

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC
TECHNOLOGY

MONITORING PROVOZU FOTOVOLTAICKÉ ELEKTRÁRNY

MONITORING OF THE PHOTOVOLTAIC POWER PLANT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

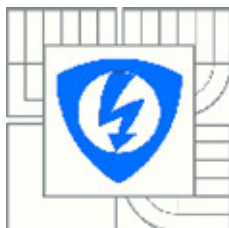
VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

MARTIN STŘÍPEK

Ing. JAN DOLENSKÝ

BRNO 2010



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav elektrotechnologie

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Mikroelektronika a technologie

Student: Martin Střípek

Ročník: 3

ID: 98539

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Monitoring provozu fotovoltaické elektrárny

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s praktickým provozem fotovoltaické elektrárny o výkonu 249 kWp. Proved'te rozbor různých typů fotovoltaických elektráren (on-grid, ostrovní systém, hybridní, atd.). Vytvořte teoretický model pro výpočet výkonu sledované elektrárny dle dostupných zdrojů. Výsledná data porovnejte s reálnými daty dle výroby, vyhodnoďte odchylky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 3.6.2010

Vedoucí práce: Ing. Jan Dolenský

prof. Ing. Radimír Vrba, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT Bakalářská práce pojednává o teoretických poznatcích Fotovoltaiky. Největší výhodou pro získávání energie je v dlouhé době nevyčerpatelný zdroj Slunce. Tento pohled je důležitý v době, kdy se stále více zemí stávají energeticky závislými a kdy může dojít k vyčerpání fosilních paliv. Práce má seznámit s principem fotovoltaiky a jejím praktickém využití pro fotovoltaické elektrárny. Praktická část je zaměřená na monitoring provozu fotovoltaické elektrárny. Vyhodnocuje se okamžitý střídavý výkon, celková energie dodávaná do sítě a porovnává se s teoretickými hodnotami. Bakalářská práce by měla pomoci při zjišťování chyb, které mohou vést k energetickým ztrátám.

ABSTRACT This Bachelor work is dealing with theoretical knowledge of Photovoltaic. One of the great advantage of Photovoltaic is inexhaustible resource in long-time period – The Sun. This approach is especially important in today's world when more and more countries are becoming energetically dependent and may run out of fossil fuels. Bachelor work shall introduce the principle of Photovoltaic, its practical use for photovoltaic power stations, further its classification and types of constructions. The practical part is focused on monitoring the operation of photovoltaic power. Evaluate the instantaneous AC power, the total energy supplied to the network and compared with theoretical values. Bachelor thesis should help in detecting errors that can lead to energy losses.

Klíčová slova: fotovoltaika, fotovoltaická elektrárna, solární panel, výkon, monitoring, PVE

Keywords: photovoltaics, photovoltaic power plant, solar panel, power, monitoring, PVE

Bibliografické citace

STŘÍPEK, M. *Monitoring provozu fotovoltaické elektrárny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 47 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Dolenský.

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 1.6.2010

.....

Poděkování:

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Dolenskému za metodické a cíleně orientované vedení při plnění úkolů realizovaných v průběhu zpracovávání bakalářské práce. Dále děkuji spolupracující firmě ERD a.s., za poskytnutí dat.

Rád bych také poděkoval svým rodičům za podporu během studia.

OBSAH

ÚVOD	7
1. TEORETICKÁ ČÁST.....	8
1.1. Fyzikální podstata světla.....	8
1.2. Slunce.....	9
1.3. Fyzikální podstata fotovoltaické přeměny energie	11
1.4. Konstrukce a výroba fotovoltaických článků a panelů	15
1.5. Vývoj fotovoltaických článků:.....	17
1.5.1. Vícevrstvé články	17
1.5.2. Koncentrátorové články.....	18
1.5.3. Nové a teoretické koncepty	18
1.6. Fotovoltaické panely	19
2. PRAKTICKÉ VYUŽITÍ PV	21
2.1. Solární elektrárny	21
2.2. Fotovoltaické systémy	21
2.2.1. Drobné aplikace	21
2.2.2. Ostrovní systémy (off-grid)	21
2.2.3. Síťové systémy (on-grid).....	24
2.3. Fotovoltaické systémy s pevným a pohyblivým stojanem	25
2.3.1. Fotovoltaické systémy s pevným stojanem	25
2.3.2. Fotovoltaické systémy s pohyblivým stojanem.....	25
2.3.3. Možnosti navýšení množství vyrobené energie.....	27
2.4. Ekonomika PVE.....	28
3. PRAKTICKÁ ČÁST – MONITORING PROVOZU PVE.....	29
3.1. Elektrárna se skládá z těchto částí:	29
3.1.1. Rozvaděč RH1	29
3.1.2. Transformátor	30
3.1.3. Měnič napětí	30
3.2. Střídač	30
3.2.1. Účinnost:.....	30
3.2.2. Rozsah MPP:	31
3.2.3. Účinnost přizpůsobení MPP:	32
3.2.4. Střídač s transformátorem.....	32
3.2.5. Koncepce využívající větší počet výkonových dílů.	33

3.2.6.	Sběr a analýza dat	33
3.2.7.	Chlazení a řízení teploty:	33
3.3.	Výpočty teoretických hodnot:	34
3.3.1.	Teoretická maximální účinnost článku je dána vztahem:	34
3.3.2.	Výpočet teoretické hodnoty výkonu:	35
3.4.	Úprava dat pomocí programu vytvořeného v Microsoft Visual C# 2008 Express Edition	36
3.5.	Naměřené a teoretické hodnoty v grafech:	36
ZÁVĚR		40
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY		42
SEZNAM OBRÁZKŮ		43
SEZNAM TABULEK		44
SEZNAM PŘÍLOH		45

ÚVOD

Fotovoltaika dnes celosvětově patří mezi nejvíce se rozvíjející technologie pro získávání elektrické energie. Z hlediska životního prostředí se jedná o nejčistší a nejšetrnější způsob výroby energie. Největší výhodou tohoto způsobu získávání energie je v dlouhé době nevyčerpatelný zdroj Slunce. Nejde jen o zajímavou technologii, ale i o vyspělé průmyslové odvětví. U nás i ve světě vznikají další a další solární elektrárny, díky kterým vznikají nová pracovní místa. Mnohé vyspělé země tuto skutečnost pochopily, včetně zemí Evropské unie, a snaží se fotovoltaiku podporovat. Toto hledisko je důležité v době, kdy se stále více zemí stává energeticky závislými a kdy může dojít k energetické krizi a hlavně k vyčerpání fosilních paliv. I přes zatím vysokou pořizovací cenu je tato technologie jednou z dostupných řešení jako všeobecný zdroj energie.

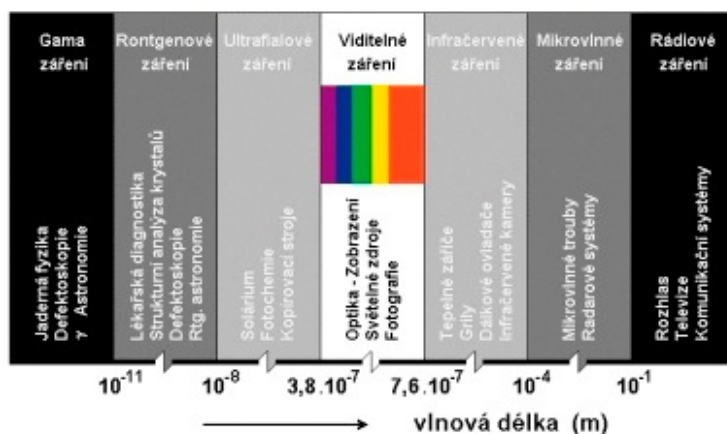
Cílem bakalářské práce je seznámení s různými typy fotovoltaických elektráren. Vytvoření teoretického modelu pro výpočet teoretické hodnoty, která slouží k porovnávání se skutečnými hodnotami získaných z elektrárny. Vypočítané a teoretické hodnoty se porovnávají v tabulkách a grafech.

1. TEORETICKÁ ČÁST

1.1. Fyzikální podstata světla

Světlo je dnes chápáno jako úplná samozřejmost a nad jeho fyzikální podstatou dnes už nikdo nepřemýšlí. V roce 1678 předložil Christian Huighens (1629 – 1695) pojednání o povaze světla jako podélného vlnění. Issac Newton (1643 – 1727) ale považoval světlo za tok částic. Teprve v 19. století nastal velký rozvoj vlnové teorie, podpořený vědeckými objevy v oboru elektřiny a magnetismu.

Vlnové délky elektromagnetických vln (elektromagnetického záření) mohou být ve velmi širokém rozmezí od řádu 10^{-13} m i kratších až po stovky či tisíce metrů nebo i delší. Z toho viditelné záření tvoří jen úzkou oblast v intervalu vlnových délek $\lambda \in <380 \text{ nm}; 760 \text{ nm}>$ a každá vlnová délka odpovídá určité barvě. S prodlužující se vlnovou délkou v tomto intervalu barvy postupně přecházejí od fialové, přes modrou, zelenou a žlutou, až k červené. Sluneční světlo je vnímáno jako bílé, protože je složeno ze spojitého spektra všech barev. Na obr. 1 je vidět rozložení elektromagnetického záření.



Obrázek 1 Oblasti spektra elektromagnetického záření [1]

Zajímavou vlastností elektromagnetických vln je jejich dualistický charakter. Chovají se současně jako vlny i jako částice. Vlnový charakter převládá u záření s delší vlnovou délkou, korpuskulární (částicový charakter) převládá u záření s kratší vlnovou délkou. V elektromagnetické vlně energie není rozdělena spojitě, ale je soustředěna v jakýchsi shlucích – kvantech, které jsou chápány jako kvazičástice, tj. částice s nulovou klidovou hmotností. Z tohoto hlediska má světlo také povahu částicovou a mluví se o vlnově

částicovém dualismu. [2] V důsledku vlnového charakteru podléhají elektromagnetické vlny všem zákonitostem vlnění (zákon odrazu a lomu světla atd.) Důsledkem částicového charakteru jsou projevy spadající do oboru kvantové mechaniky.

Záření se projevuje jako tok částic, nebo lépe řečeno kvazičástic, zvaných fotony.

Podle frekvence příslušné elektromagnetické vlny mají fotony energii

$$E = h \cdot \nu, \quad (1)$$

kde ν je frekvence a h je Planckova konstanta ($h = 6,626176 \cdot 10^{-34} [J \cdot s]$). Vlnová délka je nepřímo úměrná frekvenci a přímo úměrná době kmitu podle vztahu

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = c \cdot T. \quad (2)$$

1.2. Slunce

Nejbližší hvězdou Zemi je Slunce. Střední vzdálenost od Země je 149 600 000 km. Je centrem naší sluneční soustavy. Slunce je koule plazmatu, která svou energii vyzařuje ve všech oblastech elektromagnetického záření do svého okolí.

Lidstvo se snaží, co nejlépe využít a získat maximum energie dopadající na Zemi. Množství energie, které dopadne na naši planetu je asi 179 000 TW/rok viz vzorec (6).

Výkon vyzařovaný ze Slunce je relativně stabilní, jen mírně kolísá v závislosti na momentální sluneční aktivitě ve zhruba jedenáctiletých cyklech. Vlnová délka λ^* příslušející maximální hodnotě vyzařování povrchu Slunce při dané teplotě se nachází v blízkosti hodnoty $\lambda^* \approx 550 \text{ nm}$. Provedeme-li aproximaci záření povrchu Slunce na záření černého tělesa, z Wienova zákona

$$\lambda^* \cdot T_s = b \quad (3)$$

vychází teplota povrchu Slunce $T_s \approx 5800 \text{ K}$, b je Wienova konstanta. Vyzařování M_e pro černé těleso závisí na teplotě vztahem

$$M_e = \sigma \cdot T^4, \quad (4)$$

kde σ je Stefanova – Boltzmanova konstanta ($\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$), takže pro teplotu $T_s \approx 5800 \text{ K}$ dostaneme $M_e \approx 6,42 \cdot 10^7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Výkon přenášený zářením z povrchu Slunce je

$$P_s = M_e \cdot 4 \cdot \pi \cdot r_s^2, \quad (5)$$

kde $r_s \approx 6,96 \cdot 10^8 \text{ m}$ je poloměr Slunce. Nabývá hodnoty $P_s \approx 3,91 \cdot 10^{26} \text{ W}$. Pouze část ΔP_s výkonu přenášeného zářením z povrchu Slunce dopadá na povrch Země. Uvážíme-li střední vzdálenost Země od Slunce $R_{sz} \approx 1,49 \cdot 10^{11} \text{ m}$ a poloměr Země $r_z \approx 6,37 \cdot 10^6 \text{ m}$, dostaneme

$$\Delta P_s = \frac{\pi \cdot r_z^2}{4 \cdot \pi \cdot R_{sz}^2} \cdot P_s \approx 1,79 \cdot 10^{17} \text{ W}. \quad (6)$$

Střední hodnota energie slunečního záření dopadajícího za jeden den na Zemi je

$$W_z = \Delta P_s \cdot t \approx 1,79 \cdot 10^{17} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 86400 \text{ s} = 1,55 \cdot 10^{22} \text{ J} \quad (7)$$

Střední intenzita záření dopadajícího na jednotku plochy Země je

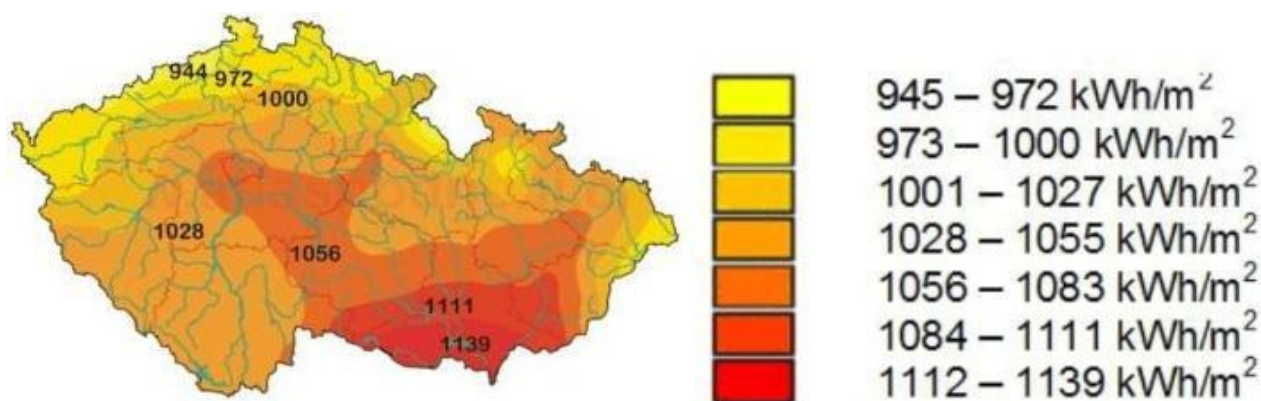
$$I = \frac{\Delta P_s}{\pi \cdot r_z^2} \approx 1367 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \quad (8)$$

(nad zemskou atmosférou) a tato hodnota se nazývá solární konstanta. Na povrch Země tedy dopadá o něco méně energie v závislosti na zeměpisné šířce, meteorologických podmínkách a denní a roční době. Maximální intenzita záření na povrchu Země je zhruba $I_{\max} = 1100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ a dopadající energii lze transformovat ve fototermických kolektorech na tepelnou energii nebo ve fotovoltaických (PV) kolektorech na elektrickou energii. [2]

Pokud je Slunce přímo v zenitu, ve výšce devadesáti stupňů, prochází sluneční záření nejmenší možnou vrstvou vzduchu. Takové spektrum se označuje jako AM1. Většinu doby ale Slunce nebývá tak vysoko a sluneční záření proto musí procházet větší či menší vrstvou atmosféry. Pro fotovoltaiku se proto používá spektrum AM1.5, odpovídající výšce Slunce přibližně 45° nad obzorem. Sluneční záření v tomto případě prochází jeden a půl násobně mohutnější vrstvou vzduchu.

V České republice je solární energie ovlivněna mnoha faktory. Mezi ně patří zeměpisná šířka, roční období, oblačnost, geografická poloha, sklon plochy, na kterou sluneční energie dopadá atd. Lokality se obvykle od sebe liší v průměru o +/- 10% v územích, kde je velmi silné znečištění atmosféry nebo v oblastech s vysokým výskytem inverzí je nutné počítat s poklesem slunečního záření o 5-10%. [3]

V České republice dopadne na 1m² vodorovné plochy zhruba 950 – 1340 kWh energie. Roční množství slunečních hodin se pohybuje v rozmezí 1331 – 1844 hod (ČHMÚ), odborná literatura uvádí jako průměrné rozmezí 1600 – 2100 hod. Z hlediska praktického využití pak platí, že z jedné instalované kilowaty běžného systému (FV články z monokrystalického, popř. multikrystalického křemíku, běžná účinnost střídačů apod.) lze za rok získat v průměru 800 – 1100 kWh elektrické energie. [4]



Obrázek 2 Sluneční záření v ČR – kWh/m² (dopad na vodorovnou plochu) [4]

1.3. Fyzikální podstata fotovoltaické přeměny energie

K přeměně fotovoltaické energie z elektromagnetického záření na elektrickou energii dochází v polovodičových fotovoltaických (PV) článcích. Nejpoužívanější jsou PV články na bázi křemíku.

Polovodiče se dělí podle typu nosiče na vlastní (intrinsické) a příměsové. Polovodiče příměsové mohou být dále typu N (majoritními nosiči náboje jsou elektrony) nebo typu P (majoritními nosiči náboje jsou díry, které se chovají jako částice s kladným nábojem).

Křemík (Si) obsahuje 14 elektronů, má krystalovou strukturu diamantu. Proto je každý atom obklopen čtyřmi nejbližšími sousedními elektrony. Poslední čtyři elektrony (valenční) vytvářejí s těmito sousedními elektrony kovalentní vazby. [2][5] Volný elektron, který nepodléhá působení žádných sil, může nabývat různých hodnot. Ale energie v krystalu křemíku v důsledku pohybu v poli periodického potenciálu může nabývat libovolných hodnot. Tyto hladiny energie jsou děleny na pásy „dovolených energií“ a ty jsou od sebe odděleny „pásky zakázaných energií“.

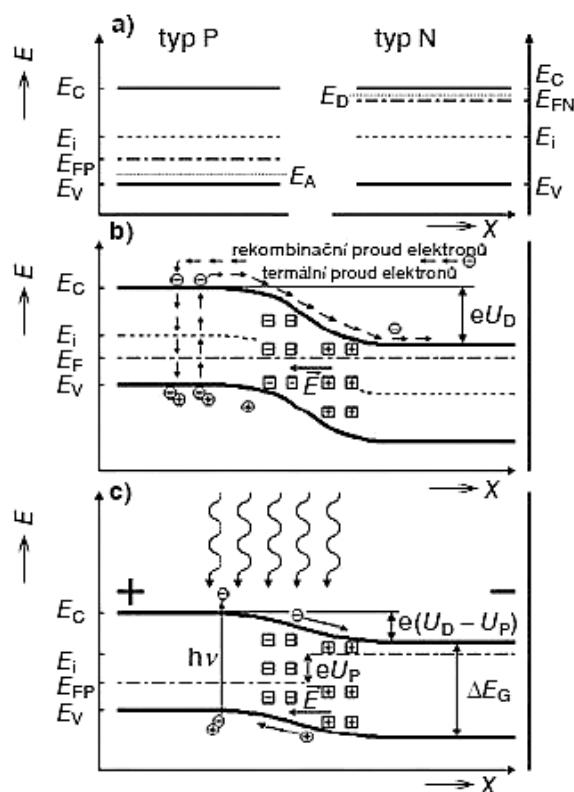
Nejvyšší energetická hladina valenčního pásu se značí E_V a nejnižší hladinu vodivostního pásu značíme E_C . Šířka zakázaného pásu je pak $E_G = E_C - E_V$. Významnou energetickou hladinou je Fermiho energie E_F . U vlastního polovodiče leží hladina Fermiho energie uprostřed zakázaného pásu. Obsazené hladiny ve valenčním pásu valenčními elektrony způsobí, že nemůže protékat elektrický proud. Pokud se dodá energie např. tepelná (fonon) nebo světelná (foton), některé elektrony přejdou do vodivostního pásu. To vede k tomu, že valenční i vodivostní pás se stanou pásy částečně obsazenými.

V energetickém schématu se to projeví tak, že tento elektron uvolní energetickou hladinu ve valenčním pásu a obsadí hladinu s vyšší energií ve vodivostním pásu. U atomu křemíku tak vzniklo prázdné místo po pevně vázaném elektronu. Buď zde může opět uvíznout volný elektron, což se v energetickém schématu projeví jako zpětný přestup elektronu z vodivostního pásu na příslušnou hladinu ve valenčním pásu, nebo sem může přeskočit pevně vázaný elektron od sousedního atomu. Takový elektron musí mít dostatek energie, aby překonal určitou energetickou bariéru. Tím se ale volné místo posune k sousednímu atomu a dalšími podobnými přeskoky se může dále posouvat. V elektrickém poli se volné i přeskakující vázané elektrony posunují proti směru intenzity elektrického pole, neboť mají záporný elektrický náboj. To znamená, že prázdné místo se posunuje ve směru pole. Prázdné místo se tedy chová jako částice s kladným nábojem a větší hmotností, než jakou má volný elektron. Tato částice se označuje „díra“.[5]

Pokud nahradíme některé krystaly v křemíku atomy prvku 5. skupiny periodické tabulky (As, P, Sb), které obsahují pět valenčních elektronů, tak budou čtyři z nich vázány kovalentní vazbou s nejbližšími atomy křemíku. Zbývajících pět bude pouze slabě vázán k atomu příměsi. Vzniklý polovodič, který je takto dopován, je nazýván polovodičem typu N (negative). V případě, že nahradíme některé atomy křemíku v krystalu 3. skupiny periodické

tabulky prvků (B, Al, Ga), které mají 3 valenční elektrony. To znamená, že jedna vazba těchto atomů nebude zaplněna a bude se chovat jako díra. Takový polovodič se nazývá polovodič typ P (positive) a příměsi, které tvoří záchytná centra, se nazývají akceptory.

Přechod PN vzniká tak, že jedna část krystalu je dopována jako polovodič typu P a sousední část je dopována jako polovodič typu N. V místě přechodu část volných elektronů přejde z oblasti N do oblasti typu P a část děr opačně. Pevně vázané náboje ionizovaných příměsí vytvoří oblasti prostorového náboje. [5]. Vytvoří se mezi nimi elektrické pole, které zabraňuje dalšímu toku volných nosičů. Jelikož musí být energie Fermiho hladiny v rovnovážném stavu v celém krystalu a to vede k ohybu pásů v místě přechodu. Při teplotě $T > 0$ K stále dochází ke generaci a rekombinaci elektronů a děr a to znamená, že přes přechod PN tečou elektrické proudy oběma směry. V polovodiči typu N mohou některé elektrony mít vyšší energii, než jaká odpovídá potenciálové bariéře difusního napětí U_D . Elektrony pak mohou přecházet přes přechod PN do polovodiče typu P, kde rekombinují s volnými dírami. Proud, který takto vznikne, se nazývá rekombinační. V polovodiči typu P dochází zároveň ke generaci párů volných elektronů a děr, kde elektrony, které jsou volné v elektrickém poli přechodu PN urychleny směrem do polovodiče typu N. Tento proud se nazývá termální nebo difuzní. Pokud se nepřiloží vnější napětí, tak jsou proudy v obou směrech vyrovnány a navenek se neprojeví. Po přiložení vnějšího napětí a uzavření elektrického obvodu dochází k porušení rovnováhy.



Obrázek 3 Model energetických hladin PV článku a fotovoltaické přeměny energie [5]

K přeměně fotovoltaické energie dochází v polovodičových fotovoltaických člancích. Energie dopadajících fotonů se mění na elektrickou. Jde v podstatě o velkoplošnou diodu, kde přechod PN je orientován kolmo k čelní ploše mezi přední a zadní stranou [2]. Jestliže na fotovoltaický článek dopadají fotony, které mají větší energii, než jaká odpovídá šířce zakázaného pásu (Si 1,1 eV), pak tyto fotony generují páry elektron-díra. Tímto způsobem odevzdávají svou energii a dochází k toku částic. Přebytek energie se předá kmitům mřížky a přemění se v teplo. To má za následek ohřev materiálu polovodiče. V oblasti přechodu PN generované páry elektron-díra jsou od sebe odděleny elektrickým polem $\vec{E}$ mezi vázanými prostorovými náboji. To znamená, že díry jsou urychleny ve směru elektrického pole a elektrony jsou urychleny v opačném směru. Elektrické napětí se objeví mezi opačnými póly PV článku. Připojením do elektrického obvodu teče obvodem stejnosměrný proud a PV článek se stává zdrojem elektrické energie.

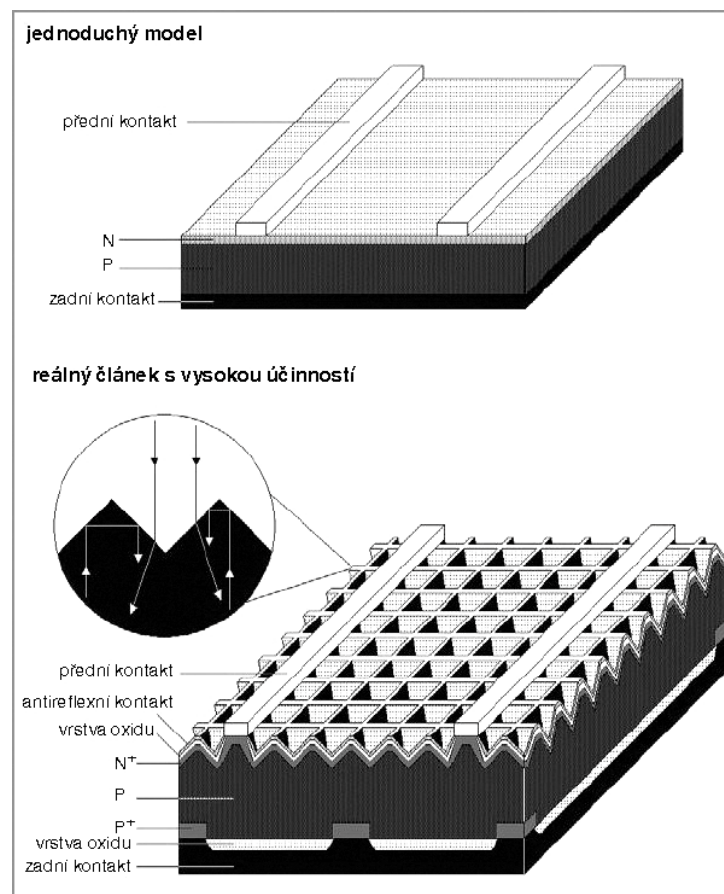
Na obrázku 3a je schéma energetických hladin v polovodiči typu P a typu N a z obr. 3b je zřejmé vyrovnání Fermiho energie a ohyb pásů u přechodu PN v neosvětleném fotovoltaickém článku. Jsou zde znázorněny i rekombinační a termální proudy v rovnovážném stavu a rovněž jsou vyznačeny oblasti prostorového náboje a difuzní napětí

U_D . Ve tmě se PV článek chová jako polovodičová dioda. Na obr. 3c je znázorněna situace při osvětlení PV článku, který není zapojen v elektrickém obvodu. [5]

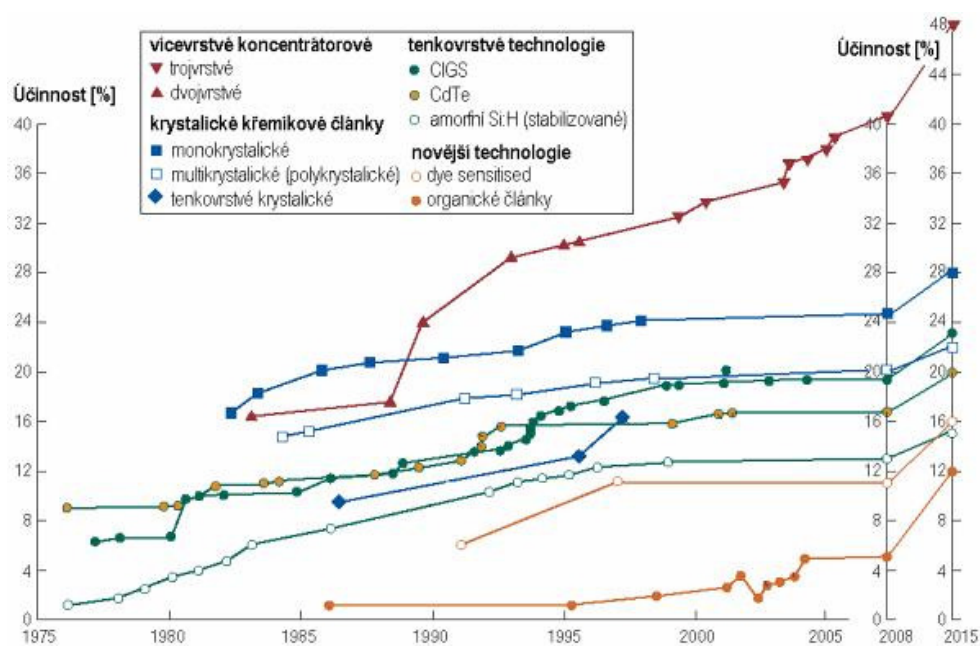
1.4.Konstrukce a výroba fotovoltaičských článků a panelů

V současné době se pro výrobu PV článků (monokrystalické, polykrystalické a amorfni na bázi tenkých vrstev) používá hlavně křemík. V zemské kůře je nejrozšířenějším prvkem. Z těchto důvodů je relativně levný, dostupný, není jedovatý a je nejvíce prozkoumaným polovodičem (za určitých podmínek se může chovat jako izolant anebo jako vodič).

Na obr. 4 je schéma PV článku. Obr. 4a zobrazuje jednoduchý model. Má nižší účinnost v důsledku rekombinačních ztrát. Aby bylo dosaženo vyšší účinnosti je PV článek opatřen antireflexní vrstvou. Do nevodivé vrstvy oxidu se chemicky pasivuje povrch a pouze v určitých místech se vrstva proleptá. A jen zde se pak odvádí elektrický náboj. Přední struktura, která je vyleptána do těchto malých jehlanů způsobí, že fotony snadno vstupují do PV článku. Některé projdou bez toho, aby vyvolaly fotovoltaičskou přeměnu, tak se odrazí od zadní elektrody. Na přední straně článku nemohou vystoupit ven a jsou zase totálním odrazem vráceny zpět.



Obrázek 4 Schéma polovodičového fotovoltaického článku [5]



Obrázek 5 Nejlepší účinnosti experimentálních článků, cíle do roku 2015 [6]

1.5. Vývoj fotovoltaických článků:

Účinnost prvních PV článků byla pod 1%. První článek, který mohl být použit k výrobě elektřiny, byl vyroben v roce 1954 s účinností 6%. Vývoj účinností jednotlivých technologií je na obrázku 5.

První generace patří mezi nejrozšířenější technologie. Jsou tvořeny krystalickými křemíkovými deskami. Vyznačují se dobrou účinností a dlouhodobou stabilitou výkonu. Nevýhodou je velká spotřeba křemíku a vyšší nároky na spotřebu energie. Přesto však budou ještě dlouho na trhu dominovat.

Druhá generace vznikla, aby se odstranily nedostatky první generace. To znamená, snížení výrobních nákladů úsporou drahého materiálu křemíku. Vyznačují se 100-1000 krát tenčí aktivní absorbující polovodičovou vrstvou - thin-film. Dochází k velmi velké úspoře materiálu. Sem se řadí většina typů tenkovrstvých článků. Jsou to články z amorfního a mikrokrytalického křemíku, CdTe (kadmium-telur) a také směsné polovodiče z materiálu Cu, In, Ga, S, Se., CIS (měď-indium-selen), CIGS (měď-indium-galium-selen), a-Si (amorfni křemík). V současnosti jsou připravovány k výrobě další typy - články se světlocitlivými barvivy (Dye-sensitised) a články s organickými polymery (Organic Polymer). Mají velkou výhodu a to, že mohou být nanесeny téměř na jakýkoliv substrát (ohebná fólie – sdílí její pružnost). Nevýhodou je nižší účinnost a to pod 10%.

Třetí generace navazuje na druhou generaci a hlavním cílem je získat maximální počet absorbovaných fotonů a následně generovaných párů – elektron- díra (proudový zisk) a maximální energie dopadajících fotonů (napětový zisk). V současné době se pracuje na různých technologiích, jak toho dosáhnout. Mezi nejpokročilejší patří vícevrstvé články a koncentrátorové články.

1.5.1. Vícevrstvé články

Jedním, z dnes dobře fungujících článků třetí generace, jsou vícevrstvé struktury, dvojvrstvé – tzv. tandemy a trojvrstvé články, kde každá sub-struktura (p-i-n) pohlcuje určitou část spektra a tím se maximalizuje energetická využitelnost fotonů.

Důkazem tandemového solárního článku je struktura skládající se z p-i-n přechodu amorfního (hydrogenovaného) křemíku (a-Si:H) a p-i-n přechodu mikrokrytalického (hydrogenovaného) křemíku (μ c-Si:H). Amorfni křemík má vysokou absorpci v oblasti

modré, zelené a žluté části spektra, mikrokrystalický křemík pak dobře absorbuje i v oblasti červené a infračervené. Ten může být nahrazen i slitinou křemíku s germániem a podle zvoleného poměru obou materiálů se dají měnit jejich optické i elektrické vlastnosti. Těchto materiálů se využívá komerčně hlavně pro trojvrstvé solární články, kde dva spodní články jsou vyrobeny s různou koncentrací Si a Ge. Zásadní podmínkou pro dobrou funkci vícevrstevných článků je, aby každý z článků generoval stejný proud. V opačném případě se snižuje účinnost. Výsledné napětí je pak dané součtem obou (příp. všech) článků. [7]

1.5.2. *Koncentrátorové články*

Druhým novějším typem jsou koncentrátorové články. Využívají pouze přímé sluneční záření. Difuzní záření, jehož podíl je v České republice přes 50 %, využít nelze.

Sluneční světlo se v těchto článcích koncentruje na 1600 násobek své běžné intenzity, a pak je proměněno na elektrický proud ve vysoce účinných fotovoltaických článcích s účinností 37%. Pro odvod tepla byla vyvinuta speciální technologie.

1.5.3. *Nové a teoretické koncepty*

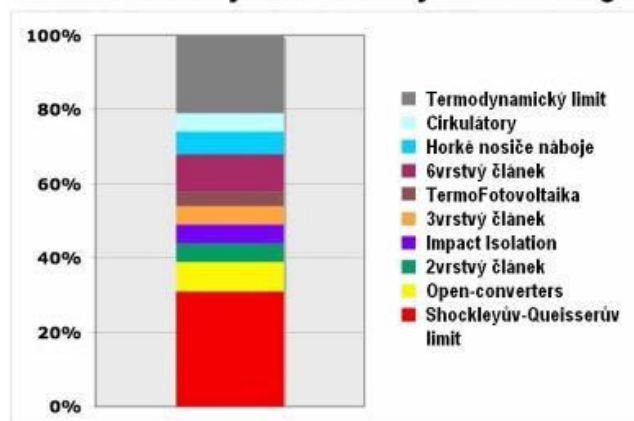
V současnosti se pracuje na nových technologiích, které by do budoucna měly zabezpečit výrazné zvýšení účinnosti. Velká část z nich je pouze ve fázi teoretického odhadu dosažitelné účinnosti. Zde jsou uvedeny pouze ty, které už byly experimentálně realizované.

Speciální nanostruktury tzv. supermřížky umožňující řídit šířku zakázaného pásu (quantum dot, quantum well). Cílem zkoumání je vyrobit takové struktury z levných a dostupných materiálů jako je například křemík.

Luminofoxy, které konvertují široké sluneční spektrum do užší oblasti, která lépe odpovídá šířce zakázaného pásu použitého fotovoltaického článku (up/down converters).

Termo-fotovoltaické články, kde je selektivní absorber ohříván slunečním zářením, který vyzařuje dlouhovlnné záření v úzkém pásmu, které odpovídá šířce zakázaného pásu použitého fotovoltaického článku. [6]

Teoretické limity fotovoltaických technologií

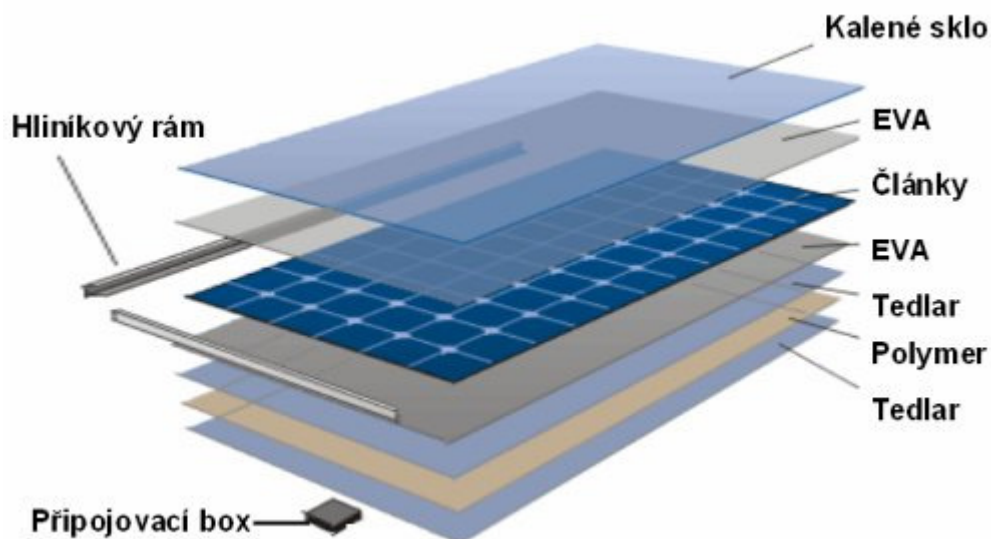


Obrázek 6 Teoretické limity účinnosti vícevrstevných článků [6]

1.6. Fotovoltaické panely

Fotovoltaické panely se testují podle normy IEC 61215. Panely jsou vystaveny různým testům, ke kterým může dojít v praxi. Jsou to například změny teplot, vítr, vlhkost, kyselé deště, kroupy, námraza, kontakt s živočichy atd. Každý typ panelu musí být certifikovaný zvlášť.

Fotovoltaický článek vytvoří napětí 0,5 V až 0,6 V a proto se zapojují buď paralelně, nebo sériově k dosažení požadovaného napětí a vytvoří tak fotovoltaický panel. Ten má za úkol zajistit hermetické zapouzdření solárních článků, dobrou mechanickou a klimatickou odolnost – změny počasí. Většinou jsou panely vloženy do duralových rámců, které zpevní celou konstrukci a usnadňují manipulaci a upevnění ke konstrukci fotovoltaického systému. Přední krycí materiál je speciální kalené sklo odolává i silnému krupobití.



Obrázek 7 Konstrukce fotovoltaického panelu [10]

Z aplikačního pojetí jsou nejdůležitější části konstrukce nacházející se nad povrchem přední strany FV článků, tedy EVA folie (ethylen vinyl acetát) a kalené sklo (popř. teflon, litá pryskyřice). EVA folie je organický materiál, který může vykazovat při silném ozáření UV světlem efekt „žloutnutí“ a to vede ke snížení optické transparentnosti s nepříznivým vlivem na množství generovaného elektrické výkonu slunečními články. Krycí kalené sklo je z hlediska degradace optických vlastností velmi stabilním materiálem a ke snížení optické propustnosti může dojít jedině znečištěním povrchu vlivem okolního prostředí. Struktura panelů tenkovrstvých solárních článků je poněkud odlišná od konstrukce modulů z krystalických křemíkových článků. Je to dáno zejména zcela odlišnou technologií výroby, kdy celá aktivní struktura je deponována plazmaticky v jednotlivých krocích na skleněný velkoplošný substrát. [8]

2. PRAKTICKÉ VYUŽITÍ PV

2.1. Solární elektrárny

Solární elektrárny mají za úkol přeměňovat sluneční energii v elektrickou. Jedná se o nejčistší a nejšetrnější získávání energie vůči životnímu prostředí.

V České republice je nyní evidováno k 1.5. 2010 7444 slunečních elektráren, které mají celkový výkon 512,21 MW. V souladu s cíli Evropské unie by celkový instalovaný výkon solárních systémů v České republice měl do roku 2012 dosáhnout 8% a do roku 2020 13% spotřeby energie.

2.2. Fotovoltaické systémy

V dnešní době se nejvíce používá přeměna solární energie na elektrickou pomocí fotovoltaických panelů. Princip je založený na fotoelektrickém jevu (viz kapitola 1.3). Podle účelu můžeme rozdělit solární systémy do tří skupin.

2.2.1. *Drobné aplikace*

Používají se hlavně v kalkulačkách, ale můžeme je také použít jako solární nabíječky akumulátorů. Tento typ FV článků nabývá významu, protože se zvyšuje poptávka po nabíjecích zařízeních pro okamžité dobíjení akumulátorů (mobilní telefony, notebooky, fotoaparáty, MP3 přehrávače apod.) na dovolených, v kempech popř. ve volné přírodě.

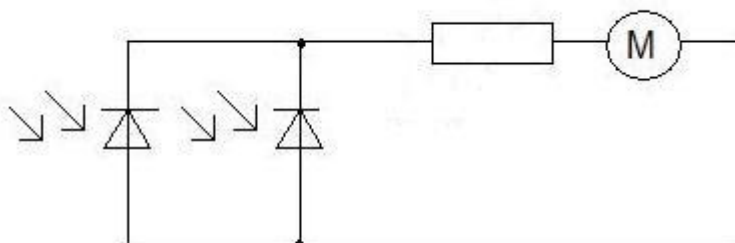
2.2.2. *Ostrovní systémy (off-grid)*

Jsou nezávislé na rozvodné síti a používají se tam, kde je nutnost střídavého napětí 230V. Ostrovní systémy jsou instalovány na místech, kde není praktické anebo není možné vybudovat elektrickou přípojku. Jsou to zejména odlehlé objekty - chaty, karavany, jachty apod.

Off-grid systémy dále dělíme na systémy s přímým napájením, hybridní systémy a systémy s akumulací elektrické energie.

2.2.2.1. Systémy s přímým napájením

U systémů s přímým napájením se jedná o jednoduché propojení solárního panelu a spotřebiče. Spotřebič pak funguje pouze v době dostatečné intenzity slunečního záření, což je jeho hlavní nevýhoda (nabíjení akumulátorů malých přístrojů, napájení ventilátorů k odvětrání uzavřených prostor atd.).



Obrázek 8 Schéma systému s přímým napájením

2.2.2.2. Hybridní ostrovní systém

Hybridní ostrovní systémy se používají tam, kde je nezbytný celoroční provoz se značným vytižením. V zimních měsících získáme z fotovoltaických panelů (zdrojů) elektrické energie mnohem méně, než v letních měsících. Proto je při návrhu těchto systémů brát ohled i na zimní provoz, což sice vede ke zvýšení instalovaného výkonu systému, ale také k podstatnému zvýšení pořizovacích nákladů. Proto jsou fotovoltaické systémy doplňovány alternativním zdrojem energie, kterým může být např. větrná elektrárna, malá vodní elektrárna, elektrocentrála, kogenerační jednotka atd.

2.2.2.3. S akumulací solární energie

Off-grid systémy s akumulací solární energie jsou nezávislé na síti. Tento systém se využívá tam, kde je nutná elektrická energie, i když není dostatečné osvětlení. Proto jsou tyto systémy opatřeny akumulátorem nebo přečerpávací elektrárnou. Optimální dobíjení a vybití akumulátorové baterie zajišťuje elektronický regulátor. Akumulovaná energie se uchovává na dobu, kdy není dostatek slunečního svitu (v noci).

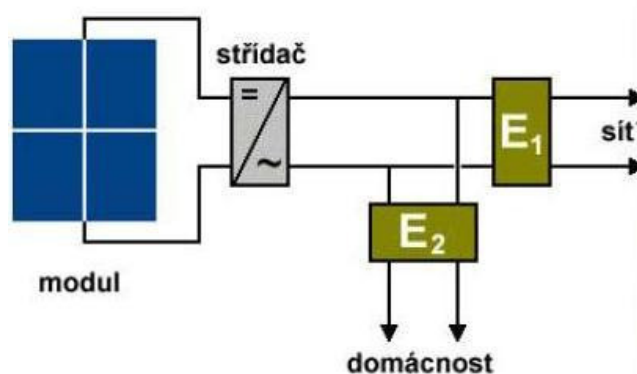
2.2.3. Sít'ové systémy (on-grid)

Nejvíce se využívají v oblastech, kde je velká dostupnost přenosové soustavy. Jsou zapojeny tak, že za dostatečného slunečního svitu jsou spotřebiče v budově napájeni vlastní „solární“ elektrickou energií a možný přebytek je dodáván do veřejné rozvodné sítě. Pokud je nedostatek vlastní energie je elektrická energie z rozvodné sítě dodávána. Systém pracuje naprosto automaticky díky mikroprocesorovému řízení sít'ového střídače. Špičkový výkon fotovoltaických systémů připojených k rozvodné síti je v rozmezí jednotek kilowatt až jednotek megawatt. Připojení k síti musí být schváleno u provozovatele distribuční soustavy.

V současnosti se tento typ fotovoltaického systému jeví jako jeden z nejvýhodnějších. Je to proto, že distributor je nucen přebytečnou energii odebrat. Podmínky státního výkupu budou pro rok 2010 stálé. Výkupní cena pro rok 2010 bude v kategorii fotovoltaických elektráren 12,25 Kč/kWh pro instalace do 30 kWp a 12,15 Kč/kWh pro instalace nad 30 kWp. [9]

Základními prvky on-grid FV systémů jsou:

- fotovoltaické panely
- měnič napětí (střídač), který ze stejnosměrného napětí vyrábí střídavé (230V/~50Hz)
- kabeláž
- elektroměry E1 a E2 měří energii odevzdanou nebo odebranou z rozvodné sítě, 4Q
- popř. sledovač Slunce, indikační a měřicí přístroje



Obrázek 10 Schéma systému on-grid [11]

2.3. Fotovoltaické systémy s pevným a pohyblivým stojanem

2.3.1. Fotovoltaické systémy s pevným stojanem

Solární systémy s pevnými stojany se pro získání maximální energie orientují k jihu a jejich sklon se nastavuje podle zeměpisné šířky tak, aby v poledne dopadalo sluneční záření kolmo k přední ploše panelů. To znamená, že v poledne bude nulový úhel dopadu. Celý fotovoltaický systém se optimalizuje na provoz v zimních měsících, kdy je slunečního záření nejméně.

2.3.2. Fotovoltaické systémy s pohyblivým stojanem

Využití pohyblivých PV systému (sledovačů) je hlavně kvůli zefektivnění a maximálnímu využití dopadajícího slunečního záření. Sledovač je technické zařízení, které je schopné se natáčet podle pohybu Slunce. V České republice může být navýšení získané energie maximálně 30%. Existuje mnoho principů, na kterých sledovače pracují. Zde jsou uvedeny ty, které se v praxi osvědčily.

2.3.2.1. Sledovače na principu hodinových strojků

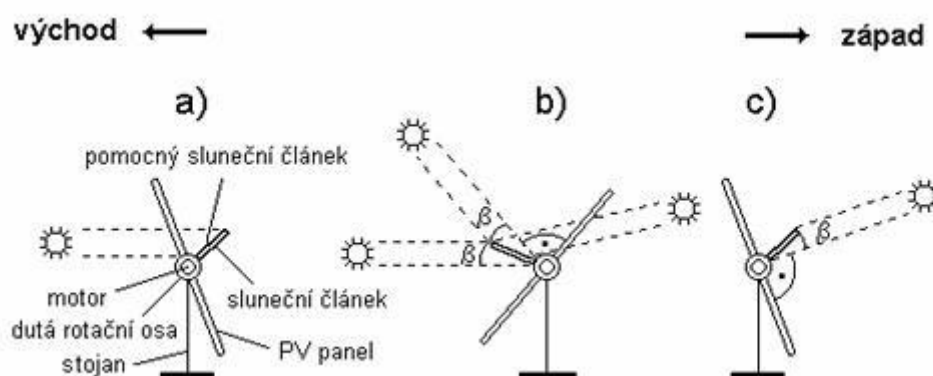
Pracují na principu hodinových strojků nebo na počítačem řízených krokových motorků se samosvornou převodovkou. Jsou přesné a pracují za každého počasí. Jeden počítač může řídit i více stojanů. Tyto systémy jsou ale složité a tedy i drahé. Je zde i větší možnost poruchy.

2.3.2.2. Sledovače na principu diferenciálního porovnání

Sledovače na principu diferenciálního porovnání intenzity slunečního záření na PV článcích tvořících senzor jsou tvořeny PV články, které jsou uspořádány do tvaru jehlanu a pootočeny vůči sobě o určitý úhel. Pracují na porovnání signálů okamžitých výkonů z malých PV článků. Jednotlivé signály vyhodnocuje a porovnává poměrně složité elektronické zařízení, které řídí motor a ten otáčí celým systémem. Jedná se o přesné sledování Slunce, ale nevýhodou je, že je systém složitý z hlediska elektronického vyhodnocování signálů z PV článků a s tím souvisí i cena. Může docházet častěji k poruše.

2.3.2.3. Sledovače typu TRAXLE™

Sledovače typu TRAXLE™ (tracking axle) odstraňují nedostatky výše zmíněných principů. Tento systém byl vyvinut ve spolupráci firmy Poulek Solar, s.r.o. a Technické fakulty ČZU v Praze. Schéma je na obrázku 11.



Obrázek 11 Schéma sledovače TRAXLE™ [12]

Pracuje tak, že řídicí panel se solárními články, je připevněn k rotační ose zařízení. Tvoří ho dvě sekce otočené vůči sobě o 180° (hlavní sekce k západu a pomocná sekce k východu). Rovina řídicího panelu je od roviny kolmé k panelům solární energie a rovnoběžné s rotační osou zařízení odchýlena o úhel ($\beta \approx 15 \div 20$) k východu a obě sekce jsou antiparalelně připojeny přímo k elektromotoru spojenému s rotační osou zařízení.

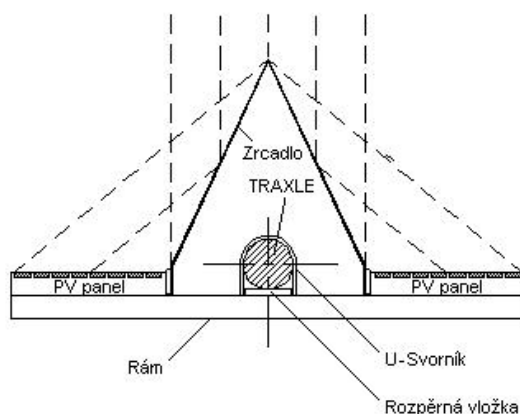
Činnost zařízení s touto konfigurací je následující. Před východem Slunce je zařízení většinou orientováno k západu, tedy v poloze, ve které předchozího dne ukončilo činnost. Po východu slunce (obr. 11a) dopadá sluneční záření na řídicí solární články připojený k motoru. Motor napájený tímto článkem pak otáčí systém k východu za Sluncem, než se úhel β slunečních paprsků dopadajících na pomocný sluneční článek nezmenší natolik, že síla motoru napájeného pomocným slunečním článkem poklesne pod prahovou sílu potřebnou pro orientaci zařízení. Systém je tedy orientován přibližně k východu. Slunce pokročí na obloze o úhel 2β směrem k západu. V tomto úhlu kolektory solární energie nesledují Slunce, protože síla motoru je menší než síla potřebná k jejich orientaci. Dalším postupem Slunce na západ dopadá sluneční záření na solární články připojeného k motoru. Motor, poté otáčí zařízení postupně za Sluncem k západu. Na obrázku 11b je vidět, že když bude Slunce svítit z jakékoliv strany, pomocný solární článek je vždy v dosahu slunečního záření. To je důležité zejména v případě, že by během dne bylo po delší dobu zataženo.[12]

2.3.3. Možnosti navýšení množství vyrobené energie

Ke zvýšení efektivity solárních systémů se používá koncentrace záření. Koncentrátory s rovinnými zrcadly mohou být žlabové nebo hřebenové. Standardní V-žlabové koncentrátory mají koncentrační poměr ($2 \div 2,24$). To vede k jejich přehřívání v běžných intenzitách přímého slunečního záření a také ke snížení účinnosti systému.

Nevýhody V-žlabových koncentrátorů odstraňuje konfigurace s hřebenovým koncentrátorem záření. Na obrázku 12 je řez PV systémem s hřebenovým koncentrátorem záření. Jsou zde zcela eliminována vnější zrcadla. Standardní verze pohyblivého, hřebenového koncentrátoru se může přizpůsobit od dvou malých fotovoltaických panelů (50W) až do 16 velkých fotovoltaických panelů (320W). Použití hřebenového koncentrátoru na různé pohyblivé systémy je velmi snadná. Může být použit u jednoosých sledovačů s vodorovnou i polární osou, i u dvouosých sledovačů.

Koncentrační poměr ($1,6 \div 1,7$) snižuje teplotu solárních panelů oproti koncentrátorům s vyšší koncentrací záření, čímž je i účinnost fotovoltaické přeměny vyšší. Předchází se tím degradaci zapouzdření panelů. Nová konfigurace umožňuje lepší proudění vzduchu kolem kolektoru v porovnání s uspořádáním s V-žlabovým koncentrátorem. Tím je dosaženo i účinnějšího chlazení.



Obrázek 12 Řez PV systému s hřebenovým koncentrátorem záření [13]

2.4. Ekonomika PVE

Solární elektrárny jsou dnes velice výhodné z ekonomického hlediska. Při současné účinnosti a životnosti PV panelů se náklady vrátí do 10 let. Je to z důvodu povinného výkupu, kdy je distributor nucen vykupovat přebytečnou energii za stanovené ceny, které jsou garantovány na 20 let dopředu (zákon 180/2005 Sb.). V roce 2010 to je 12,25 Kč/kWh pro instalace do 30 kWp a 12,15 Kč/kWh pro instalace nad 30 kWp. Pak je zde druhá možnost, tzv. zeleného bonusu. Ten umožňuje majiteli získat peníze i za elektřinu, kterou sám spotřebuje. Ceny pro rok 2009 byly 11,91Kč pro instalace do 30 kWp a 11,81Kč pro instalace nad 30 kWp. Obě možnosti zisku mohou být sníženy ročně o 5%, dle nařízení ERU.

3. PRAKTICKÁ ČÁST – MONITORING

PROVOZU PVE

Fotovoltaická elektrárna je postavena ve Znojemském kraji. Je napojena do sítě vn 3x22kV. Elektrárna je tvořena celkem 1260 ks fotovoltaických panelů Hyundai HiS M-197SF 197 Wp, celkový instalovaný výkon fotovoltaického systému činí 248220 Wp.

Monitoring provozu fotovoltaické elektrárny o výkonu 248,22 kW_P je vyhodnocován v programu Microsoft Office Excel 2007. Monitoring je zaměřen zejména na okamžitý výstupní střídavý výkon (P_{ac} [W]), který znázorňuje, kolik energie se právě dodává do sítě a celkovou energii (E_{Total} [kWh]) dodávaný do sítě za daný časový interval. Obě měřené veličiny jsou vyhodnocovány za hodinu, den, měsíc a rok. Dále se porovnávají teoretické hodnoty s naměřenými.

Fotovoltaická elektrárna je tvořena monokrystalickými panely o jmenovitém výkonu 197 W_P, a celkovém výkonu elektrárny 248,22 kW_P. Panely jsou zapojené do sériových skupin. Od každé skupiny je veden DC přívod do měničů. Odtud pokračuje AC přívod do rozvaděče NN RH1 u transformátoru. Z rozvaděče RH1 jsou vyvedeny kabely na transformátor, kterým přes transformátorové pole rozvaděče vn je vyveden výkon do distribuční sítě vn 3x22kV.

Schéma zapojení FVE viz příloha 1.

3.1. Elektrárna se skládá z těchto částí:

3.1.1. Rozvaděč RH1

Hlavní rozvaděč fotovoltaické elektrárny RH1 je tvořen kovovou. Jistící a spínací prvky, svodiče přepětí tř. 2 a pro obchodní měření - měřicí transformátory proudu 400/5A 10VA 0,5%. V rozvaděči RH1 je osazena univerzální síťová ochrana ComAp NPU NFU pro samočinné odpojení od sítě pomocí jističe OEZ s el.pohonem.

3.1.2. Transformátor

Transformátor 22/0,4 kV 250kVA je použit olejový TOHn 338/22. Výkon transformátoru naprázdno je kompenzován kondenzátorem 5 kVAr 0,4 kV umístěným v rozváděči nn RH1.

3.1.3. Měnič napětí

Pro přeměnu stejnosměrného na střídavý proud jsou použity měniče Sunny Mini Central 7000TL, 11000TL, max. vstupní výkon 45 kWp, vstupní napětí 400-800 V, výstupní napětí 3x400 V, 50 Hz, AC, max. výstupní výkon 38 kW.

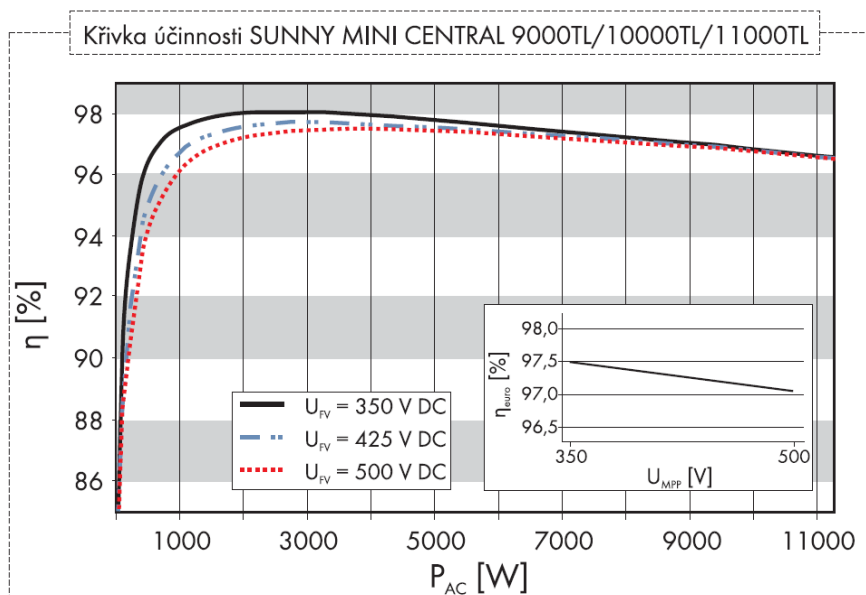
3.2. Střídač

Střídač, někdy nazývaný měnič nebo invertor, slouží k přeměně stejnosměrného napětí vyráběného fotovoltaickými panely na střídavé napětí distribuční sítě. Měnič je v podstatě řídicí centrum celého systému a mimo konverze proudu je schopen podávat informace o vyrobené energii a provozních stavech. Střídač zároveň monitoruje a reguluje napájení sítě a v případě jakékoliv poruchy v přenosové soustavě automaticky odpojí solární generátor od sítě. Střídač může být vybavený displejem, který ukazuje aktuální údaje o činnosti systému, okamžitý výkon, napětí, energii vyprodukovanou systémem ve sledovaný den, celkovou vyprodukovanou energii, dobu práce systému, případně poruchu a příčinu poruchy.

3.2.1. Účinnost:

Na datových listech výrobců jsou udávány obvykle účinnosti maximální a evropské (popř. kalifornské, dle použitých hodnot zařízení při měření). Maximální účinnost se pohybuje v současnosti u střídačů v rozmezí 90 - 98 %, ale sama o sobě není úplně vypovídající charakteristikou. Nejvyšší maximální účinnosti střídač v provozu dosáhne, jen za optimálních podmínek (zpravidla při jmenovitém DC napětí a středních hodnotách AC výkonu). Pro naše zeměpisné šířky je důležitá spíše účinnost evropská, která je měřena při měnících se klimatických podmínkách. Evropská účinnost je průměrem účinnosti při různých stupních zatížení střídače (měří se při 5, 10, 20, 30, 50 a 100 % nominálního výkonu), její hodnoty jsou tedy reálnější vzhledem k provozním podmínkám střídače. Je nutné vědět, že se tato charakteristika měří při optimálním napětí na DC straně, které je v provozu silně ovlivněno teplotou. Ta se logicky v průběhu roku mění. Pro množství získané energie je důležitá vysoká euroúčinnost v celém rozsahu možných bodů maximálního výkonu použitých fotovoltaických

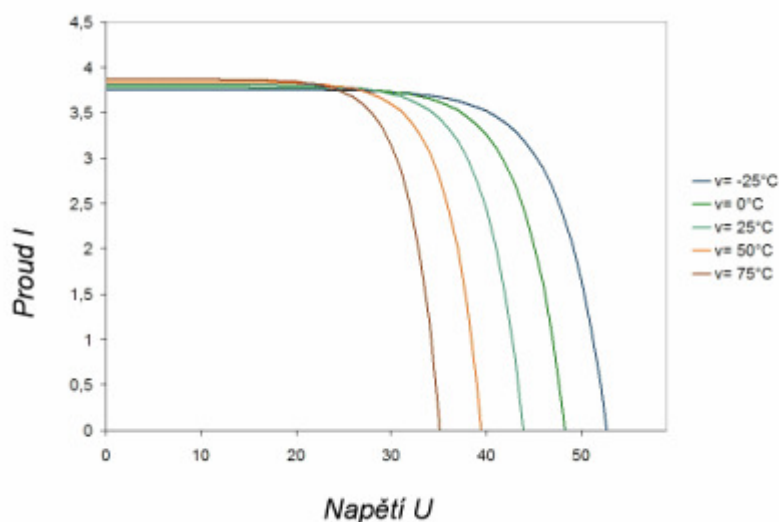
panelů (MPP - maximum power point) a přesnost MPP trackeru, tj. elektronického zařízení, které nastavuje pracovní bod střídače tak, aby odpovídal aktuálnímu bodu maximálního výkonu použitých panelů.



Obrázek 13 Účinnost střídače [14]

3.2.2. Rozsah MPP:

Udává rozsah napětí, ve kterém by měl být střídač schopen optimálně pracovat. Protože vstupní napětí se mění a je důležité, aby si střídač držel vysokou účinnost konstantně v celém pracovním rozsahu, výkyvy v hodnotách jsou nežádoucí.



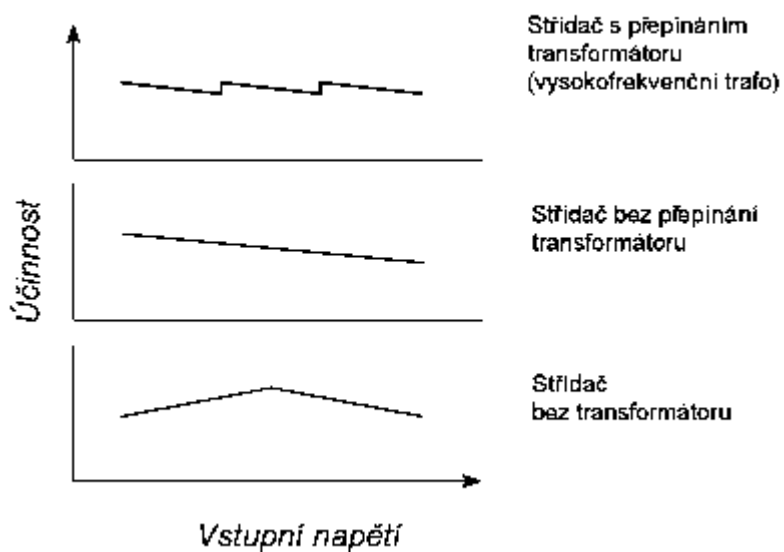
Obrázek 14 Změna napětí v závislosti na změně teploty [14]

3.2.3. Účinnost přizpůsobení MPP:

Velmi důležitým faktorem je účinnost přizpůsobení MPP. Jedná se o parametr udávající, jak rychle dokáže střídač měnící se klimatické podmínky zaregistrovat a na změnu adekvátně a přesně reagovat. Čím delší je prodleva, tím horší jsou výsledky. Tuto funkci ve střídači obstarává tzv. MPP tracker. Jedná se o zařízení pro sledování bodu maximálního výkonu (MPP), které změnou vstupního odporu zajišťuje optimální chod střídače. Hodnota této charakteristiky u kvalitních střídačů neklesá pod 99%. [14]

3.2.4. Střídač s transformátorem

Střídače, které mají nejvyšší absolutní účinnosti, jsou většinou střídače beztransformátorové. Výhodou je o něco vyšší účinnost, nevýhodou je pak absence galvanického oddělení. Galvanické oddělení znamená maximální ochranu střídače před poškozením (oddělení stejnosměrné a střídavé strany) a je nezbytně nutné například u fotovoltaických systémů s tenkovrstvými panely (amorfní křemík, mikromorphy, CIS atd.).



Obrázek 15 Porovnání střídačů s a bez transformátoru [14]

3.2.5. *Koncepce využívající větší počet výkonových dílů.*

Tato koncepce je důležitá pro stálý chod střídače, jeho účinnost a prodloužení životnosti. Při částečném zatížení pracuje s vyšší účinností nižší výkonový stupeň (stupně), další se zapínají podle měnících se klimatických podmínek. Tato koncepce je důležitá hlavně v oblastech, kde se často mění klima (Česká republika), kde jsou střídače mnohdy díky oblačnosti a mlhám zatíženy pouze částečně. Sleduje se i hodinové využití jednotlivých výkonových stupňů a využívá se obvykle ten nejméně "opotřeбенý" díl. Životnost střídače se tímto prodlužuje a provozní náklady klesají. Dojde-li k poruše výkonového dílu, střídač pracuje i nadále, ostatní výkonové díly převezmou jeho práci. Stačí vyměnit chybný díl a střídač bude pracovat na plný výkon i v nadprůměrně slunečných dnech (jen v těchto dnech totiž hrozí, že by mohl vadný výkonový díl "ořezávat výkon" invertoru).

3.2.6. *Sběr a analýza dat*

Zejména u větších instalací je sběr dat a analýza informací důležitá pro bezchybnou kontrolu chodu systému. Při změně výtěžnosti produkce musí systém upozornit na tuto chybu. Tím umožní neprodleně reagovat. Hledat chybu často u několika desítek invertorů může být časově náročná a nákladná záležitost. Výrobci střídačů proto nabízejí celou řadu komunikačních a datových zařízení umožňující komfortní kontrolu výroby a sledování poruch. Stahování dat na počítače a zobrazování na displejích pomocí kabelových či bezdrátových technologií (např. bluetooth) je dnes standardem, stejně jako zasílání chybových hlášení pomocí sms nebo e-mailu. Známější výrobci nabízejí možnost sledovat data o vlastní výrobě také prostřednictvím centrálních serverů. Majitel elektrárny pak může sledovat a porovnávat výtěžnost odkudkoliv, kde má připojení k Internetu.

3.2.7. *Chlazení a řízení teploty:*

Existuje celá řada technických řešení. Teplota střídače může poměrně citelně ovlivnit jeho účinnost. Proto je nutné použití kvalitní elektroniky pracující bezchybně i při vysokých teplotách a dobrý systém chlazení či odvětrávání. Výhodné se jeví např. chlazení pomocí uzavřeného chladiče (obvykle trubice), kdy se chladicí vzduch nedostane přímo do kontaktu se základní deskou a elektronikou. Prach a vlhkost tak zůstávají mimo vlastní střídač. Výhodou některých střídačů je také možnost napájet ventilátory chlazení z externího zdroje a není tedy nutné spotřebovávat vlastní vyrobenou elektřinu. O možném použití střídače "venku nebo uvnitř" nás informují stupně krytí IP (International Protection), které znamenají

odolnost zařízení proti vniknutí cizího tělesa či vniknutí kapalin. Většinu moderních střídačů je dnes možné nepochybně instalovat uvnitř a při splnění určitých podmínek i ve venkovním prostředí. Zajímavým hlediskem u střídačů je také variabilnost jejich instalace, manipulovatelnost a snadnost údržby. I přes snahu výrobců připomínají např. některé centrální střídače stále poměrně "těžké a velké krabice", jejichž oprava znamená často komplikovanou záležitost. Výhodu mají střídače s jednotlivými výkonovými stupni, jejichž oprava znamená pouze rychlou výměnu chybného dílu. Není tedy nutné rozebrat celé zařízení. U výkonově menších střídačů nabízí dnes většina výrobců poměrně snadnou manipulaci, nízkou hmotnost a různou variabilitu instalace. [14]

3.3. Výpočty teoretických hodnot:

3.3.1. *Teoretická maximální účinnost článku je dána vztahem:*

$$\eta = \eta_r \cdot \eta_e \cdot \eta_p \cdot \eta_{el} = \eta_r \cdot \eta_e \cdot \eta_p \cdot FF \quad (9)$$

η_r je poměr výkonu odraženého záření k výkonu dopadajícímu; s respektováním průměrné odrazivosti křemíku ($R = 0,3$), můžeme psát $\eta_r = 0,70$

η_e je účinnost Carnotova tepelného cyklu:

$$\eta_e = 1 - \frac{T}{T_s} = 1 - \frac{298,15}{6000} = 0,9503 \quad (10)$$

T je okolní teplota a je rovna při 25°C 298,15 K a T_s je teplota Slunce a je rovna 6000 K.

η_p je příspěvek k účinnosti vlivem nepřizpůsobení křemíku ke spektru slunečního záření $\eta_p = 0,42$.

$\eta_{el} = FF$ je příspěvek k účinnosti daný kumulativními elektronickými parametry FVČ, dostupný měřením [15]

$$FF = \frac{U_m \cdot I_m}{U_{oc} \cdot I_{oc}} = \frac{25,9 \cdot 7,6}{33,3 \cdot 8,2} = 0,72 \quad (11)$$

Po dosazení hodnot vychází účinnost:

$$\eta = \eta_r \cdot \eta_e \cdot \eta_p \cdot \eta_{el} = \eta_r \cdot \eta_e \cdot \eta_p \cdot FF = 0,70 \cdot 0,9503 \cdot 0,42 \cdot 0,72 = 0,2011 \Rightarrow 20,11\%$$

Tato hodnota je určena při teplotě 25°C a nejsou zde započítány žádné ztráty při výrobě – ztráty na kontaktech atd.

3.3.2. Výpočet teoretické hodnoty výkonu:

	Panel (54 článků)	Článek
Výška x šířka [mm]	1496 x 983	152,4 x 152,4
Plocha [m ²]	1,470568	0,0232257
Plocha elektrárny [m ²]	1852,91	1580,28
Účinnost	13,6%	15,5%

Tabulka 1 Hodnoty udávané výrobcem a dopočítané hodnoty

Uvedené účinnosti odpovídají standardním zkušebním podmínkám:

Intenzita ozáření 1000 W/m², teplota 25°C, AM = 1,5.

Výpočet:

$$P_p = S \cdot E \cdot \eta = 1852,91 \cdot 197,33 \cdot 0,136 = 49726,3233208 \text{ W} = 49,726 \text{ kW} \quad (12)$$

$$P_{cl} = S \cdot E \cdot \eta = 1580,28 \cdot 197,33 \cdot 0,155 = 48334,681122 \text{ W} = 48,334 \text{ kW} \quad (13)$$

Naměřená hodnota byla 48,87 kW při intenzitě ozáření 197,33 W/m² a teplotě 12,14°C dne 12.4.2010 ve 12:00.

V rovnici (12) se počítá s plochou panelů, která je 1852,91 m² a účinností panelu 13,6 % vychází teoretický výkon 49,726 kW. Tato hodnota je vyšší, protože nejsou započteny ztráty na vedení a ztráty na měniči.

V rovnici (13) je brána plocha článků 1580,28 m² a účinnost článku 15,5%. Po dosazení hodnot vychází výkon 48,334 kW. Hodnota je nižší v důsledku ztrát vedení.

V obou případech se nepočítá se stářím článků, které je zanedbatelné, protože se jedná o novou FVE. Změna teploty v tomto případě neměla vliv na výkon elektrárny.

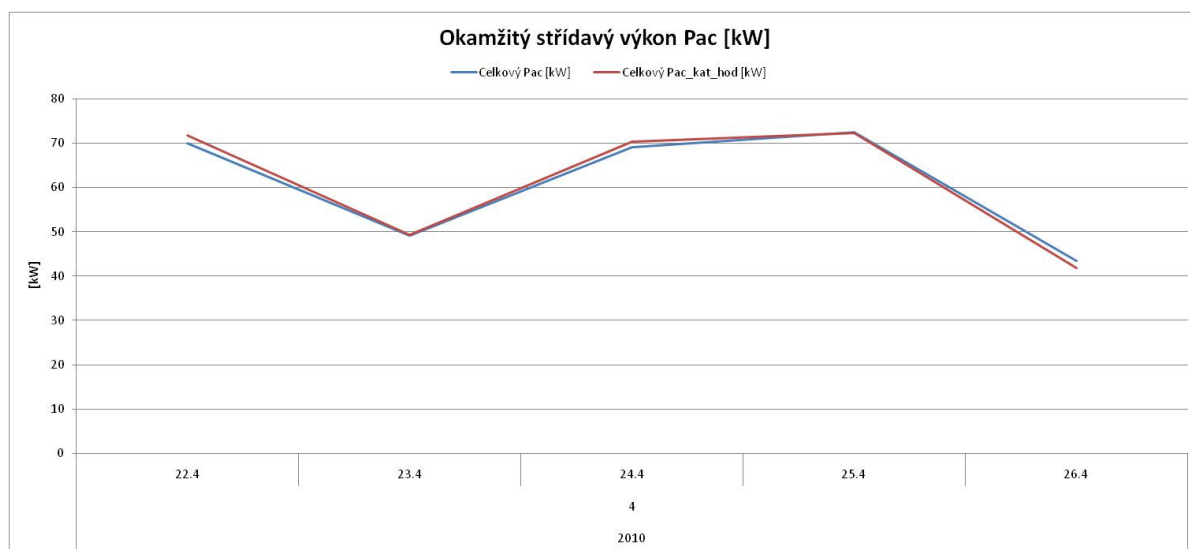
Data pro vyhodnocování okamžitého celkového střídavého výstupního výkonu a celkové energie dodávané do sítě jsou získávána z elektroměru. Ty jsou dále zpracovány do tabulek Microsoft Office Excel 2007, vytvořeným programem v Microsoft Visual C# 2008

Express Edition, z kterých se následně získají potřebné průběhy. Grafy jsou vytvořeny pomocí kontingenčních tabulek, které umožňují zobrazování hodnot v hodinách, dnech, měsících nebo letech, což umožňuje větší přehlednost. Mohou se zkoumat případné výkyvy dodávané energie do sítě, zjištění příčiny a tím předejít ztrátám. Sluneční záření bude vyhodnocováno pyranometrem, na základě získaných hodnot se vypočítá teoretický výkon elektrárny za daný den (zkoumaný časový interval) a bude se následně porovnávat se skutečnými hodnotami získané z fotovoltaické elektrárny.

3.4. Úprava dat pomocí programu vytvořeného v Microsoft Visual C# 2008 Express Edition

- Získání dat z elektroměru
- Vybrání požadovaných dat z formátu csv
- Vložení do tabulky vytvořené pro vyhodnocování získaných dat
- Vložení dat do kontingenčních tabulek
- Sledované průběhy (okamžitý celkový střídavý výstupní výkon [W], celkový výkon elektrárny dodávané do sítě)

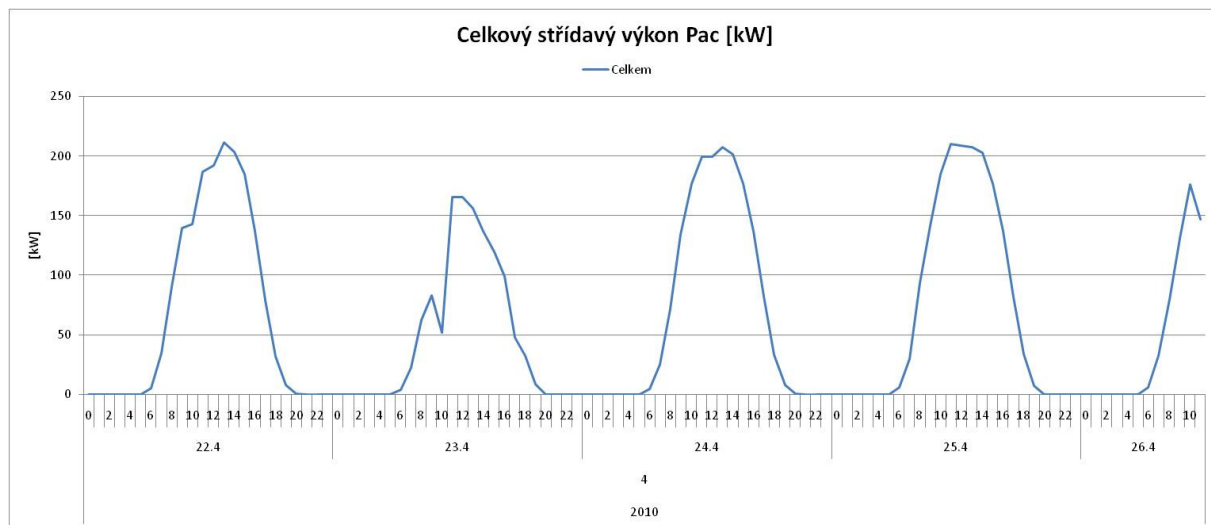
3.5. Naměřené a teoretické hodnoty v grafech:



Obrázek 16 Okamžitý střídavý výkon [kW]

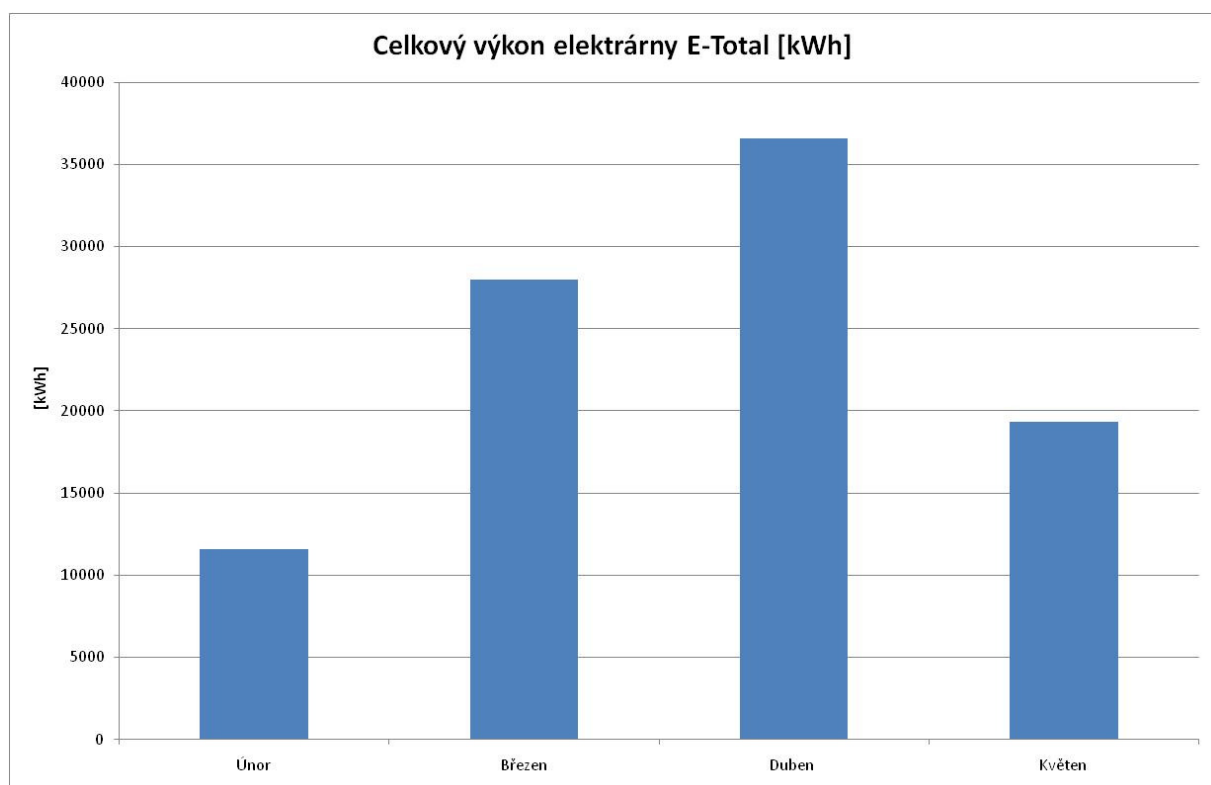
Na obrázku 16 je vidět porovnání celkového naměřeného výkonu (modrá barva) a celkového teoretického výkonu podle hodnot dané výrobcem (červená).

Příloha číslo 2 znázorňuje naměřený celkový výkon (zelená), celkový teoretický výkon (fialová), intenzitu slunečního ozáření (modrá) a teplotu (červená).



Obrázek 17 Celkový okamžitý střídavý výkon [kW]

Na obrázku 17 je vidět průběh celkového okamžitého střídavého výkonu v kW.



Obrázek 1817 Celkový výkon elektrárny [kWh]

Obrázek 18 ukazuje celkový výkon elektrárny v kWh za dané měsíce pro rok 2010.

Naměřený a teoretický výkon E-Total [kWh]

	Den	Naměřené hodnoty	Teoretické hodnoty	δ [%]		Den	Naměřené hodnoty	Teoretické hodnoty	δ [%]
DUBEN	10	838.9	902.52	7.05	KVĚTEN	1	1100.48	1164.72	5.52
	11	618.06	640.13	3.45		2	853.93	862.17	0.96
	12	595.13	597.70	0.43		3	388.83	348.05	
	13	263.85	276.32	4.51		4	339.08	360.01	5.81
	14	186.2	200.22	7.00		5	404.49	412.71	1.99
	15	316.16	332.39	4.88		6	1176.93	Chyba	
	16	1158.61	1157.30	-0.11		7	1228.89	Chyba	
	17	1729.24	1770.16	2.31		8	1132.71	Chyba	
	18	1208.42	1160.85	-4.10		9	1434.88	Chyba	
	19	1447.96	1474.02	1.77		10	812.88	Chyba	
	20	1418.45	1393.54	-1.79		11	1019.86	Chyba	
	21	1401.24	1418.53	1.22		12	286.62	297.53	3.67
	22	1640.73	1710.44	4.08		13	424.47	433.68	2.12
	23	1146.54	1173.44	2.29		14	444.58	443.79	-0.18
	24	1656.87	1712.83	3.27		15	697.5	681.10	-2.41
	25	1721.92	1740.11	1.05		16	405.33	407.47	0.53
	26	1223.63	1261.17	2.98		17	346.42	349.82	0.97
	27	1367.49	1397.22	2.13		18	771.49	747.82	-3.17
	28	1505.65	1557.83	3.35		19	602.71	592.10	-1.79
	29	1711.67	1780.80	3.88		20	719.12	709.04	-1.42
30	1431.14	1479.66	3.28	21		1021.1	1159.35		
						22	892.63	912.61	2.19
						23	1362.01	1423.99	4.35
						24	1165.51	1229.40	5.20
Průměr		1170.85	1197.01	97.81	Průměr		793.02	696.41	
Součet		24587.86	25137.17	97.81	Součet		19032.45	12535.36	
Průměrná odchylka [%]				1.91	Průměrná odchylka [%]				2.34

Tabulka 2 Porovnání naměřené a teoretické hodnoty celkového výkonu E-Total [kWh] za měsíc Duben a Květen

Porovnání systémů s pevným stojanem a systémů polohovacích

Tabulka 3 Porovnání systému s pevným stojanem a systémů polohovacích [3]

	Pevný stojan		Vertikální natáčení						Šikmé natáčení						Dvou-osé natáčení	
			0°		35°		45°		0°		35°		45°			
Měsíc	Pd	Pm	Pd	Pm	Pd	Pm	Pd	Pm	Pd	Pm	Pd	Pm	Pd	Pm	Pd	Pm
Leden	294	9120	173	5360	316	9790	336	10400	238	7370	330	10200	344	10700	350	10900
Únor	482	13500	326	9130	531	14900	559	15700	445	12500	559	15700	574	16100	576	16100
Březen	712	22100	571	17700	819	25400	847	26300	755	23400	858	26600	863	26700	860	26700
Duben	912	27400	834	25000	1110	33400	1140	34200	1090	32600	1150	34600	1140	34300	1160	34700
Květen	1040	32200	1040	32300	1330	41200	1350	41800	1330	41100	1340	41700	1320	40900	1370	42500
Červen	1020	30500	1060	31800	1300	39000	1310	39300	1300	39000	1290	38600	1260	37700	1330	40000
Červenec	1080	33400	1100	34100	1400	43400	1420	44000	1400	43500	1410	43700	1380	42900	1450	44900
Srpen	988	30600	931	28900	1230	38000	1250	38800	1210	37400	1260	39100	1250	38600	1270	39400
Září	774	23200	646	19400	909	27300	938	28100	856	25700	952	28500	953	28600	953	28600
Říjen	632	19600	435	13500	713	22100	752	23300	617	19100	758	23500	775	24000	778	24100
Listopad	295	8840	190	5710	317	9520	334	10000	252	7560	330	9910	341	10200	342	10300
Prosinec	207	6400	122	3790	219	6800	232	7200	163	5040	227	7040	236	7330	239	7400
Celkem	703	21400	7450	227000	10200	311000	10500	319000	9680	294000	10500	319000	10500	318000	10700	326000

ZÁVĚR

Úkolem bakalářské práce bylo přiblížit jednu nepochybně zajímavou oblast z technologického hlediska, kterou je fotovoltaika, zkratkou PV. Tato poměrně rychle se rozvíjející technologie nás čím dál více obklopuje, můžeme na ni narazit téměř všude. Například na nově postavených budovách, kterým slouží fotovoltaické panely jako zdroj energie.

V teoretické části práce seznamuje s principem vzniku elektrické energie ze Slunce. Dále se zabývá vlastní konstrukcí a vývojem PV článků, jejich spojením do fotovoltaického modulu (panelu) a následným využitím pro solární elektrárny. Jsou zde rozebrány typy solárních systémů, jejich konstrukce a možné navýšení PV energie pomocí tzv. sledovačů Slunce.

V praktické části bakalářské práce se porovnávají teoreticky vypočítané hodnoty s naměřenými. Hodnoty byly získávány z fotovoltaické elektrárny s výkonem 248,22 kW_p, která byla postavena na přelomu roku 2009/2010 ve znojemském okrese.

V tabulce 2 jsou porovnány naměřené a teoretické hodnoty celkového výkonu E-Total [kWh]. Hodnoty jsou zobrazeny pro měsíc duben a květen, kdy byl uveden do provozu sunnybox, který sleduje intenzitu dopadajícího slunečního záření, okolní teplotu a další veličiny podle požadovaného nastavení. Teoretické hodnoty jsou vypočítány podle vzorce (12). Je vidět, že naměřené hodnoty jsou ve většině případů nižší než teoretické, protože nejsou započítány ztráty na vedení a na měniči. Vyšší naměřené hodnoty mohou být způsobeny chybou měřicího přístroje. Průměrná odchylka vychází pro měsíc duben 1,91 a květen 2,31. V měsíci květen byly vyloučeny 2 extrémy – nejvyšší a nejnižší odchylka. Tyto odchylky mohou být způsobeny ztrátami na měniči a vedení. V měsíci květnu došlo k poruše na sunnyboxu a nebyly získány hodnoty slunečního záření a proto nemohly být vypočítány teoretické hodnoty. Ukázkou grafického porovnání dat je vidět v příloze 1, kde se srovnává naměřená a teoretická hodnota okamžitého střídavého výkonu P_{ac} [kW].

V tabulce 3 jsou srovnány průměrné hodnoty za den a měsíc dostupným programem na internetu – „Fotovoltaický geografický informační systém PVGIS“. Jsou zde porovnány hodnoty při změně nastavení sklonu panelů a při natáčení PV panelů za Sluncem – vertikální natáčení, šikmé natáčení pro úhly natočení PV panelů 0°, 35° a 45°, dvousé natáčení a pevný

stojan měřené fotovoltaické elektrárny se sklonem PV panelů 34° . Je vidět, že nejvyšší účinnost má dvouosý systém. Mezi jednoosými systémy je účinnější systém s šikmým natáčením. Jako nejméně účinný se jeví systém s pevným stojanem. Ovšem větší účinnost natáčecích systémů je vykoupena vyšší pořizovací cenou, složitějším řídicím systémem a tím i delším navrácení investovaných peněz. V České Republice zatím nebyla provedena dlouhodobá studie, která by dala jednoznačnou odpověď, jaký polohovací systém je v našich podmínkách nejvýhodnější. Hodnoty v tabulce jsou průměry za den (Pd) a měsíc (Pm). Jsou počítány podle dlouhodobého sledování počasí od roku 2001 – 2008. Proto zde mohou být odchylky a je nutné tyto hodnoty brát pouze jako orientační.

Bakalářská práce by měla pomoci při sledování výkonu fotovoltaické elektrárny. Pro vyhodnocování údajů a jejich grafickou prezentaci byl zvolen program Microsoft Office Excel 2007, protože je v současnosti dostupný širokému okruhu uživatelů. Hodnoty jsou přehledně zobrazeny v tabulkách a grafech. Porovnávají se naměřené a teoretické hodnoty, díky kterým se může předejít ztrátám v případě poruchy. Tento systém monitoringu se může využít po případných úpravách pro další systémy pro získávání elektřiny, jako mohou být např. větrné elektrárny, kde se může vyhodnocovat rychlost větru, celkový výkon a další požadované hodnoty nebo pro malé vodní elektrárny pro sledování průtoku, výšky hladiny a další.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *Světlo* [online]. 2009 [cit. 2009-11-14]. Dostupný z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=22854>.
- [2] Milan Libra, Vladislav Poulek. Solární energie: fotovoltaika - perspektivní trend současnosti i blízké budoucnosti. Recenzovala: prof.RNDr. Ludmila Eckertová, CSc. 2. dopl. vyd.. V Praze, Česká zemědělská univerzita, 2006. 149 s., il. (některé barev.), 24 cm ISBN: 80-213-1488-5
- [3] *Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)* [online]. 2001-2008 [cit. 2009-12-01]. Dostupný z WWW: <<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/index.htm>>.
- [4] *Czech RE Agency* [online]. 2003-2009 [cit. 2009-11-14]. Dostupný z WWW: <<http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika>>.
- [5] *účinky a užití optického záření* [online]. 2005 [cit. 2009-11-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.odbornecasopisy.cz/download/sv010532.pdf>>.
- [6] *Tzb-info* [online]. 2001-2009 [cit. 2009-11-18]. Dostupný z WWW: <<http://energie.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=5517>>.
- [7] *Mandik Solar a.s.* [online]. 2005 [cit. 2009-11-15]. Dostupný z WWW: <http://www.mandiksolar.cz/technologie_panely>.
- [8] *isolar* [online]. 2009 [cit. 2009-11-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.isolar.cz/technologie.html>>.
- [9] *Nalezeno* [online]. 2008 [cit. 2009-11-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.nazeleno.cz/energie/fotovoltaika-1/fotovoltaika-vyplati-se-vykup-elektriny-nebo-zelene-bonusy.aspx>>.
- [10] *Tzb-info* [online]. 2001-2009 [cit. 2009-11-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=5470>>.
- [11] *Elektrika* [online]. 1998-2009 [cit. 2009-11-18]. Dostupný z WWW: <<http://elektrika.cz/data/clanky/fotovoltaicke-systemy>>.
- [12] *Tzb-info* [online]. 2001-2009 [cit. 2009-11-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=3542&h=13&pl=49>>.
- [13] *Poulek Solar, s.r.o* [online]. c2008 [cit. 2009-11-19]. Dostupný z WWW: <<http://www.pvpumps.com/koncentr.htm>>.
- [14] *Tzb-info* [online]. 2001-2009 [cit. 2010-05-14]. Dostupné z WWW: <<http://www.tzb-info.cz/t.py?i=5571&t=2>>.
- [15] Parametry fotovoltaických článků. Vyšší odborná škola a Střední průmyslová škola Varnsdorf [online]. 2009, 1, [cit. 2010-05-14]. Dostupný z WWW: <http://www.vosvdf.cz/cmsb/userdata/487/FVS_001_cviceni/001_parametry_fvc.pdf>.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Oblasti spektra elektromagnetického záření [1]	8
Obrázek 2 Sluneční záření v ČR – kWh/m ² (dopad na vodorovnou plochu) [4]	11
Obrázek 3 Model energetických hladin PV článku a fotovoltaické přeměny energie [5]	14
Obrázek 4 Schéma polovodičového fotovoltaického článku [5]	16
Obrázek 5 Nejlepší účinnosti experimentálních článků, cíle do roku 2015 [6]	16
Obrázek 6 Teoretické limity účinnosti vícevrstevných článků [6]	19
Obrázek 7 Konstrukce fotovoltaického panelu [10]	20
Obrázek 8 Schéma systému s přímým napájením.....	22
Obrázek 9 Schéma systému off-grid s akumulací elektrické energie [4].....	23
Obrázek 10 Schéma systému on-grid [11]	24
Obrázek 11 Schéma sledovače TRAXLE TM [12]	26
Obrázek 12 Řez PV systému s hřebenovým koncentrátorem záření [13].....	27
Obrázek 13 Účinnost střídače [14].....	31
Obrázek 14 Změna napětí v závislosti na změně teploty [14]	31
Obrázek 15 Porovnání střídačů s a bez transformátoru [14].....	32
Obrázek 16 Okamžitý střídavý výkon [kW]	36
Obrázek 18 Celkový výkon elektrárny [kWh]	37

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Hodnoty udávané výrobcem a dopočítané hodnoty	35
Tabulka 2 Porovnání naměřené a teoretické hodnoty celkového výkonu E-Total [kWh] za měsíc Duben a Květen.....	38
Tabulka 3 Porovnání systému s pevným stojanem a systémů polohovacích [3]	39

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Schéma zapojení FVE

Příloha 2: Okamžitý naměřený střídavý výkon a teoretický střídavý výkon P_{ac} [kW]

Příloha 3: program csvReaderMini na přiloženém cd

Příloha 1

