	18,74724	27,88293	34,33385	36,848092	34,33385	27,88293	18,74724	9,335604		
17	75			9,576579	18,40613	24,72953	27,224067	24,72953	18,40613	9,576579			
18	90				8,78486	15,18892	17,748919	15,18892	8,78486				
19	105					6,065771	8,7556696	6,065771					

Azimut slunce a [°] v denní době (hodině) τ

hodina	úhel τ	leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec
5	-105												
6	-90												
7	-75												
8	-60			-78,40052	-86,00318				-86,00318	-78,40052			
9	-45		-59,32003	-66,14135	-73,76084	-80,23353	-83,13936	-80,23353	-73,76084	-66,14135	-59,32003		
10	-30	-42,35398608	-46,43899	-52,54628	-59,8392	-66,48222	-69,60859	-66,48222	-59,8392	-52,54628	-46,43899	-42,35399	-40,75474
11	-15	-29,12585577	-32,19336	-37,0045	-43,18972	-49,34017	-52,43333	-49,34017	-43,18972	-37,0045	-32,19336	-29,12586	-27,95269
12	0	-14,88268714	-16,55445	-19,27896	-23,01941	-27,09037	-29,30495	-27,09037	-23,01941	-19,27896	-16,55445	-14,88269	-14,2545
13	15	14,88268714	16,55445	19,27896	23,01941	27,09037	29,304946	27,09037	23,01941	19,27896	16,55445	14,88269	14,2545
14	30	29,12585577	32,19336	37,0045	43,18972	49,34017	52,433331	49,34017	43,18972	37,0045	32,19336	29,12586	27,95269
15	45	42,35398608	46,43899	52,54628	59,8392	66,48222	69,608593	66,48222	59,8392	52,54628	46,43899	42,35399	40,75474
16	60		59,32003	66,14135	73,76084	80,23353	83,139363	80,23353	73,76084	66,14135	59,32003		
17	75			78,40052	86,00318				86,00318	78,40052			
18	90												
19	105												

hodnoty označené v tomto grafu jsou přepočteny jako doplněk k úhlu 180°

nadmořská výška v metrech

H=300

volím

Všechny následující hodnoty jsou počítány pro charakteristický den v měsíci

Intenzita záření na plochu kolmou ke slunečním paprskům I_{pn} [W/m²] v denní době (hodině) τ

hodina	úhel τ	leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec
5	-105					302,5119	395,17424	302,5119					
6	-90				396,1237	572,8068	627,64991	572,8068	396,1237				
7	-75			421,3705	640,5183	743,692	776,00374	743,692	640,5183	421,3705			
8	-60		413,7901	647,0167	783,8943	849,4046	870,13121	849,4046	783,8943	647,0167	413,7901		
9	-45	419,0778852	773,6801	773,6801	869,2505	915,4921	930,09339	915,4921	869,2505	773,6801	612,7773	419,0779	315,8822
10	-30	571,5681844	720,6857	844,9253	919,6544	955,8126	967,13333	955,8126	919,6544	844,9253	720,6857	571,5682	489,1909
11	-15	647,0678121	774,6083	881,6801	946,4401	977,6617	987,35494	977,6617	946,4401	881,6801	774,6083	647,0678	576,5528
12	0	669,8748291	791,059	893,0706	954,8566	984,5898	993,78943	984,5898	954,8566	893,0706	791,059	669,8748	602,9371
13	15	647,0678121	774,6083	881,6801	946,4401	977,6617	987,35494	977,6617	946,4401	881,6801	774,6083	647,0678	576,5528
14	30	571,5681844	720,6857	844,9253	919,6544	955,8126	967,13333	955,8126	919,6544	844,9253	720,6857	571,5682	489,1909
15	45	419,0778852	612,7773	773,6801	869,2505	915,4921	930,09339	915,4921	869,2505	773,6801	612,7773	419,0779	315,8822
16	60		413,7901	647,0167	783,8943	849,4046	870,13121	849,4046	783,8943	647,0167	413,7901		
17	75			421,3705	640,5183	743,692	776,00374	743,692	640,5183	421,3705			
18	90				396,1237	572,8068	627,64991	572,8068	396,1237				
19	105					302,5119	395,17424	302,5119					

Úhel sklonu osluněné plochy od vodorovné roviny α [°]

volím **α=45**

Azimutový úhel normály osluněné plochy a_s [°]

volím **a_s=0**

Intenzita přímého slunečního záření na obecně položenou plochu I_p [W/m^2] v denní době (hodině) τ

hodina	úhel τ	leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec
5	-105					-64,27648	-79,76811	-64,27648					
6	-90				6,88307	17,07481	21,769101	17,07481	6,88307				
7	-75					202,354	210,46971	202,354	172,9618				
8	-60			108,6437	172,9618	422,8909	427,79292	422,8909	396,2382	108,6437			
9	-45		194,7801	322,2773	396,2382	633,2858	633,31937	633,2858	596,7525	322,2773	194,7801		
10	-30	264,9098271	412,337	544,9927	615,1258	913,1638	905,85791	913,1638	848,3968	544,9927	412,337	264,9098	193,1788
11	-15	446,3329746	596,7525	728,9423	793,4653	803,37	799,0055	803,37	793,4653	728,9423	596,7525	446,333	370,2155
12	0	565,8028117	716,9439	848,3968	908,8747	913,1638	905,85791	913,1638	908,8747	848,3968	716,9439	565,8028	488,9699
13	15	607,1127739	758,483	889,6722	948,7186	951,0407	942,70885	951,0407	948,7186	889,6722	758,483	607,1128	530,1223
14	30	565,8028117	716,9439	848,3968	908,8747	913,1638	905,85791	913,1638	908,8747	848,3968	716,9439	565,8028	488,9699
15	45	446,3329746	596,7525	728,9423	793,4653	803,37	799,0055	803,37	793,4653	728,9423	596,7525	446,333	370,2155
16	60	264,9098271	412,337	544,9927	615,1258	633,2858	633,31937	633,2858	615,1258	544,9927	412,337	264,9098	193,1788
17	75		194,7801	322,2773	396,2382	422,8909	427,79292	422,8909	396,2382	322,2773	194,7801		
18	90			108,6437	172,9618	202,354	210,46971	202,354	172,9618	108,6437			
19	105				6,88307	17,07481	21,769101	17,07481	6,88307				
						-64,27648	-79,76811	-64,27648					

Albedo (reflexní schopnost okolních ploch pro sluneční paprsky ($r=0,15$ až $0,25$, nejčastěji $r=0,2$))

volím $r=0,2$

Intenzita difuzního záření Id [W/m²]

hodina	úhel τ	leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec
5	-105					33,49179	44,549796	33,49179					
6	-90				44,65916	64,48316	70,64659	64,48316	44,65916				
7	-75			47,54734	72,10883	84,22604	88,232061	84,22604	72,10883	47,54734			
8	-60												
9	-45		46,68389	72,85029	89,23135	97,93222	100,87058	97,93222	89,23135	72,85029	46,68389		
10	-30	47,28650861	68,96546	87,93947	100,7435	107,7193	110,07123	107,7193	100,7435	87,93947	68,96546	47,28651	35,14744
11	-15	64,34488452	81,44683	97,31053	108,3815	114,4288	116,44583	114,4288	108,3815	97,31053	81,44683	64,34488	55,17285
12	0	72,85613497	88,05626	102,5557	112,8066	118,3831	120,22362	118,3831	112,8066	102,5557	88,05626	72,85613	64,90153
13	15	75,47698203	90,14663	104,2549	114,2614	119,6927	121,47783	119,6927	114,2614	104,2549	90,14663	75,47698	67,85769
14	30	72,85613497	88,05626	102,5557	112,8066	118,3831	120,22362	118,3831	112,8066	102,5557	88,05626	72,85613	64,90153
15	45	64,34488452	81,44683	97,31053	108,3815	114,4288	116,44583	114,4288	108,3815	97,31053	81,44683	64,34488	55,17285
16	60	47,28650861	68,96546	87,93947	100,7435	107,7193	110,07123	107,7193	100,7435	87,93947	68,96546	47,28651	35,14744
17	75		46,68389	72,85029	89,23135	97,93222	100,87058	97,93222	89,23135	72,85029	46,68389		
18	90			47,54734	72,10883	84,22604	88,232061	84,22604	72,10883	47,54734			
19	105				44,65916	64,48316	70,64659	64,48316	44,65916				
						33,49179	44,549796	33,49179					

Qd den	[W/h/m ²]	444,4520382	660,4515	920,6616	1170,123	1361,021	1423,5572	1361,021	1170,123	920,6616	660,4515	444,452	378,3013
--------	-----------------------	-------------	----------	----------	----------	----------	-----------	----------	----------	----------	----------	---------	----------

Výsledný energetický účinek slunečního záření I [W/m²]

hodina	úhel τ	leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec
5	-105					-30,78469	-35,21831	-30,78469					
6	-90				51,54223	81,55798	92,415691	81,55798	51,54223				
7	-75			156,1911	245,0706	286,5801	298,70177	286,5801	245,0706	156,1911			
8	-60		241,4639	395,1276	485,4695	520,8231	528,66349	520,8231	485,4695	395,1276	241,4639		
9	-45	312,1963357	481,3025	632,9321	715,8693	741,0051	743,3906	741,0051	715,8693	632,9321	481,3025	312,1963	228,3262
10	-30	510,6778591	678,1993	826,2529	901,8469	917,7988	915,45133	917,7988	901,8469	826,2529	678,1993	510,6779	425,3884
11	-15	638,6589466	805,0001	950,9525	1021,681	1031,547	1026,0815	1031,547	1021,681	950,9525	805,0001	638,6589	553,8715
12	0	682,589756	848,6296	993,927	1062,98	1070,733	1064,1867	1070,733	1062,98	993,927	848,6296	682,5898	597,98
13	15	638,6589466	805,0001	950,9525	1021,681	1031,547	1026,0815	1031,547	1021,681	950,9525	805,0001	638,6589	553,8715
14	30	510,6778591	678,1993	826,2529	901,8469	917,7988	915,45133	917,7988	901,8469	826,2529	678,1993	510,6779	425,3884
15	45	312,1963357	481,3025	632,9321	715,8693	741,0051	743,3906	741,0051	715,8693	632,9321	481,3025	312,1963	228,3262
16	60		241,4639	395,1276	485,4695	520,8231	528,66349	520,8231	485,4695	395,1276	241,4639		
17	75			156,1911	245,0706	286,5801	298,70177	286,5801	245,0706	156,1911			
18	90				51,54223	81,55798	92,415691	81,55798	51,54223				
19	105					-30,78469	-35,21831	-30,78469					
Energie dopadající na osluněnou plochu Qs den teor. [Wh/m²]		3605,656039	5260,561	6916,839	7905,94	8167,788	8203,1589	8167,788	7905,94	6916,839	5260,561	3605,656	3013,152

Teoretická doba slunečního svitu τ_{teor} [h]

měsíc	leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec
	8,26	10,12	13,9	15,7	16,34	15,7	13,9	10,12	8,26	7,85		

Střední intenzita záření během dne $I_{\text{stř}}$ [W/m²]

měsíc	leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec
	436,520	519,8183	576,4033	568,7726	520,2413	502,02931	520,2413	568,7726	576,4033	519,8183	436,5201	383,841

Poměrná doba slunečního svitu $\tau = \tau_{\text{skut}} / \tau_{\text{teor}}$ [h]

(vztaženo k teoretické době τ_{teor} platné pro 50° severní šířky)
pro České Budějovice

měsíc	leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec
	0,18	0,29	0,37	0,39	0,43	0,46	0,49	0,51	0,48	0,34	0,22	0,15

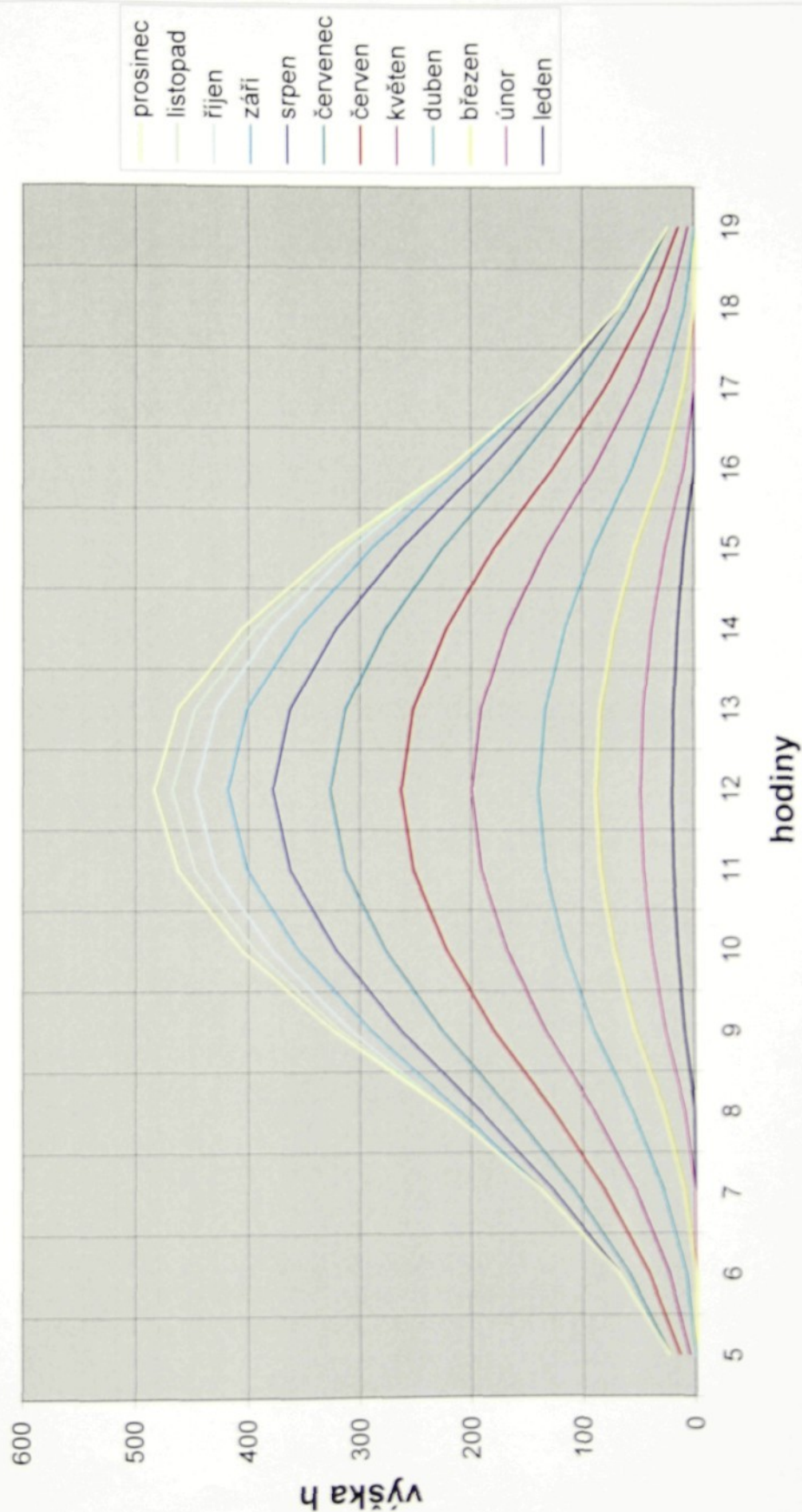
Skutečná energie dopadající na osluněnou plochu Q_s den [Wh/m²]

měsíc	leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec
	1013,468	1994,483	3139,247	3797,092	4287,931	4542,174	4696,337	4605,39	3798,827	2224,489	1139,917	773,5289

Skutečná energie dopadající za měsíc Q_s měs [Wh/m²]

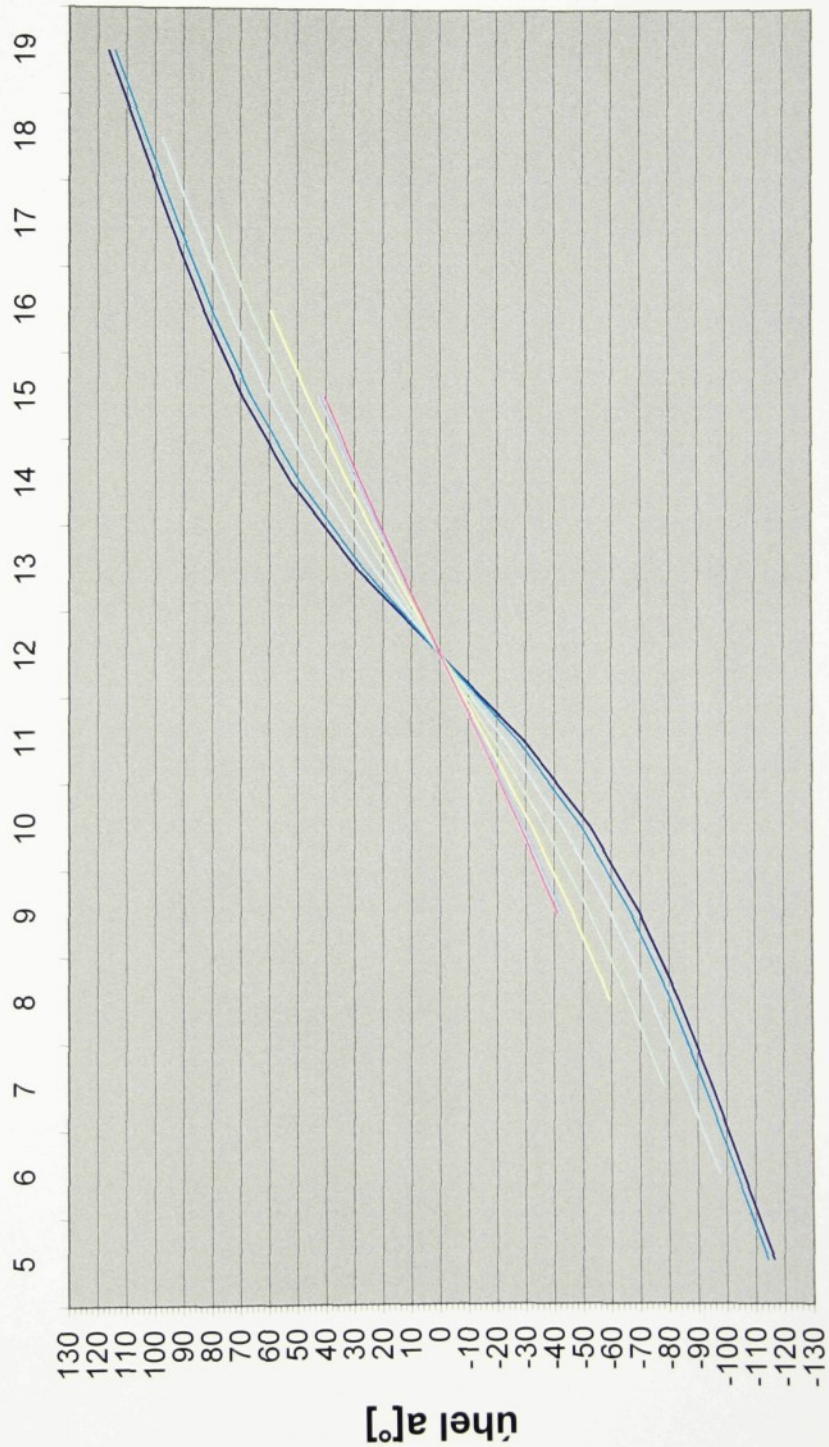
měsíc	leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec
počet dní v měsíci	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
2001	31417,53151	55845,53	97316,67	113912,8	132925,9	136265,22	145586,4	142767,1	113964,8	68959,15	34197,51	23979,4

Výška slunce nad obzorem

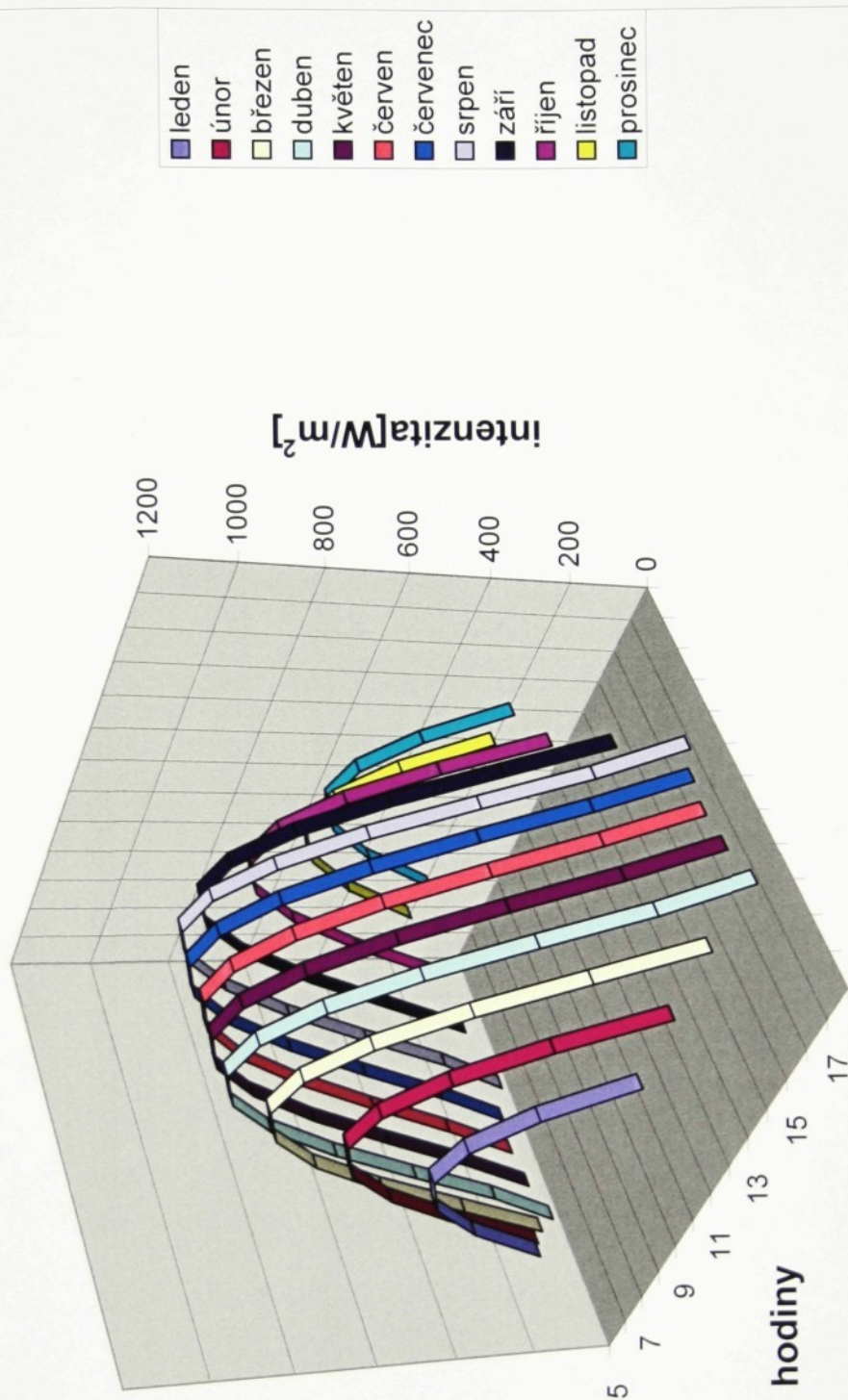


Azimut slunce

hodiny

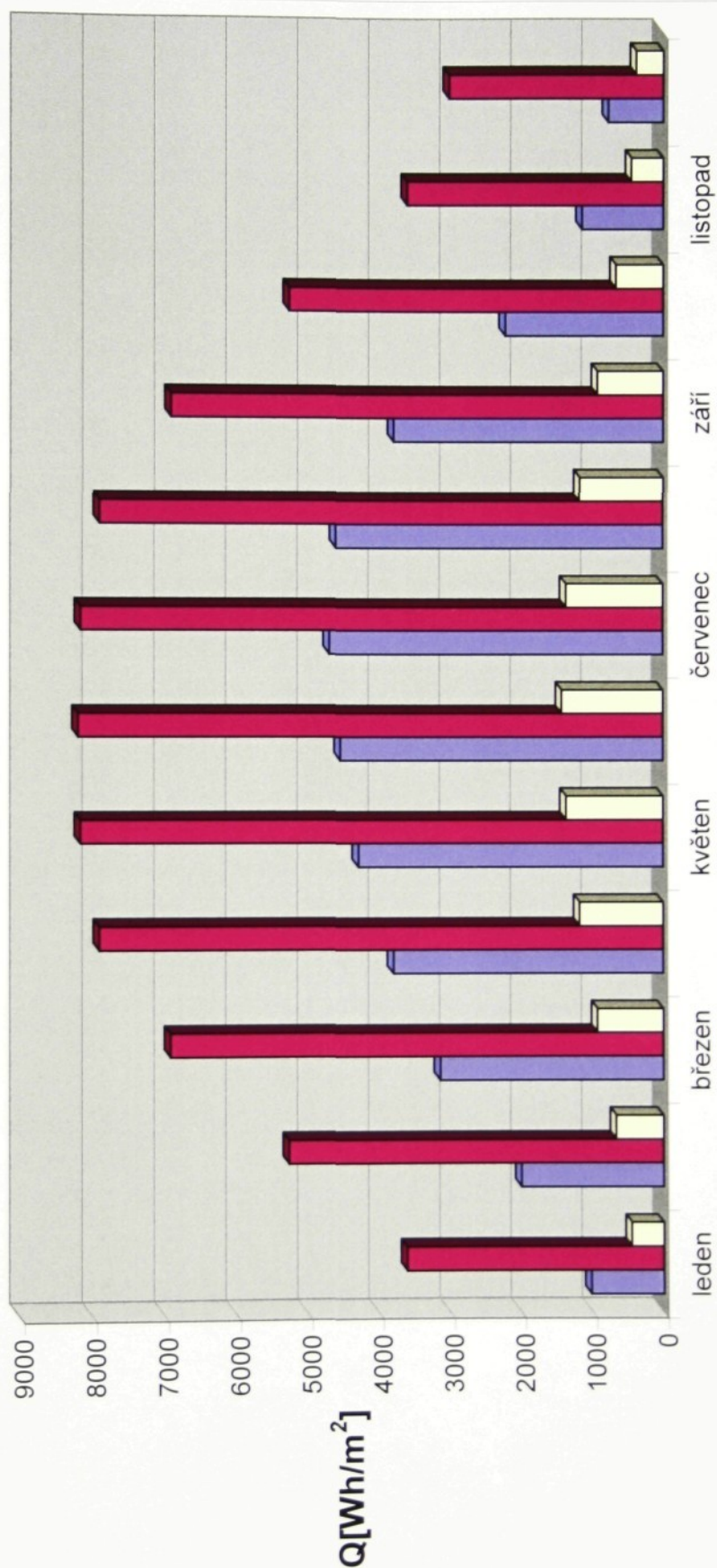


Výsledný energetický účinek

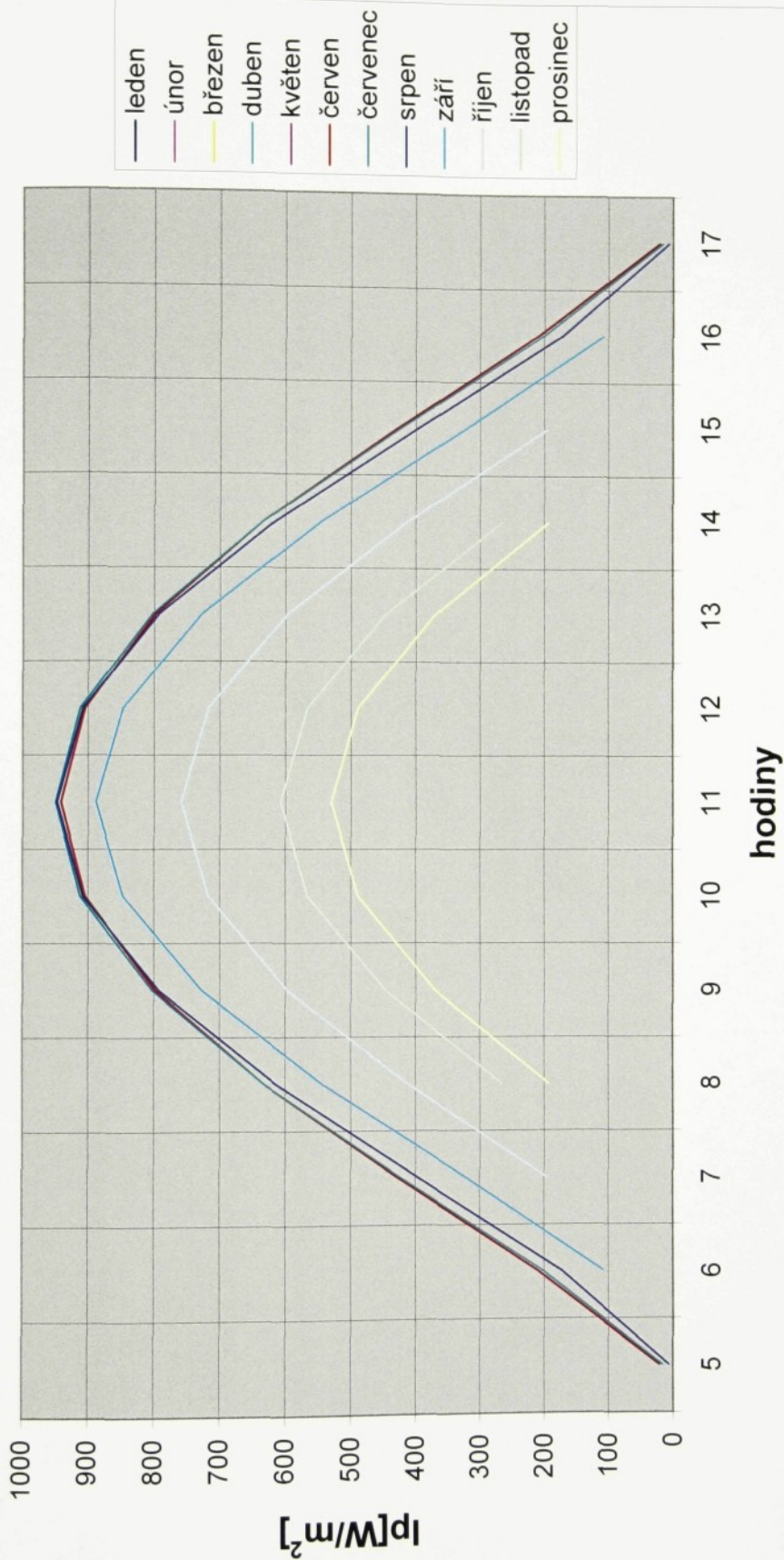


Energie Qs den

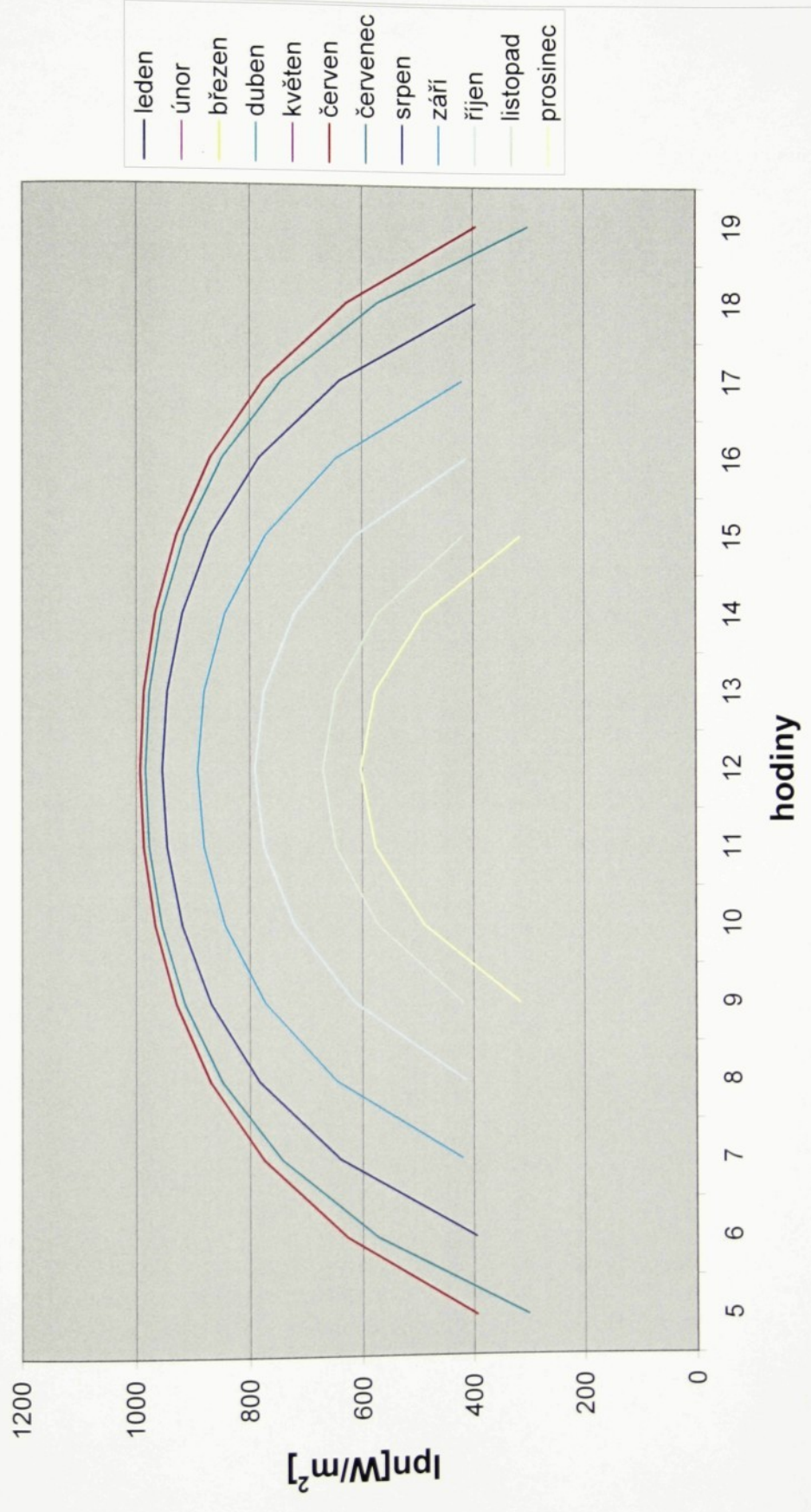
■ Qs den ■ Qs den teor □ Qd den



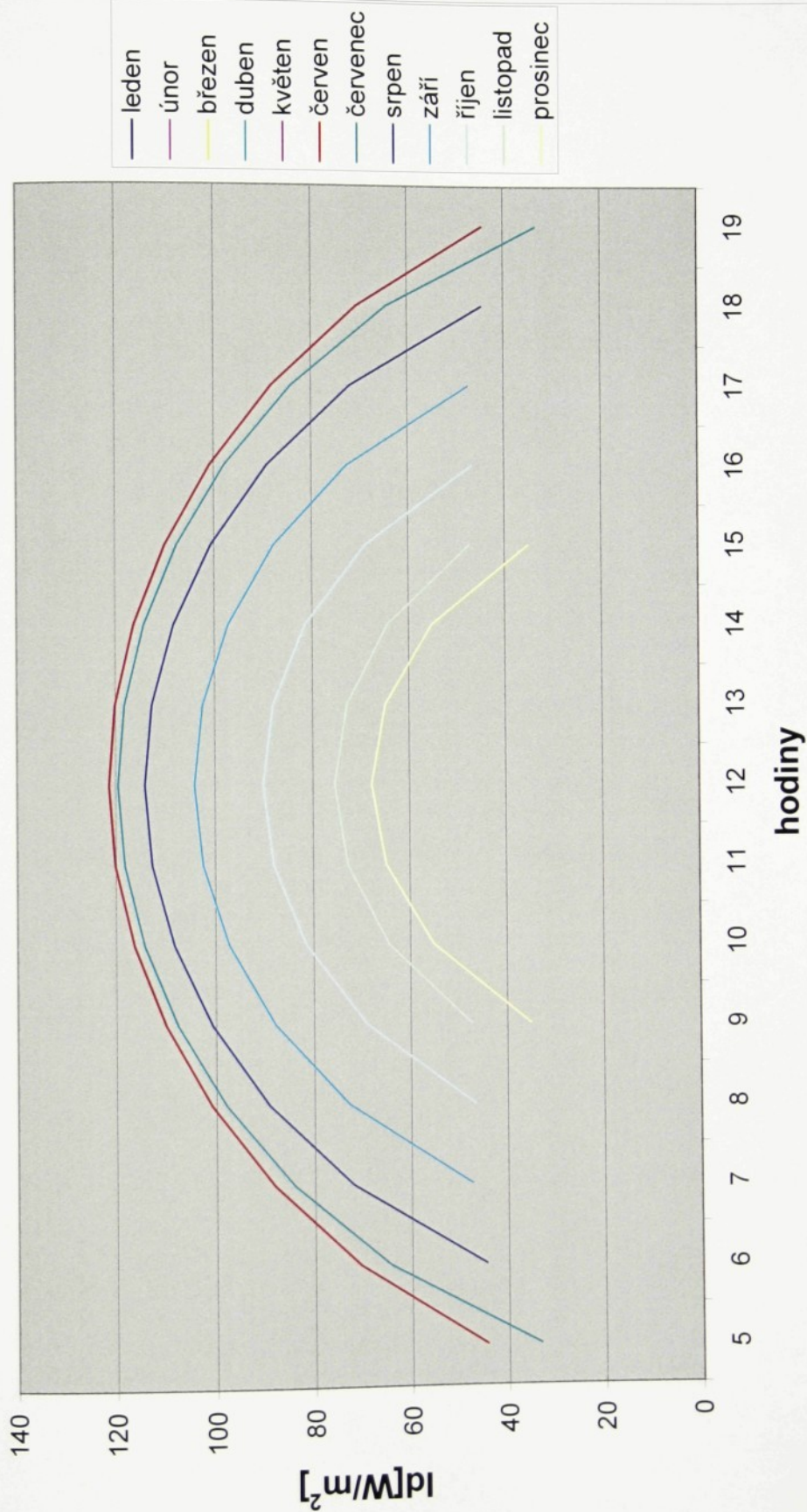
Intenzita přímého záření na obecně položenou plochu



Intenzita záření na plochu kolmou



Intenzita difuzního záření



Experimentální měření výkonu fotovoltaických článků

Měření probíhalo jednak na solárním zařízení instalovaném na Střední průmyslové škole strojní v Liberci a jednak na instalaci na Technické univerzitě v Liberci na fakultě elektrotechnické. Měřilo se vždy jeden den a cílem u obou měření bylo: zjistit výkon solárního zařízení v měnícím se čase v závislosti na teplotě povrchu solárních panelů. Tato měření měla sloužit k ověření teoretické výpočetní metody z předcházející kapitoly. Proto se musela zjistit ještě následující data: azimut osluněné plochy α_s , sklon plochy od vodorovné roviny α , datum (pro přesný výpočet sluneční deklinace δ), zeměpisná šířka φ , nadmořská výška a účinnost solárního článku. Dále bylo třeba zajistit odpor zátěže takový, aby měření probíhalo co nejbližší k tzv. bodu MPP na voltampérové charakteristice, kde článek dodává maximální výkon.

Měření první: Technická univerzita v Liberci

Popis zapojení a druh solárních panelů

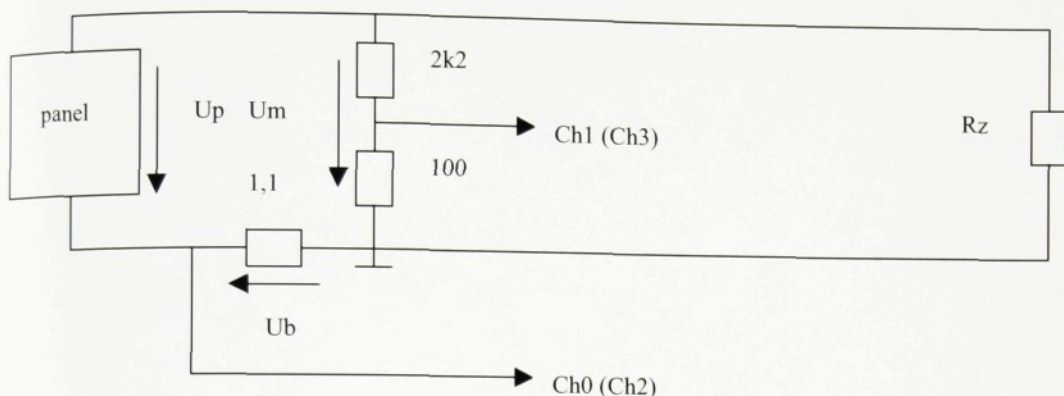
Zařízení se skládá ze dvou kusů solárních panelů TGM 1500-12V, měřicího odporového děliče, zátěžového odporu a měřicí počítačové karty. Dále je zde externě použit digitální dotykový **teploměr**.

Solární panel TGM 1200-12V má podle katalogu mít maximální výkon 27W, maximální napětí 18V a špičkový proud 1500mA při hodnotách STC. Nutno podotknout, že každý jednotlivý panel nemůže mít tyto parametry stejné, neboť jsou závislé na parametrech nejslabšího článku (díky sériovému zapojení článků) a ten není technologicky možné vyrobit identický. Skládá se z dvou paralelních větví, v nichž jsou články zapojeny do série. V panelu je zapojeno 36 kusů půlených solárních článků.

Vlastní měření

Měření probíhalo na děliči napětí. Výstupy z děliče byly přivedeny do měřicí karty v počítači, kde byly za pomoci programu Matlab zpracovány a vizualizovány. V tomto programu byla také provedena korekce úbytku napětí na bočníku. Data byla načítána v intervalu jedné sekundy a vždy po deseti minutách zprůměrována a uložena do souboru. Toto měření bylo automatické. Jedinou hodnotou, kterou bylo nutno odečítat, byl údaj na teploměru. Odečítání probíhalo také v intervalu deseti minut. Senzor teploměru se přikládal na zadní stěnu článku doprostřed, aby se zamezilo ovlivnění teploty hliníkovými nosníky panelu.

Zapojení děliče napětí:



$$U = U_m + R_b (U_m / R_d)$$

$$I_m = I_p$$

kde: U_p je napětí panelu a je přibližně rovno U

U_b – napětí na bočníku

U_m – napětí měřené

R_b – odpor bočníku

R_d – odpor děliče

I_m – proud můstku

I_p – proud panelu

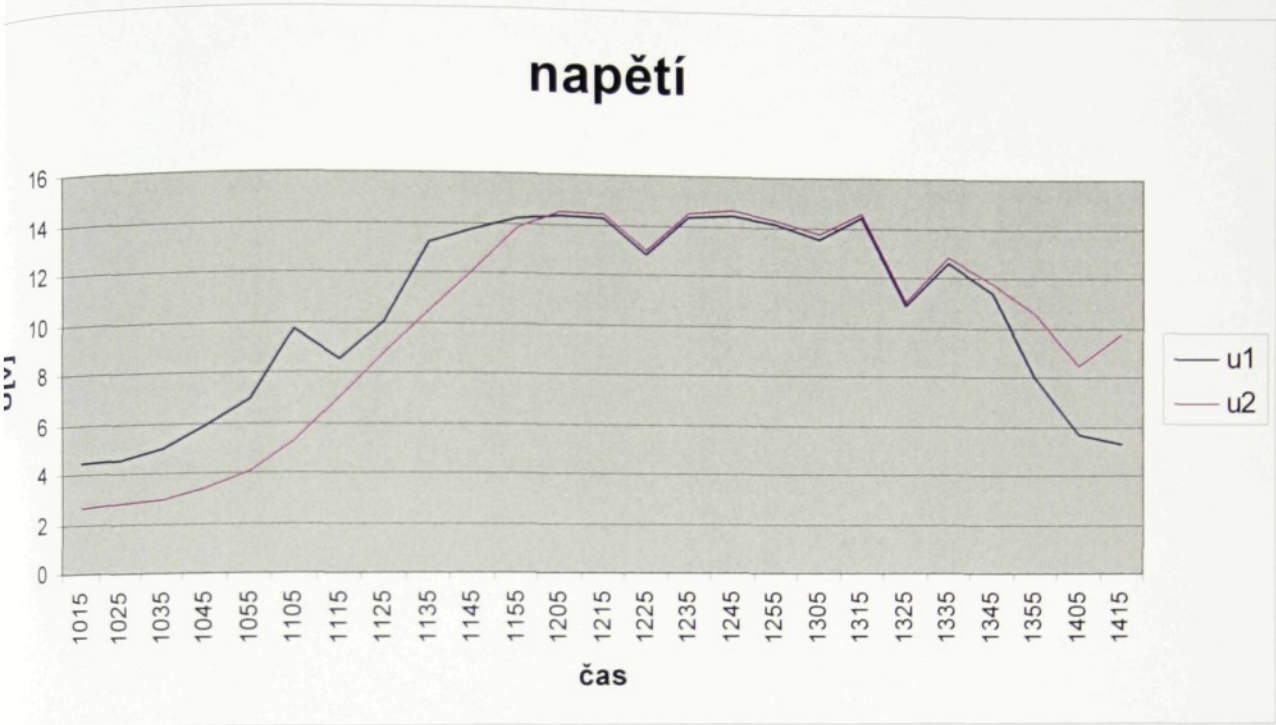
Volba velikosti zátěže je závislá na tom, aby panel pracoval v optimální oblasti voltampérové charakteristiky. Měření probíhalo na zátěži dva ohmy. Pro optimální výkon by ale byla vhodná zátěž vypočtená z maximálního napětí a proudu uváděného v katalogu ($18/1,5=12$). Jelikož jsme se těmito ideálními parametry při měření ani nepřiblížili, byla nakonec zvolena hodnota R_z téměř optimální. Zkoušeli jsme zapojit do zátěže i odpor pět ohmů, ale při odporu dva ohmy byl výsledný výkon větší.

Měření probíhalo jen do brzkého odpoledne, protože v dalších hodinách byl článek zastíněn parapetem a měření ztratilo smysl. Instalace za dvojitým oknem, kdy normála okna svírala s dopadajícími slunečními paprsky úhel kolem $70 - 80^\circ$ a kdy se více jak polovina záření od okna odrazila, byla hlavním důvodem, proč výsledný maximální výkon článku dosahoval sotva 10W oproti výkonu 27W uváděnému v katalogu. Dalším faktorem snižujícím výkon panelu byl velký sklon od vodorovné plochy α , který dosahoval 75° .

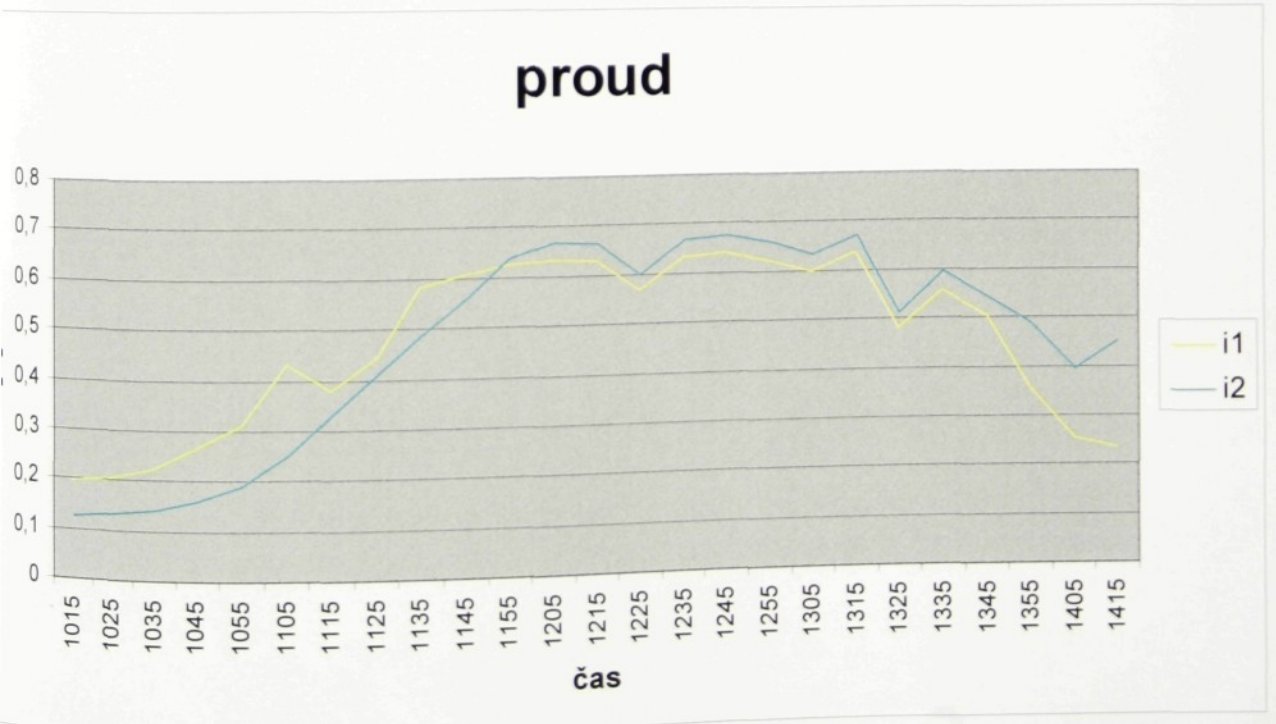
Naměřené hodnoty

čas	teplota[°C]	u1[V]	u2[V]	i1[A]	i2[A]	p1[W]	p2[W]
10 ¹⁵	47,4	4,451	2,66	0,199	0,125	0,887	0,334
10 ²⁵	49,4	4,553	2,782	0,204	0,131	0,928	0,365
10 ³⁵	50,1	4,971	2,971	0,222	0,14	1,107	0,416
10 ⁴⁵	50,1	5,921	3,42	0,265	0,161	1,592	0,551
10 ⁵⁵	49,5	6,956	4,053	0,31	0,19	2,176	0,774
11 ⁰⁵	50,2	9,75	5,314	0,433	0,249	4,598	1,332
11 ¹⁵	49,8	8,506	7,027	0,378	0,328	3,266	2,317
11 ²⁵	50,3	10,013	8,772	0,445	0,408	4,531	3,594
11 ³⁵	49,8	13,182	10,472	0,584	0,486	7,706	5,105
11 ⁴⁵	51,6	13,705	12,066	0,606	0,559	8,331	6,758
11 ⁵⁵	51	14,154	13,807	0,626	0,638	8,866	8,816
12 ⁰⁵	51,9	14,358	14,462	0,635	0,667	9,116	9,648
12 ¹⁵	50,4	14,279	14,39	0,631	0,664	9,019	9,556
12 ²⁵	50,1	12,859	12,973	0,569	0,599	7,93	8,427
12 ³⁵	50,9	14,319	14,48	0,633	0,668	9,069	9,673
12 ⁴⁵	46,7	14,451	14,62	0,639	0,674	9,235	9,858
12 ⁵⁵	48,5	14,084	14,261	0,623	0,658	8,934	9,547
13 ⁰⁵	44,7	13,52	13,723	0,598	0,633	8,369	8,972
13 ¹⁵	44,5	14,388	14,577	0,636	0,672	9,157	9,804
13 ²⁵	42,6	10,838	11,056	0,48	0,511	6,395	6,887
13 ³⁵	44,3	12,599	12,846	0,558	0,594	7,704	8,311
13 ⁴⁵	37,1	11,423	11,757	0,506	0,543	6,776	7,415
13 ⁵⁵	35,3	8,005	10,557	0,356	0,489	3,324	6,196
14 ⁰⁵	34,4	5,674	8,47	0,253	0,393	1,557	4,181
14 ¹⁵	32,3	5,257	9,709	0,235	0,451	1,257	4,713

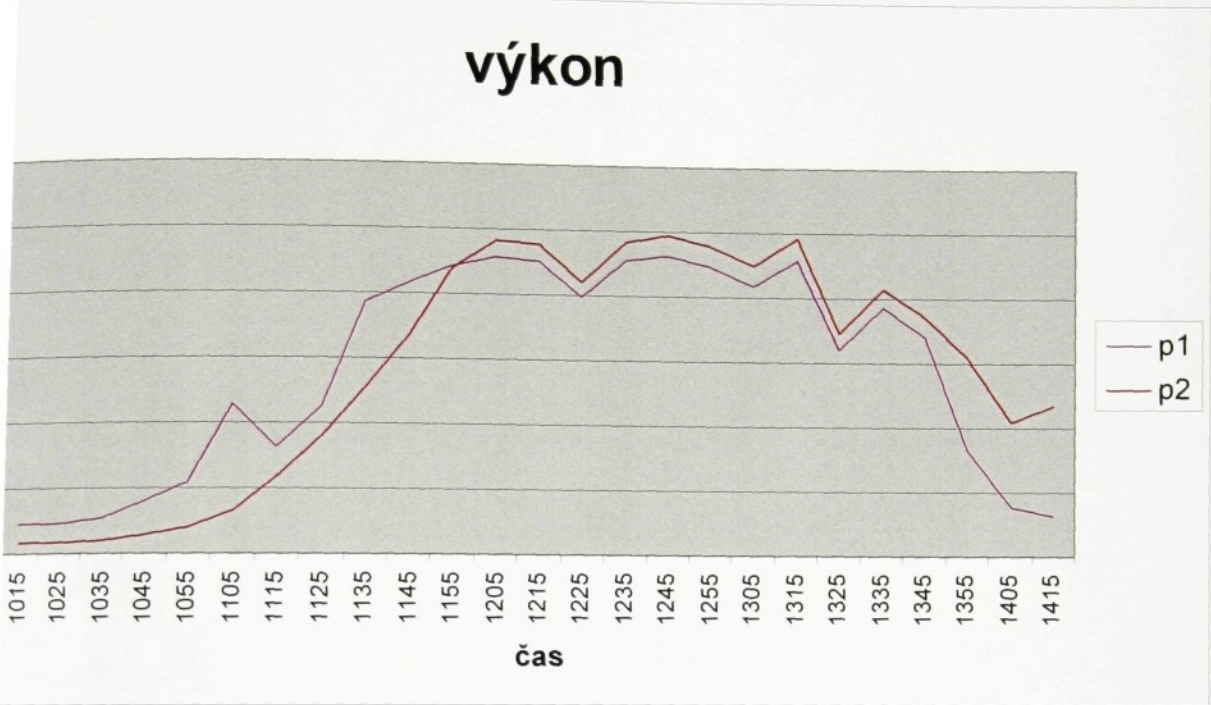
Závislost napětí na čase



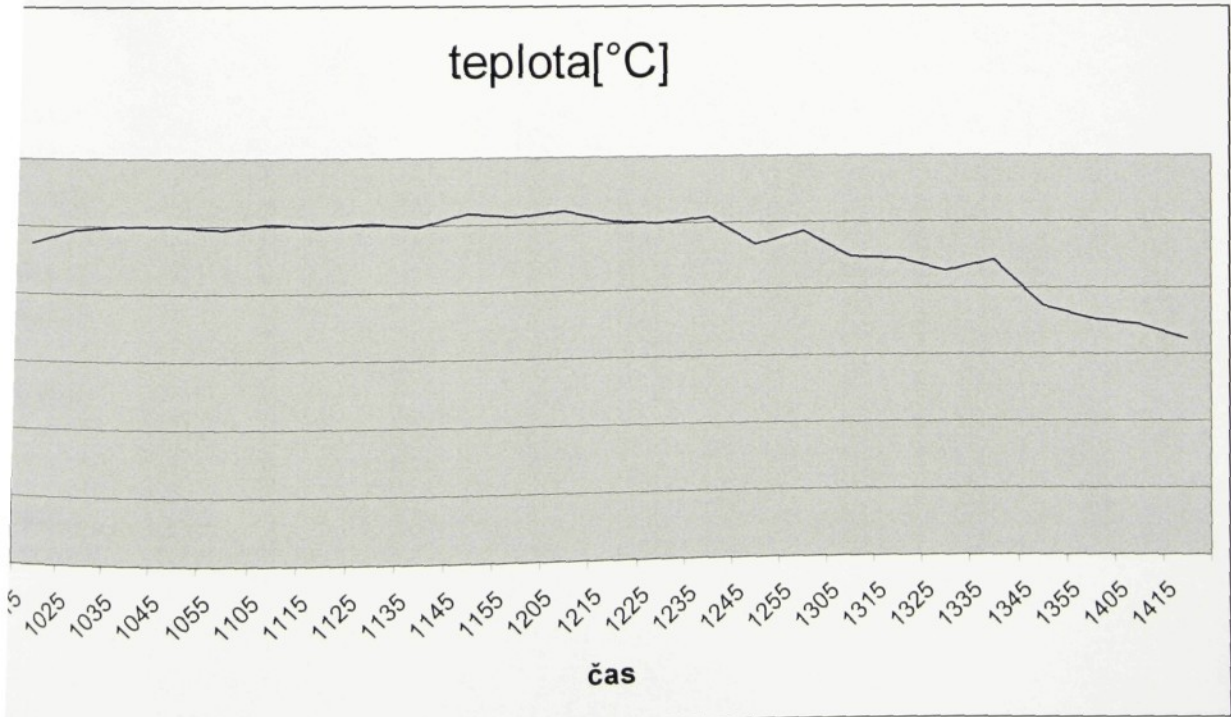
Závislost proudu na čase



závislost výkonu na čase



závislost teploty na čase



ávěr a vyhodnocení

Toto měření nepřineslo očekávané výsledky, protože použité solární zařízení je typickou ukázkou nesprávné instalace. Ale právě díky tomu bylo poučné a ukázalo se jak důležitou součástí jakéhokoli návrhu solárního zařízení je kladení důrazu právě na správnou instalaci. Energetické zisky z tohoto zařízení jsou poloviční až třetinové než by se dalo očekávat podle katalogových hodnot neboli za ideálních podmínek. Proto jsem toto měření nepoužil pro porovnání z teoretickou výpočtovou metodou.

Měření druhé: Střední průmyslová škola strojní Liberec

opis zapojení

Demonstrační fotovoltaický systém FVS 2000 dodaný firmou OLARTEC s.r.o., byl instalován v rámci projektu Slunce do škol – Elektřina do škol. Jedná se o systém dodávající elektrickou energii přímo do elektrické rozvodné sítě. Skládá se z dvanácti kusů do série zapojených FV panelů RADIX72-100, střídače SUNRISE Mini, zobrazovací jednotky VS2000, softwaru pro PC pracujícím s linkou RS485 a rozvaděče RADC 20. Jeho výkon je 1,2 kWp při STC.

fotovoltaické moduly

Použitý modul RADIX72-100 má maximální výkon 100,6 Wp, napětí při maximálním výkonu 16,6 V, proud při maximálním výkonu 6,05 A. Účinnost solárního článku je 13,4 % a účinnost celého panelu je 11,5 %. Systém je instalován na střeše objektu školy, konstrukce je nakloněna v úhlu 45° od vodorovné roviny a je orientována na jih. Konstrukce je zatížena betonovými bloky, které ji jistí proti převrnutí a posunutí při silném větru. Instalace se skládá ze dvou konstrukcí po šesti fotovoltaických panelech.

střídač

Bezúdržbový sinusový střídač SUNRISE Mini s automatickým přepínáním na elektrickou rozvodnou síť přenáší data přes sběrnici RS485 (zvolena kvůli dosahu signálu až na 800 m) do zobrazovací jednotky a do počítače. Na vstupu má následující parametry: rozsah generátoru 700 - 1550 Wp, rozsah vstupních napětí 120 - 350 V. Na výstupu pak: napětí 230 V (+10/-5%), frekvenci 50 Hz (+/- 0,2 Hz) a maximální výstupní výkon 1050 W. Jeho maximální účinnost dosahuje 93 %.

Popis měření

Popsaný systém má měření zcela zautomatizováno a v reálném čase se většina důležitých veličin zobrazuje na informačním panelu a data jsou také přiváděna do PC. V počítači se za pomoci programu SUNRISEE ukládají a vyhodnocují. Data se ukládají z následujících veličin: výkon [W], vyrobená energie [kWh], napětí v síti [V], proud do sítě [A], napětí na panelech [V], proud z panelů [A] a teplota panelů [°C]. Výsledkem jsou pak přehledné grafy všech těchto veličin a textový soubor. Data se načítají v intervalu patnácti minut.

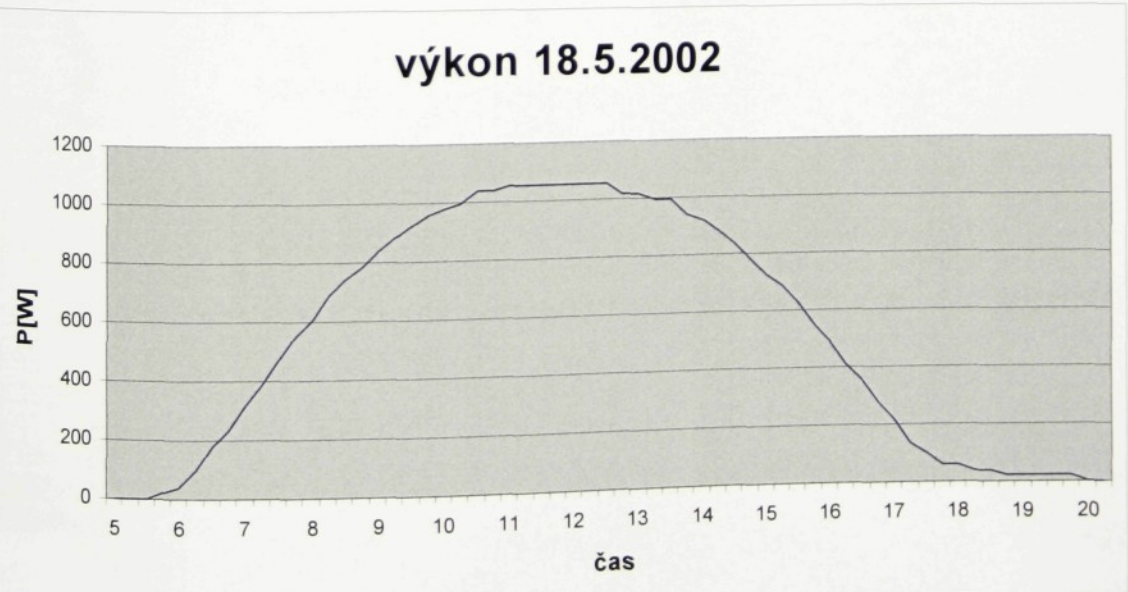
Díky ochotě pana inženýra Šorma mi byla poskytnuta data za delší časové období, díky nimž mohu udělat srovnání s teoretickou výpočtovou metodou.

Ověření teoretické výpočtové metody

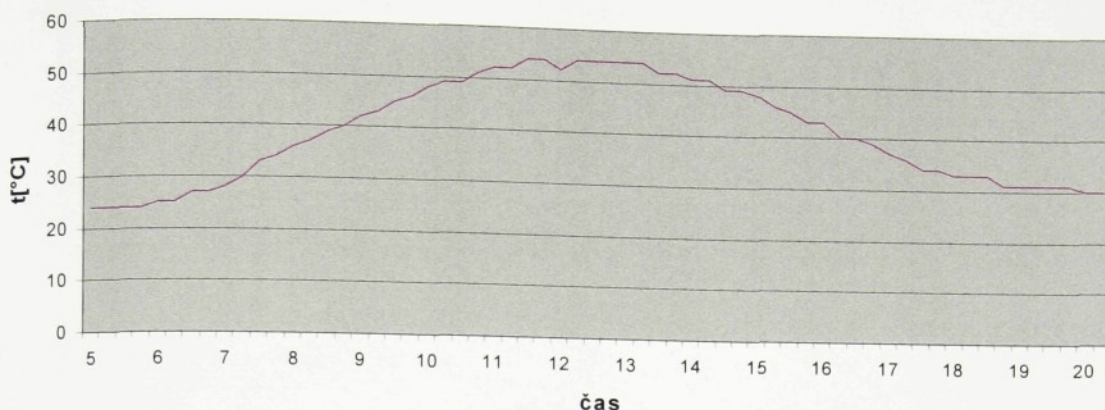
Přepočtení výkonu fotovoltaického systému

K co nejpřesnějšímu výsledku se dopracuji pouze eliminováním co největšího počtu nahodilých vlivů. Proto si z obdržených dat vyberu měření v tom dni, kdy nebyla vůbec žádná oblačnost. Ideálním dnem, který i podle meteorologických údajů vyhovuje nejlépe, je 18.5.2002. Dále vím, že s rostoucí teplotou nad 25 °C se s každým zvýšením teploty o jeden stupeň, sníží účinnost systému o 0,4 %. Proto data výkonu přepočtu tak, aby výsledkem byl výkon v průběhu celého dne při konstantní teplotě 25 °C.

$$P_{\text{korig}} = P + \{(P/100) (P-25) 0,4\} \quad [\text{W}]$$



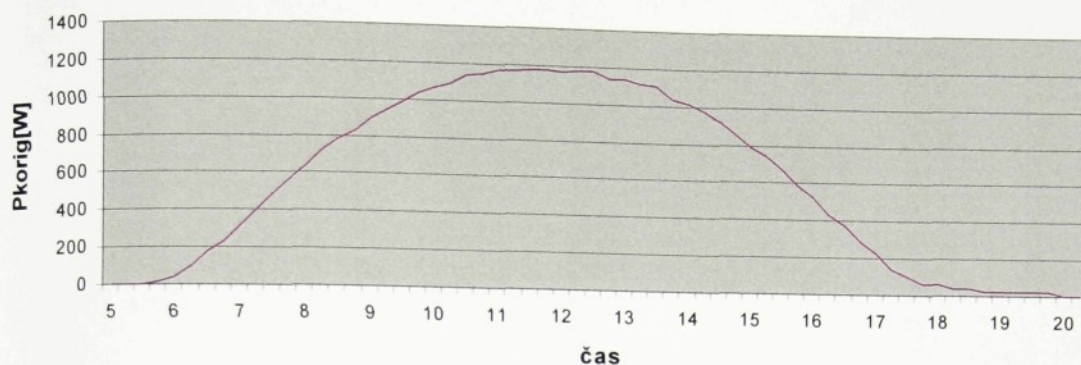
teplota 18.5.2002



Tabulka dat pro 18.5.2002

čas [h]	5				6			
P[W]	0	0	0	19	39	97	176	234
teplota[°C]	24	24	24	24	25	25	27	27
Pkorig [W]	0	0	0	19,076	39	97	177,408	235,872
čas [h]	7				8			
P[W]	312	391	469	547	606	684	743	782
teplota[°C]	28	30	33	34	36	37	39	40
Pkorig [W]	315,744	398,82	484,008	566,692	632,664	716,832	784,608	828,92
čas [h]	9				10			
P[W]	840	880	919	958	977	997	1036	1036
teplota[°C]	42	43	45	46	48	49	49	51
Pkorig [W]	897,12	943,36	992,52	1038,472	1066,884	1092,712	1135,456	1143,744
čas [h]	11				12			
P[W]	1056	1056	1056	1056	1056	1056	1056	1016
teplota[°C]	52	52	54	54	52	54	54	54
Pkorig [W]	1170,048	1170,048	1178,496	1178,496	1170,048	1178,496	1178,496	1133,856
čas [h]	13				14			
P[W]	1016	997	997	938	919	880	840	782
teplota[°C]	54	54	52	52	51	51	49	49
Pkorig [W]	1133,856	1112,652	1104,676	1039,304	1014,576	971,52	920,64	857,072
čas [h]	15				16			
P[W]	723	684	625	547	488	410	352	273
teplota[°C]	48	46	45	43	43	40	40	39
Pkorig [W]	789,516	741,456	675	586,384	523,136	434,6	373,12	288,288
čas [h]	17				18			
P[W]	215	136	97	58	58	39	39	19
teplota[°C]	37	36	34	34	33	33	33	31
Pkorig [W]	225,32	141,984	100,492	60,088	59,856	40,248	40,248	19,456
čas [h]	19				20			
P[W]	19	19	19	19	0	0		
teplota[°C]	31	31	31	31	30	30		
Pkorig [W]	19,456	19,456	19,456	19,456	0	0		

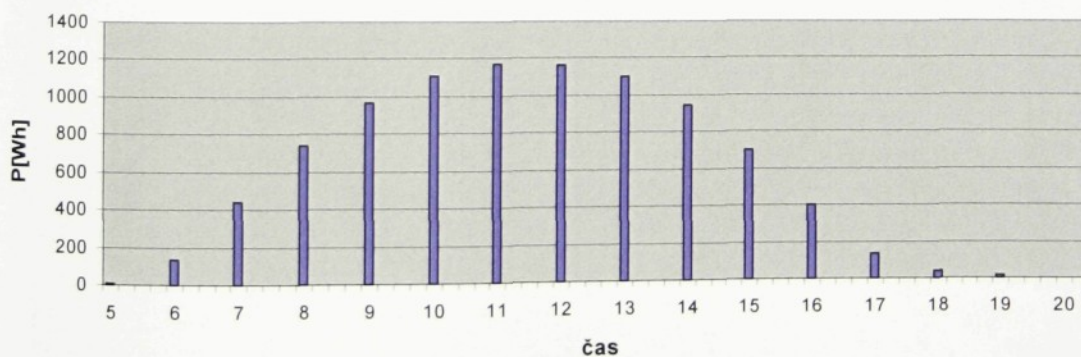
výkon přepočtený na konstantní hodnotu 25°C



Tabulka korigované vyprodukované energie

čas [h]	5	6	7	8	9	10	11	12
P _{korig} [Wh]	4,769	137,32	441,316	740,756	967,868	1109,699	1174,272	1165,224
čas [h]	13	14	15	16	17	18	19	20
P _{korig} [Wh]	1097,622	940,952	698,089	404,786	131,971	39,952	19,456	0

korigované výkony v jednotlivých hodinách



Výsledná energie vyprodukovaná solárním zařízením po korekci na konstantní teplotu je **9074,052 Wh** za den 18.5.2002. Tuto hodnotu jsme získali sečtením výkonů v jednotlivých hodinách.

Jestliže tuto hodnotu vydělím účinností střídače uváděnou výrobcem a vynásobím stem a ten samý postup zopakuji pro účinnost panelů, dostanu energii dopadajícího slunečního záření na plochu panelů.

$$Q_s = (9074,052 / 93) \cdot 100 = 9757,045$$

$$Q_p = (9757,045 / 11,5) \cdot 100 = \mathbf{84843,87 \text{ [Wh]}}$$

Tuto hodnotu vydělím plochou panelů v metrech a dostanu energii slunečního záření dopadající na jeden metr čtverečný :

$$Q = 84843,87 / 10,45 = \mathbf{8119,03 \text{ [Wh/m}^2\text{]}}$$

Tuto výslednou hodnotu porovnáám s hodnotou vypočtenou za pomoci teoretické výpočetní metody pro stejné podmínky, které byly na místě měření.

Pro výpočet teoretické hodnoty dopadající energie musím ve výpočtu zohlednit data pro konkrétní místo a čas měření. Proto :

- sluneční konstanta necht' je $I_0 = 1360 \text{ W/m}^2$
- součinitel znečištění atmosféry $Z = 3$
- zeměpisná šířka (Liberec) $50^\circ 46'$
- nadmořská výška (Liberec – střední) $H = 398 \text{ m.n.m}$
- úhel sklonu osluněné plochy $\alpha = 45^\circ$
- azimutový úhel normály osluněné plochy $a_s = 0^\circ$
- albedo $r = 0,2$
- sluneční deklinace $\delta = 23,45^\circ \sin(\tau - 109^\circ)$
 kde $\tau = 0,98^\circ D + 29,7^\circ M$
 kde D je den v měsíci a M je měsíc v roce

$$\delta = \mathbf{19,69^\circ} \text{ pro } 18.5.2002$$

Výsledkem je $Q_{s \text{ den teor}} = \mathbf{8205,08}$ a zjišťuji, že teoretická hodnota záření dopadajícího na jeden metr čtverečný je o 1,06 % větší než hodnota zjištěná z měření. To je až překvapivě dobrý výsledek, pokud vezmeme v potaz, že výpočetní metoda se jeví jako ne zcela dokonalá.

Zapojení, účinnosti, výkon

Účinnost a výkon

Účinnost a výkon solárního článku jsou dány několika faktory: jednak je určuje typ článku z hlediska technologického a konstrukčního, dalším ovlivňujícím faktorem je závislost výkonu na okolní teplotě, dále pak spektrální složení světla a v neposlední řadě již zmíněná orientace článku vzhledem ke slunci a na dalších faktorech popsanych v předcházejícím oddíle neboli v důsledku na intenzitě dopadajícího záření.

Typy článků z hlediska technologického a konstrukčního

Technologie solárních článků je v dnešní době založena na využívání krystalického křemíku, kdy přidáním různých příměsí z něj vyrábíme dva základní druhy polovodičů s různou koncentrací nosičů náboje, jak bylo podrobněji popsáno výše. Způsoby jeho zpracování a využití v konstrukci nám poskytuje základní dělení.

Existují tři základní druhy fotovoltaických článků z křemíku :

1) články z krystalického křemíku - polykrystalické

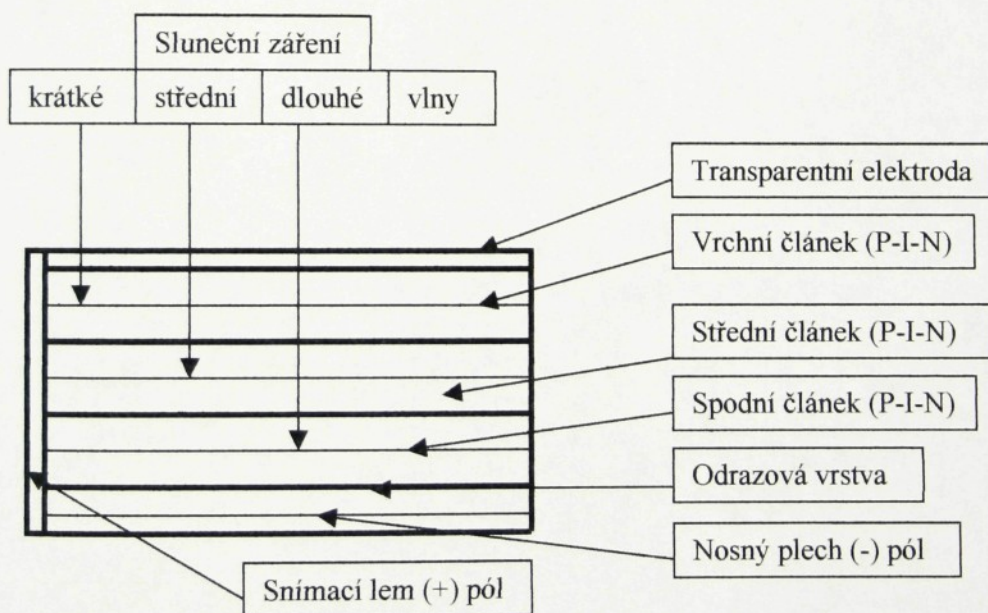
Skládají se z mnoha různě orientovaných multikrystalů litého křemíku. Materiál je levnější a méně energeticky náročný než monokrystalický křemík. Nejčastěji se vyrábějí čtvercové destičky o rozměrech stran 100, 125, 150 mm, jejich tloušťka je 0,3 mm. Účinnost je nižší než u monokrystalických solárních článků a má hodnotu 13 – 15 %. Stejně tak je i větší teplotní závislost (s teplotou klesá výkon) a mají nižší dlouhodobou stabilitu výkonu (kvůli nestabilní hranici zrn).

2) články z krystalického křemíku - monokrystalické

Skládají se z jediného krystalu s pravidelnou krystalickou mřížkou, který se vyrábí nařezáním destiček o tloušťce 0,3 mm z ingotu. Nejčastější rozměry destiček jsou 102 * 102 mm a 125 * 125 mm a mají zaoblené rohy. Účinnost těchto článků je mezi 14,5 a 17 %. Jsou dlouhodobě stabilní a jsou vhodné pro výkonové aplikace. Mají ale vysoké energetické nároky na výrobu vstupního materiálu a tím pádem také vysokou cenu.

3) amorfni tenkovrstvé články

Vyrábí se napařováním vhodně dotovaných polovodičových materiálů na skleněný substrát (používají se i jiné materiály: keramika, plast). Nejčastějšími materiály jsou: amorfni Si, CdTe, CdS a další. Mívají účinnost kolem 9,5 % a mají menší proudové zatížení než předcházející typy článků. Výhodou technologie amorfni článků oproti krystalovým solárním článkům je podstatně menší spotřeba vysoce čistého křemíku a jednodušší a levnější výrobní proces. U nejmodernějších a technologicky nejvyspělejších solárních článků se používá několika článků nad sebou v jednom panelu, kde každý z článků využívá vyšší citlivosti na jinou vlnovou délku slunečního světla od modrého přes zelené až po červené záření a má i vyšší účinnost i bez přímého slunečního osvětlení (**obr. 1**). Systémy z amorfni látek jsou levnější, protože k jejich výrobě se spotřebovává jen 0,5 % energie potřebné k výrobě systémů z krystalického křemíku, konkrétně tento typ trojvrstvého článku má o 20 % vyšší účinnost než běžné systémy z krystalického křemíku a již za 1,8 roku vyrobí energii, která byla do jeho výroby vložena.



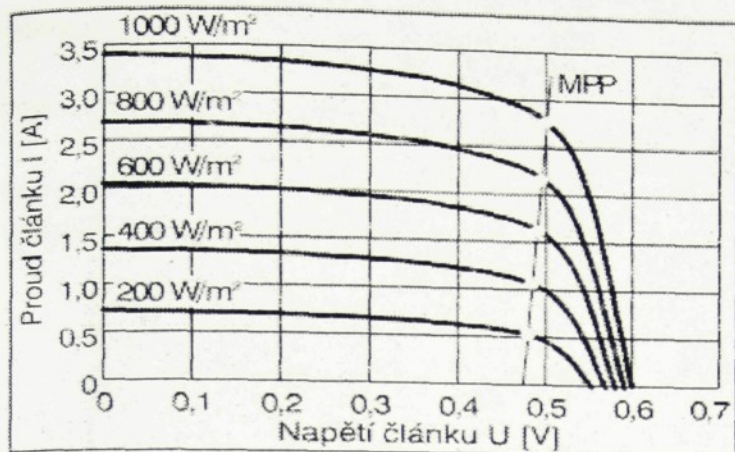
Obr. 1) Uspořádání fotovoltaických článků z amorfniho křemíku

Vliv teploty na výkon solárního článku

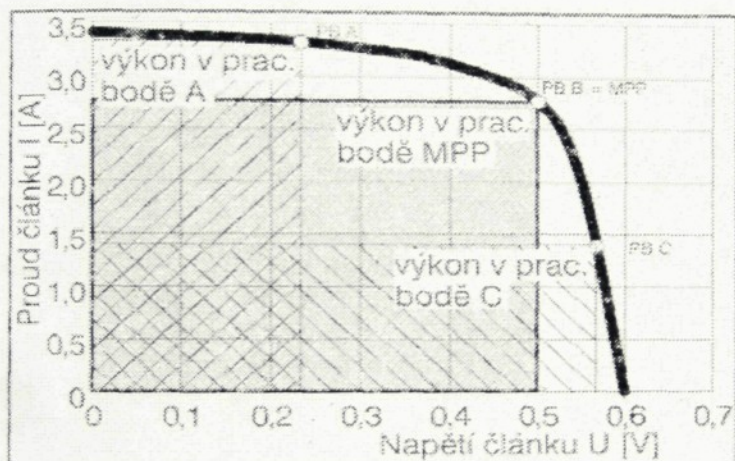
Teplota článku má na napětí a na proud článku protichůdný vliv. Zatímco proud při rostoucí teplotě za jinak stejných podmínek vzrůstá, napětí a výkon při rostoucí teplotě klesá. Typická je změna výkonu o $-0,4\% / ^\circ\text{C}$ (pokles výkonu). To při teplotě zvýšené o $10\text{ }^\circ\text{C}$ nad $25\text{ }^\circ\text{C}$ způsobí pokles výkonu o 4%, při zvýšení teploty o $25\text{ }^\circ\text{C}$ pokles již o 10%. Z tohoto důvodu je výhodné systém chladit a není překvapivé, že v zimních měsících roku, kdy je teplota relativně nízká, může článek produkovat i výkony vyšší, než je jmenovitý výkon článku. V moderních sofistikovaných solárních zařízeních se proto přistupuje ke kombinaci solárního článku a solárního kolektoru, kde kolektor plní funkci ohřevu teplotnosného média a zároveň slouží jako chladič solárního článku a tím zvyšuje jeho výkon. Zajímavým aspektem tohoto konstrukčního přístupu je, že v případě pohonu oběhového čerpadla fotovoltaickým panelem bude mít tento systém i určité autoregulační vlastnosti (pokud slunce svítí a je třeba odvádět teplo z kolektoru, běží i fotovoltaická část a jí poháněné oběhové čerpadlo a naopak).

Výkon solárního článku

Výkon solárního článku se vypočítá jako součin proudu a napětí. Součin je možno interpretovat jako obdélníkovou plochu pod charakteristikou solárního článku vymezenou pracovním bodem. V mnoha případech je pracovní napětí solárního článku stanoveno například připojeným akumulátorem nebo střídačem napětí. Při daném pracovním napětí je možno výsledný proud a tím výkon článku zjistit pomocí křivky charakteristiky. Pro každý solární článek existuje pracovní bod na charakteristice, v němž výkon dosahuje maxima. Tento bod se označuje jako „Maximum Power Point“ (anglicky: bod maximálního výkonu), zkráceně „MPP“. Typické solární články o velikosti $10\times 10\text{ cm}$, popř. $15\times 15\text{ cm}$ vytvářejí při MPP proudy 3 A, popř. 6 A a dosahují tím maximálního výkonu 1,5 W, popř. 3 W. V bodě režimu nakrátko i v bodě naprázdno neodevzdává solární článek žádný výkon (součin proudu a napětí).



Charakteristiky solárního článku při různém ozáření. Předpokládáme, že teplota článku a světelné spektrum jsou u všech měření identické.



Výkon dodávaný solárním článkem v různých pracovních bodech. V pracovních bodech A a C (PB A, PB C) dodává solární článek podstatně menší výkon než v pracovním bodě B. Pracovní bod B (PB B) je bod na charakteristice s největším výkonem, proto je označován jako MPP (Maximum Power Point = bod maximálního výkonu). Toho se snažíme dosáhnout při praktickém využívání.

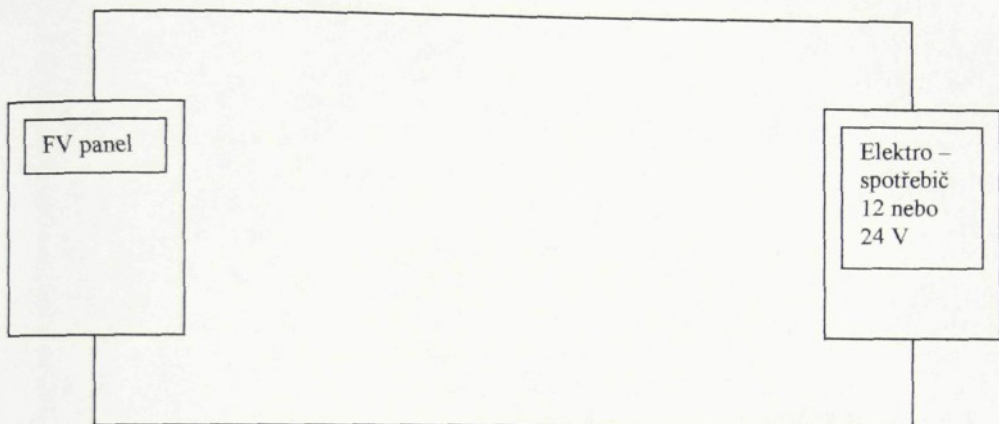
Špičkový výkon článku

Aby bylo možno navzájem porovnávat výkony solárních článků s ohledem na praktické využití, dohodli se vědci a výrobci na standardních zkušebních podmínkách (STC = Standard Test Conditions). Měření výkonu se provádí při ozáření 1000 W/m^2 (přibližně plné sluneční ozáření) při teplotě článku 25°C a veličině AM rovné 1,5 (AM = Air Mass; AM = 1,5 znamená, že složení světla odpovídá slunečnímu světlu po průchodu 1,5násobku tloušťkou zemské atmosféry filtrující světlo). Výkon naměřený za těchto podmínek se nazývá špičkový výkon a má měřicí jednotku Watt peak [Wp]. Pomocí tohoto výkonového údaje je např. v katalogových listech možno mezi sebou porovnávat solární články a moduly.

Možnosti zapojení solárních článků

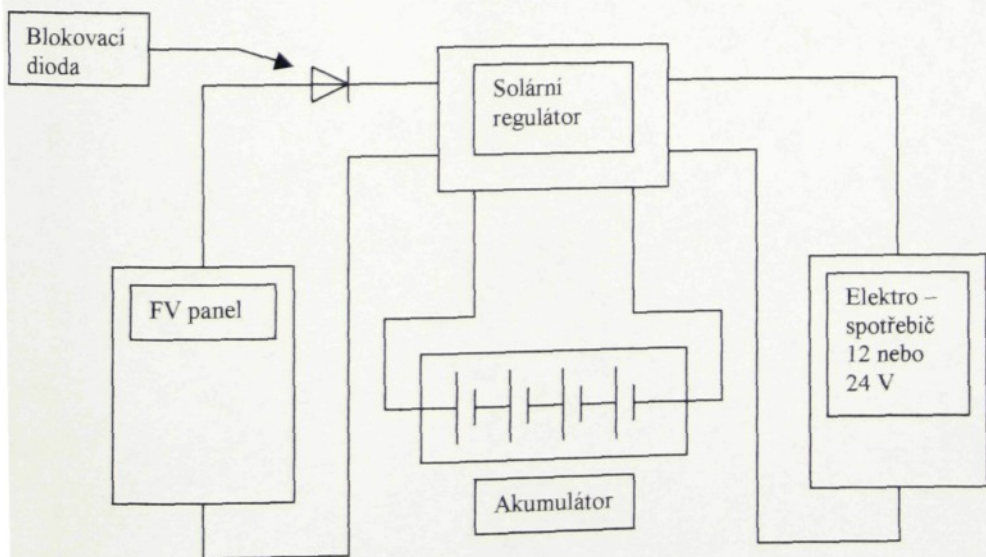
Autonomní systém s přímým napájením

Tento způsob zapojení solárního článku je nejjednodušší možný. Používá se tam, kde nepotřebujeme získanou energii akumulovat a je určen jen pro spotřebiče na 12 nebo na 24 voltů stejnosměrného napětí.



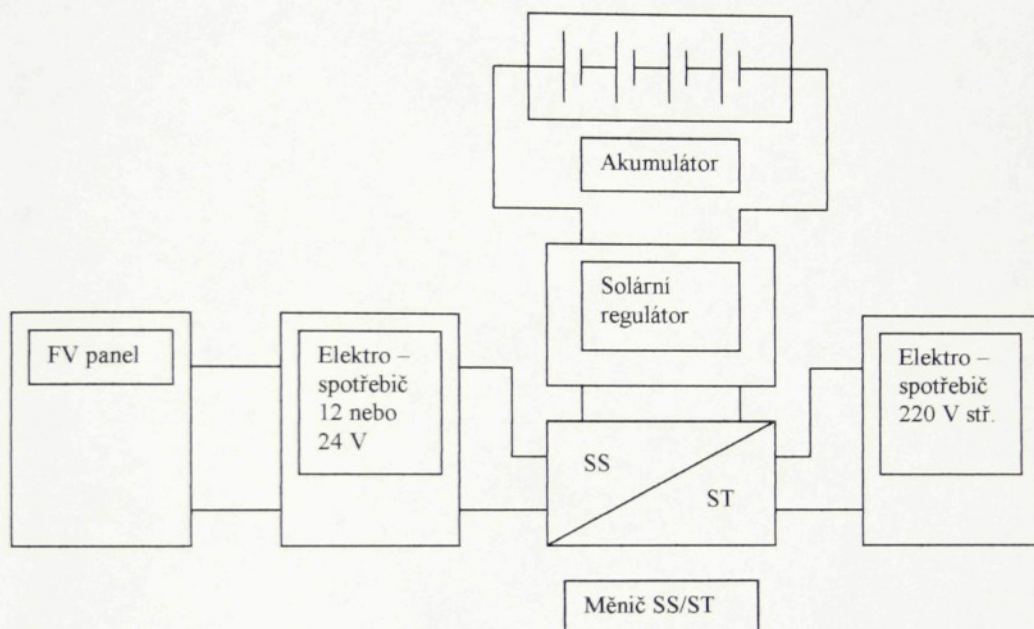
Autonomní systém s akumulací

Zde se jedná o systém, který umožňuje získanou elektrickou energii uchovávat pro pozdější využití. Zapojení solárního regulátoru je nutné proto, aby solární článek pracoval v optimálním nastavení pracovního bodu na voltampérové charakteristice (tzv. MPP) a tím bylo zaručeno, že bude dodávat největší možný výkon. Typickým příkladem použití je nezávislé napájení výtahového automobilu a případné dobíjení jeho baterie.



Hybridní autonomní systém

Tento způsob zapojení nám může sloužit jednak k napájení spotřebičů na 12 nebo 24 V, ale také k napájení běžných přístrojů na 220 V střídavého napětí. K tomu je určeno zařízení nazvané střídač (neboli měnič napětí), který mění napětí ze stejnosměrného na střídavé a zároveň zvyšuje jeho hodnotu na 220V při frekvenci 50 Hz (napětí sítě). Použitelnost tohoto zařízení je zřejmá, jediným jeho omezením je výkon fotovoltaických panelů. Přebytek energie se přes běžný elektroměr může odprodávat do elektrické sítě.



Další možnosti zapojení

Výše uvedené způsoby zapojení jsou nejzákladnější. Dalších modifikací existuje velké množství s ohledem na individuální potřeby té které instalace. Potřebujeme-li zvýšit výkon solárního zařízení, zapojujeme více modulů k sobě. Vznikne nám tak tzv. solární generátor. Jestliže potřebujeme zvýšit proud dodávaný solárním generátorem zapojujeme moduly paralelně, jestliže potřebujeme zvýšit napětí, zapojujeme moduly do série. To samé pravidlo platí i pro samotné zapojení jednotlivých solárních článků do modulů. Články v modulu zapojujeme zpravidla sériově, aby se sečtením napětí jednotlivých článků dosáhlo optimální výstupní napěťové úrovně. Protože však v sériovém zapojení musí být proud tekoucí všemi články stejný, dává celý modul takový proud, jako je vyráběn nejhůře osvětleným článkem.

Ekonomický rozbor

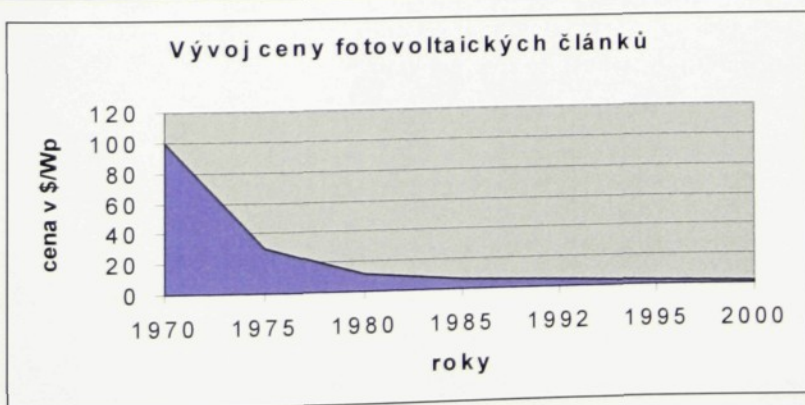
Historie a vývoj ceny solárních článků

První pokusy se solárními zařízeními na principu fotoelektrického jevu se datují už do první poloviny devatenáctého století. V druhé polovině devatenáctého století se poprvé využívalo selenového článku. Teprve v roce 1955 se začal ve fotovoltaice využívat křemík, ale účinnost byla pouze 6 % s cenou okolo 2000 USD/Wp. První opravdové využití solárních článků připadá až na dobu kosmický letů, kdy jako zdroj nezávislé energie bez nutnosti jejího přivádění zvenčí byla tato technologie zvolena jako nejefektivnější a používá se pro tyto účely až na malé výjimky (např. termočlánek napájený z atomového reaktoru) dodnes.

Nárůst celkového instalovaného výkonu solárních panelů ve světě dosahuje v posledních letech 15 až 25 % ročně s výhledem ročního nárůstu 580 MW při instalovaném výkonu do roku 2010 na 1,3 – 3 GW. V roce 1997 byl roční nárůst poprvé vyšší než 100 Mwp. Nejrychleji se rozvíjejícími zeměmi v tomto ohledu jsou nejrozvinutější průmyslové země, nebo země, kde je ze strany jejich vlád velká podpora formou dotací (Itálie – 43% dotace formou odpisu z daní; Španělsko – dotace 35 – 45%; Česká republika dotace až 50% ze Státního fondu životního prostředí atd.). Zeměmi, které se na objemu instalací fotovoltaických systémů podílejí největší měrou jsou : Německo, USA, Rakousko, Řecko, Japonsko atd.

Díky neustálému technologickému vývoji a zaváděním sériovosti výroby, se daří neustále snižovat cenu za solární články vztaženou na Wp podle následující tabulky a grafu.

rok	1970	1975	1980	1985	1992	1995	2000
cena(\$)/Wp	100	30	12	6,75	5	3	2



Kalkulace ceny solárního zařízení

Do ceny solárního kompletu je nutné započítat nejen cenu za solární generátor, ale i cenu za další zařízení, jak je popsáno v předcházející kapitole. Procentuální rozdělení nákladů na jednotlivá zařízení je závislé především na jejich dydenzaci, a proto jsou u následujících zařízení jen přibližné.

Autonomní systém s přímým napájením

V tomto případě se kromě ceny za solární generátor musí ještě započítat cena za instalaci a rozvody. Zde připadá 90% nákladů na generátor a zbylých 10% na ostatní.

Autonomní systém s akumulací

U tohoto zapojení je potřeba k nákladům připočíst jednak cenu za solární regulátor a také cenu za akumulátory (ta závisí především na požadované kapacitě). Přibližné rozdělení nákladů v tomto případě je:

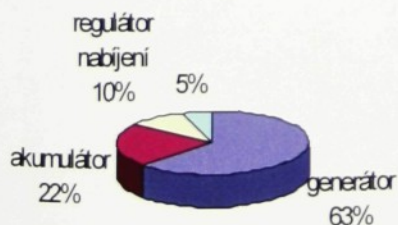
- 63% generátor (cca 150Wp)
- 22% akumulátor (cca 250Ah)
- 10% ostatní (instalace, rozvody)
- 5% regulátor nabíjení

Hybridní autonomní systém

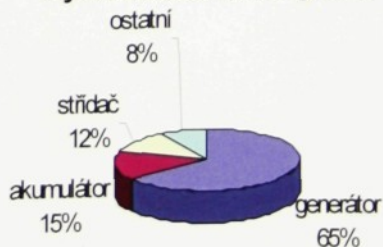
V tomto případě se musí ještě připočíst náklady na střídač (ceny střídačů jsou závislé především na jejich výkonu, ale také třeba na účinnosti přeměny elektrické energie). Přibližné rozdělení nákladů v tomto případě je:

- 65% generátor (cca 1500 Wp)
- 15% akumulátor (cca 2000 Ah)
- 12% střídač (cca 1500 Wp)
- 8% ostatní (instalace, rozvody a regulátor nabíjení)

Autonomní systém s akumulací



Hybridní autonomní systém



Praktický příklad kalkulace ceny fotovoltaické instalace

Vezměme si jako příklad instalaci hybridního autonomního systému bez dodávání přebytku elektrické energie do sítě. Tento přístup volím proto, že výkupní cena energie u nás je velmi nízká, a návratnost investice se prakticky nedá vyjádřit. Ceny jednotlivých zařízení jsou přibližné, protože se neustále mění.

Použiji solární panely SOLARTEC ST72-106 o nominálním napětí 12V proudu 5,34 A a optimálního výkonu 106 W. Sériově zapojím dva kusy, čímž nám proud vzroste na 11,48 A a výkon na 212 W, napětí zůstane stejné. Cena s DPH je 25 206 Kč za panel. Za dva tedy zaplatím 50 412 Kč.

Akumulátor volím SOLARTEC S 82070 s kapacitou 100 Ah a velikosti napětí 12 V. Opět použiji dva kusy jejichž celková cena i s DPH je 7320 Kč.

Dalším nutným komponentem je solární nabíjecí regulátor. Volím typ SOLARTEC morningstar Prostar 20 s cenou 5106 Kč s DPH, který vyhovuje potřebám zapojení a to zejména maximálním vstupním proudem z panelů (12A).

Posledním komponentem systému je střídač. Volím SOLARTEC M200W o výstupním výkonu 200 W. Tvar výstupního napětí je lichoběžníkový, což ho omezuje k použití pro běžné spotřebiče ne však díky výskytu vyšších harmonických složek například pro elektromotory. Jeho cena je 5203 Kč s DPH.

Součet ceny tedy je 68 041 Kč. K ní musím připočítat ještě náklady na instalaci a zapojení odhadem 10% ceny. Výsledná cena je tedy 74 845 Kč.

Jelikož výkon určuje množství různých aspektů, jak je zmíněno výše, pouze odhadnu roční energetický výnos zařízení (jako podklad mi sloužily praktické instalace z literatury) na 160 kWh. Budu-li počítat s dobou životnosti dvaceti let, tak náklady na jednu kWh elektrické energie z tohoto zařízení se budou pohybovat okolo 23 Kč/kWh (se započtením provozních nákladů 1,5% z pořizovací ceny za rok jako je servis atd.).

Tento výsledek je velmi demotivující, ale je důležité si uvědomit, že je možno získat až 50% státní dotaci, která výrazně sníží náklady. Ale i přesto zůstává výsledná cena velmi vysoká, proto je zapotřebí neustále sledovat pohyby cen těchto zařízení a také vývoj v této oblasti, jenž přispívá k neustálému snižování pořizovacích nákladů.

Česká republika má jedny z nejmenších cen elektrické energie ve vyspělém světě. I proto se zdá být cena za jednu kWh ze solárního zařízení velmi vysoká. V případě prodeje přebytků vyrobené elektrické energie do rozvodné sítě by pomohlo výrazné navýšení výkupní ceny z obnovitelných zdrojů.

Návratnost finanční a energetické investice

Finanční návratnost investice do fotovoltaické instalace je závislá především na druhu zvoleného solárního generátoru a jeho výkonu, dále pak na finanční nákladnosti ostatních komponent solárního systému. Proto je velmi složité finanční návratnost stanovit, protože je závislá na technologické náročnosti a dimenzaci systému. Při použití nejmodernějších solárních technologií, může být zhruba 6 až 12 let z životností dvaceti let. Což je v době zmenšujících se zásob fosilních paliv a zvyšování cen energií velmi dobré.

Dalším podstatným faktorem ovlivňujícím návratnost vložených finančních prostředků je také neustálé snižování ceny za Wp a to zejména díky zavádění sériové výroby s přispěním automatizace a také díky neustálému zvyšování technologické úrovně v této oblasti.

Důležitým faktorem, který slouží ke ekologickému pohledu na tuto problematiku, je návratnost energetické investice. To znamená, za jakou dobu provozu fotovoltaického zařízení se vrátí energie vložená do jeho výroby. U moderních článků je to přibližně 1,5 až 2,5 roku.

Osvěta a dotace

Jedním z nejdůležitějších a nejpotřebnějších impulsů, které nás alespoň přinutí k úvahám o alternativních zdrojích energie obecně, je osvěta. A to osvěta v nejrůznějších formách. Ať už jde o články v odborné literatuře, médiích, šíření ústním podáním nebo prezentace firem na výstavách a veletrzích, jejich společným jmenovatelem je potřeba zasáhnout co možná největšího okruhu potenciálních budoucích uživatelů těchto technologií.

V dnešní době, kdy je tato technologie již velmi dobře probádanou problematikou s poměrně slušnou technologickou a výrobní základnou je nutné těmito formami osvěty přimět občany, ale i vlády jednotlivých zemí k alespoň kladnému postoji k této technologii. V poslední době neustálého zvyšování cen energií se tato technologie začíná jevit jako velice investičně zajímavá. Což je pro většinu obyvatelstva hlavním faktorem ovlivňujícím jejich rozhodování při nákupu energetických zařízení.

Velkým motivačním faktorem pro nákup solárních technologií jsou státní dotace. Česká republika se v této oblasti může pyšnit velmi kvalitní pobídkou od Státního fondu životního prostředí, který v současné době poskytuje až 50%ní dotaci na vybudování solárního zařízení.

Dalšími možnými motivátory by mohlo být například zavedení daně z každé kilowathodiny 'špinavé' energie tzv. zelený halír nebo snížení sazby DPH na pořízení solárního zařízení nebo výrazné zvýšení výkupní ceny energie z obnovitelných zdrojů a tak dále.

Moderní trendy ve fotovoltaice – výhled do budoucna

Neustálým zvyšováním technologické úrovně ve fotovoltaice a díky přispění hromadné výroby se na trhu objevují stále kvalitnější, technologicky vyspělejší a cenově dostupnější výrobky. Tento trend proto oslovuje stále více potenciálních uživatelů.

Příkladem jsou už zmiňované fotovoltaické články z amorfního křemíku od firmy THYSSEN – Solartec. Jejichž celková cena 21690 EUR za materiál i montáž 50 m² při výkonu 2,3 kW i z dotacemi od státních, ale i jiných organizací, je stále velmi vysoká. Ale právě jen kvůli tomu, že se jedná o nejnovější technologii, u níž se musí nejprve zaplatit výzkum a vývoj a zavést hromadnost výroby rukou v ruce s konkurencí. I přes to všechno je u konkrétně této technologie návratnost investice něco okolo deseti let bez započtení zvyšujících se cen energií (mimo to se tyto panely montují místo střešní krytiny, což představuje další úsporu financí). Což už je při garantované životnosti zařízení dvaceti let poměrně zajímavá investice.

Dalším možným příkladem je výzkum a zkušební testy zařízení, které kombinuje solární článek se solárním kolektorem, kdy účinnost obou těchto prvků se sčítá a přesahuje 50% využití energie dopadajícího záření. Navíc má tento hybrid i určité autoregulační vlastnosti při použití solárního článku jako zdroje elektrické energie pro pohon oběhového čerpadla solárního kolektoru. Když slunce svítí, pohání proud článku čerpadlo, a to prostřednictvím teplosnosného média odebírá větší množství tepelné energie vzniklé v kolektoru než by tomu bylo při menší intenzitě záření, a opačně.

V budoucnu se vývoj solárních zařízení bude pravděpodobně ubírat směrem k výzkumu nových materiálů a jejich možných kombinací. S přihlédnutím na jejich snadnou zpracovatelnost, láci a dobrou dostupnost.