

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

**BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING**

**ANALÝZA OPRÁVNĚNOSTI VYUŽITÍ  
SOLÁRNÍCH NATÁČECÍCH ZAŘÍZENÍ PRO  
FOTOVOLTAICKÉ SYSTÉMY V DANÉ LOKALITĚ**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS**

**AUTOR PRÁCE  
AUTHOR**

**PAVEL HOŘAVA**

**BRNO 2012**



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**



**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií**

**Ústav elektroenergetiky**



**Bakalářská práce**

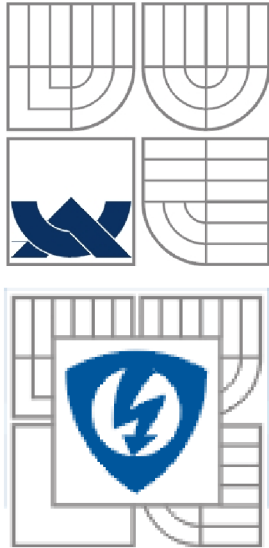
# **Analýza oprávněnosti využití solárních natáčecích zařízení pro fotovoltaické systémy v dané lokalitě**

**Pavel Hořava**

**vedoucí: Ing. Michal Ptáček**

**Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2012**

**Brno**



**BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**

**Faculty of Electrical Engineering and Communication  
Department of Electrical Power Engineering**

**Bachelor's thesis**

# **Analysis of justifiability of use of solar trackers for photovoltaic systems in given locality**

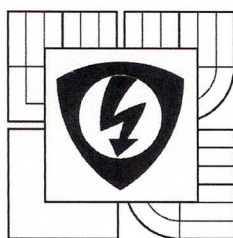
**by**

**Pavel Hořava**

**Supervisor: Ing. Michal Ptáček**

**Brno University of Technology, 2012**

**Brno**



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ  
Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií  
Ústav elektroenergetiky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

**Student:** Pavel Hořava  
**Ročník:** 3

**ID:** 119438  
**Akademický rok:** 2011/12

## NÁZEV TÉMATU:

### Analyza oprávněnosti využití solárních natáčecích zařízení pro fotovoltaické systémy v dané lokalitě

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Obecný úvod do fotovoltaických technologií
2. Popis a jednotlivé typy stacionárních a natáčecích fotovoltaických systémů
3. Teoretické možnosti zvýšení dodávaného výkonu fotovoltaických systémů
4. Výpočet veličin vhodných pro návrh fotovoltaického systému v dané lokalitě
5. Návrh a popis laboratorních experimentů související s problematikou natáčecích systémů
6. Realizace navržených experimentů
7. Vyhodnocení provedených experimentů
8. Zhodnocení oprávněnosti využití natáčecích systémů

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Je vhodné využít odborných článků databází IEEE, Web of Science a jiné. Další literatura je stanovena dle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 6.2.2012

**Termín odevzdání:** 25.5.2012

**Vedoucí práce:** Ing. Michal Ptáček

**Konzultanti bakalářské práce:**



  
**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
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.

Bibliografická citace práce:

HOŘAVA, P. Analýza oprávněnosti využití solárních natáčecích zařízení pro fotovoltaické systémy v dané lokalitě. Bakalářská práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2012, 57 stran.

Jako autor uvedené bakalářské 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 části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Děkuji tímto Ing. Michalu Ptáčkovi, vedoucímu mé bakalářské práce, za odborné vedení a Ing. Tomáši Bartošíkovi za spolupráci při realizaci experimentů.

.....

**ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá analýzou oprávněnosti využití solárních natáčecích zařízení pro fotovoltaické systémy v dané lokalitě. V první části je stručně popsán princip fotovoltaické přeměny, druhy fotovoltaických panelů, legislativa a vhodnost ČR pro fotovoltaické systémy. Druhá část se teoreticky věnuje systémům natáčení fotovoltaického panelu za sluncem a stacionárním uložením panelu. Následující část se zabývá dalšími možnostmi zvýšení výkonu fotovoltaického panelu a faktory ovlivňujícími výkon panelu. Ve čtvrté části je navržen fotovoltaický systém v dané lokalitě. V dalších částech jsou navrženy, realizovány a zhodnoceny experimenty zaměřené na praktické ověření výkonu stacionárně uloženého panelu během dne i roku, protože v důsledku pohybu slunce po obloze se výrazně mění intenzita dopadajícího záření. Poslední část je věnována zhodnocení oprávněnosti využití natáčecích systémů z více hledisek.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** fotovoltaický panel; stacionární uložení; ideální úhel naklonění; natáčecí systém; zvýšení výkonu, koncentrátor

**ABSTRACT**

This bachelor's thesis deals with the Analysis of justifiability of use of solar trackers for photovoltaic systems in given locality. The principle of the photovoltaic transformation, kinds of photovoltaic panels, legislation and a suitability of the Czech republic for photovoltaic systems are roughly characterized in the first part. The second part is about the systems of tracking the photovoltaic panel to the sun and the stationary placement photovoltaic panel. The possibilities of increasing of power of photovoltaic panel and the factors, which influent the power of photovoltaic panel, are detailly described in the third part. The photovoltaic system in given locality is designed in the fourth part. The experiments are designed, realised and evaluated in the next parts. The experiments are focused on practical verification of the power of stationary placed panel during the day and the year. The last part of this bachelor's thesis deals with the evaluation of justifiability of use of solar trackers for photovoltaic systems in given locality from many points of view.

**KEY WORDS:** photovoltaic panel; stationary placement of the photovoltaic panel; ideal tilt angle; tracker; power increase; concentrator

## OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ .....	9
SEZNAM TABULEK.....	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	11
<b>1 OBECNÝ ÚVOD DO FOTOVOLTAICKÝCH TECHNOLOGIÍ .....</b>	<b>13</b>
<b>1.1 ÚVOD .....</b>	<b>13</b>
<b>1.2 PRINCIP FOTOVOLTAICKÉ PŘEMĚNY .....</b>	<b>13</b>
<b>1.3 FOTOVOLTAICKÉ PANELE .....</b>	<b>14</b>
1.3.1 KŘEMÍK .....	14
1.3.1.1 Polykrystalický křemík .....	15
1.3.1.2 Monokrystalický křemík .....	15
1.3.2 AMORFNÍ ČLÁNKY .....	15
1.3.3 DALŠÍ MATERIÁLY .....	15
<b>1.4 LEGISLATIVA .....</b>	<b>16</b>
1.4.1 ZELENÝ BONUS.....	16
1.4.2 VÝKUPNÍ CENA.....	17
<b>1.5 VHODNOST ČR PRO FOTOVOLTAICKÉ SYSTÉMY .....</b>	<b>17</b>
<b>1.6 VÝHODY A NEVÝHODY FOTOVOLTAICKÝCH PANELEŮ .....</b>	<b>18</b>
<b>2 STACIONÁRNÍ A NATÁČECÍ FOTOVOLTAICKÉ SYSTÉMY .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1 STACIONÁRNÍ FOTOVOLTAICKÉ PANELE .....</b>	<b>19</b>
2.1.1 VÝKON .....	19
2.1.2 CELKOVÁ VYROBENÁ ENERGIE.....	20
<b>2.2 FOTOVOLTAICKÉ PANELE NA NATÁČECÍCH SYSTÉMECH.....</b>	<b>21</b>
2.2.1 VÝKON .....	21
2.2.2 CELKOVÁ VYROBENÁ ENERGIE.....	21
<b>2.3 ZPŮSOBY NATÁČENÍ FOTOVOLTAICKÝCH PANELEŮ .....</b>	<b>22</b>
2.3.1 PASIVNÍ NATÁČECÍ SYSTÉMY .....	22
2.3.2 AKTIVNÍ NATÁČECÍ SYSTÉMY .....	23
2.3.2.1 Mikroprocesorové natáčeční systémy .....	23
2.3.2.2 Systémy založené na pomocném oboustranném fotovoltaickém panelu .....	24
2.3.2.3 Natáčeční systémy založené na sledování času a pořadí dne v roce .....	25
<b>3 TEORETICKÉ ZVÝŠENÍ VÝKONU .....</b>	<b>26</b>
<b>3.1 INTENZITA SLUNEČNÍHO ZÁŘENÍ UVAŽOVANÁ PRO REÁLNOU SITUACI .....</b>	<b>26</b>
<b>3.2 KONCENTRÁTORY .....</b>	<b>27</b>
<b>3.3 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ VÝKON FOTOVOLTAICKÝCH PANELEŮ.....</b>	<b>28</b>
3.3.1 ROZDÍLNÁ IMPEDANCE PANELEŮ .....	28
3.3.2 TEPLOTNÍ VLIV .....	28
3.3.3 ZÁVADA NA BY-PASS DIODĚ .....	29
3.3.4 ROZDÍLNÉ NAKLONĚNÍ FOTOVOLTAICKÝCH PANELEŮ .....	29
3.3.5 VLIV OBLAČNOSTI.....	29
3.3.6 VLIV ZNEČIŠTĚNÍ ATMOSFÉRY .....	29
3.3.7 ZHODNOCENÍ NEGATIVNÍCH VLIVŮ NA VÝKON FOTOVOLTAICKÝCH PANELEŮ .....	30



---

<b>4 NÁVRH FOTOVOLTAICKÉHO SYSTÉMU V DANÉ LOKALITĚ .....</b>	<b>31</b>
<b>4.1 VÝPOČET IDEÁLNÍHO NAKLONĚNÍ FOTOVOLTAICKÉHO PANELU VŮČI HORIZONTÁLNÍ ROVINĚ .....</b>	<b>31</b>
<b>4.2 STACIONÁRNÍ PANEL S PEVNÝM NAKLONĚNÍM V HORIZONTÁLNÍ ROVINĚ .....</b>	<b>32</b>
<b>4.3 FOTOVOLTAICKÝ PANEL SE SKOKOVOU SEZÓNÍ ZMĚNOU ÚHLU NAKLONĚNÍ VŮČI HORIZONTÁLNÍ OSE.....</b>	<b>33</b>
<b>4.4 STATISTIKA PARAMETRŮ NA KONKRÉTNÍM MÍSTĚ .....</b>	<b>34</b>
<b>5 LABORATORNÍ EXPERIMENTY .....</b>	<b>36</b>
<b>5.1 ZADÁNÍ A CÍLE EXPERIMENTU.....</b>	<b>36</b>
<b>5.2 POSTUP .....</b>	<b>36</b>
5.2.1 MĚŘENÍ V-A CHARAKTERISTIKY .....	36
5.2.2 MĚŘENÍ ZÁVISLOSTI VÝKONU PANELU NA ÚHLU NATOČENÍ V OBOU OSÁCH .....	36
<b>5.3 TEORETICKÝ ROZBOR.....</b>	<b>37</b>
<b>6 REALIZACE NAVRŽENÝCH EXPERIMENTŮ .....</b>	<b>39</b>
<b>6.1 MONOKRYSTALICKÝ KŘEMÍK .....</b>	<b>39</b>
6.1.1 V-A A VÝKONOVÁ CHARAKTERISTIKA .....	39
6.1.2 NATÁČENÍ .....	40
<b>6.2 POLYKRYSTALICKÝ KŘEMÍK.....</b>	<b>42</b>
6.2.1 V-A A VÝKONOVÁ CHARAKTERISTIKA .....	42
6.2.2 NATÁČENÍ .....	43
<b>7 VYHODNOCENÍ PROVEDENÝCH EXPERIMENTŮ .....</b>	<b>46</b>
<b>7.1 V-A CHARAKTERISTIKA.....</b>	<b>46</b>
<b>7.2 VÝKONOVÁ CHARAKTERISTIKA .....</b>	<b>46</b>
<b>7.3 NATÁČENÍ FOTOVOLTAICKÉHO PANELU .....</b>	<b>46</b>
<b>7.4 ÚČINNOST MĚŘENÝCH PANELŮ .....</b>	<b>47</b>
<b>7.5 MOŽNÉ CHYBY MĚŘENÍ .....</b>	<b>48</b>
<b>8 ZHODNOCENÍ OPRÁVNĚNOSTI VYUŽITÍ NATÁČECÍCH SYSTÉMŮ .....</b>	<b>49</b>
<b>8.1 VÝKON STACIONÁRNÍHO FOTOVOLTAICKÉHO PANELU .....</b>	<b>49</b>
<b>8.2 NAVÝŠENÍ VÝKONU PANELU NATÁČENÍM V JEDNÉ OSE.....</b>	<b>49</b>
<b>8.3 INSTALAČNÍ PLOCHA.....</b>	<b>50</b>
<b>9 ZÁVĚR .....</b>	<b>51</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>52</b>
<b>PŘÍLOHY.....</b>	<b>54</b>
<b>A PANEL Z MONOKRYSTALICKÉHO KŘEMÍKU .....</b>	<b>54</b>
<b>B PANEL Z POLYKRYSTALICKÉHO KŘEMÍKU.....</b>	<b>56</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1-1 Ilustrace fotovoltaické přeměny, modifikováno z [3] .....	14
Obrázek 1-2 Řez fotovoltaickým panelem a jeho jednotlivé vrstvy, převzato z [5].....	15
Obrázek 1-3 Roční úhrn slunečního záření dopadajícího na horizontální povrch v ČR, převzato z [17].....	17
Obrázek 2-1 Znázornění úhlu $\alpha$ , modifikováno z [21] .....	20
Obrázek 2-2 Grafické znázornění závislosti výkonu stacionárního fotovoltaického panelu na čase pro modelový případ bez uvažování vlivu atmosféry a s vlivem atmosféry.....	20
Obrázek 2-3 Grafické znázornění závislosti výkonu natáčeného fotovoltaického panelu na čase pro modelový případ bez uvažování vlivu atmosféry a s vlivem atmosféry.....	21
Obrázek 2-4 Pasivní natáčecí systém, modifikováno z [20] .....	23
Obrázek 2-5 Nejčastější druhy optoelektrických zařízení, modifikováno z [20].....	23
Obrázek 2-6 Natáčecí systém založený na pomocném oboustranném fotovoltaickém panelu, modifikováno z [20].....	24
Obrázek 2-7 Zapojení fotovoltaických panelů do Wheastonova můstku se stejnosměrným natáčecím motorem v diagonále, modifikováno z [20] .....	24
Obrázek 2-8 Princip natáčení v horizontální ose, převzato z [20] .....	25
Obrázek 3-1 Řez koncentrátorem, převzato z [24].....	27
Obrázek 3-2 Mechanická konstrukce koncentrátoru, převzato z [24] .....	27
Obrázek 4-1 Grafické znázornění maximálního úhlu dopadajících paprsků během roku .....	31
Obrázek 4-2 Znázornění úhlů užívaných při výpočtech, modifikováno z [21].....	32
Obrázek 4-3 Maximální hodnota intenzity slunečního záření v průběhu roku, data získána z [31] .....	34
Obrázek 5-1 V-A charakteristiky fotovoltaického panelu FVP SOLARTEC SG 72-106 pro různé intenzity osvětlení, převzato z [19].....	37
Obrázek 5-2 Výkonové charakteristiky fotovoltaického panelu FVP SOLARTEC SG 72-106 pro různé intenzity osvětlení, převzato z [19].....	37
Obrázek 5-3 Schéma zapojení .....	38
Obrázek 6-1 V-A charakteristika panelu z monokrystalického křemíku .....	39
Obrázek 6-2 Výkonová charakteristika panelu z monokrystalického křemíku.....	40
Obrázek 6-3 Průběh výkonu při úhlu naklonění $5^\circ$ .....	40
Obrázek 6-4 Průběh výkonu při úhlu naklonění $18,5^\circ$ .....	41
Obrázek 6-5 Průběh výkonu při úhlu naklonění $28,5^\circ$ .....	41
Obrázek 6-6 Porovnání průběhů výkonu pro všechny měřené úhly naklonění.....	42
Obrázek 6-7 V-A charakteristika panelu z polykrystalického křemíku .....	42
Obrázek 6-8 Výkonová charakteristika panelu z polykrystalického křemíku.....	43
Obrázek 6-9 Průběh výkonu při úhlu naklonění $5^\circ$ .....	43
Obrázek 6-10 Průběh výkonu při úhlu naklonění $18,5^\circ$ .....	44
Obrázek 6-11 Průběh výkonu při úhlu naklonění $28,5^\circ$ .....	44
Obrázek 6-12 Porovnání průběhů výkonu pro všechny měřené úhly naklonění.....	45

## SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1-1 Průměrné hodnoty elektrické energie za měsíc při plném využití teoretického potenciálu v ČR, data získána z [16] .....</i>	<i>17</i>
<i>Tabulka 3-1 Popis typů oblačnosti, převzato z [28] .....</i>	<i>29</i>
<i>Tabulka 4-1 Průměrné hodnoty maximálních intenzit slunečního záření, celková vyrobená energie a doba provozu fotovoltaického systému EZS 1200Wp, data získána z [31].....</i>	<i>35</i>

## PŘÍLOHY

<i>Tabulka A-1 Naměřené hodnoty pro V-A a výkonovou charakteristiku panelu z monokrystalického křemíku.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabulka A-2 Naměřené hodnoty výkonu pro úhel naklonění 5°.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabulka A-3 Naměřené hodnoty výkonu pro úhel naklonění 18,5°.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabulka A-4 Naměřené hodnoty výkonu pro úhel naklonění 28,5°.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabulka B-1 Naměřené hodnoty pro V-A a výkonovou charakteristiku panelu z polykrystalického křemíku.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabulka B-2 Naměřené hodnoty výkonu pro úhel naklonění 5°.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabulka B-3 Naměřené hodnoty výkonu pro úhel naklonění 18,5°.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabulka B-4 Naměřené hodnoty výkonu pro úhel naklonění 28,5°.....</i>	<i>57</i>

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

$A$	plocha fotovoltaického panelu	(m <sup>2</sup> )
$A_{ak}$	aktivní plocha fotovoltaického panelu	(m <sup>2</sup> )
$A_0$	jednotková plocha fotovoltaického panelu ( $A_0=1 \text{ m}^2$ )	(m <sup>2</sup> )
$AM$	koeficient atmosférické masy	(-)
$C$	koncentrační poměr	(-)
$E$	energie dopadající na povrch panelu	(W)
$FF$	činitel plnění fotovoltaického panelu	(-)
$FF_{monokrystal}$	činitel plnění fotovoltaického panelu z monokrystalického křemíku	(-)
$FF_{polykrystal}$	činitel plnění fotovoltaického panelu z polykrystalického křemíku	(-)
$I$	intenzita slunečního záření při dopadu kolmo na plochu A	(W·m <sup>-2</sup> )
$I_{kor}$	intenzita slunečního záření korigovaná o vliv atmosféry	(W·m <sup>-2</sup> )
$I_m$	proud panelu v pracovním bodě	(A)
$I_{SC}$	proud panelu nakrátko	(A)
$I_{vyuz}$	využitelná intenzita dopadajícího záření	(W·m <sup>-2</sup> )
$N$	solární konstanta	(W·m <sup>-2</sup> )
$P$	výkon fotovoltaického panelu	(W)
$P_{teor}$	teoretický výkon při daném naklonění	(W)
$P_0$	výkon při nulovém úhlu natočení ( $\varphi=0^\circ$ ) pro $\varepsilon_v$	(W)
$P_1$	příkon panelu v pracovním bodě	(W)
$P_2$	výkon panelu v pracovním bodě	(W)
$R_Z$	odpor zátěže	(Ω)
$T$	perioda oběhu Země kolem své osy	(s)
$T_O$	teplota okolí	(K)
$T_S$	teplota Slunce	(K)
$U_m$	napětí panelu v pracovním bodě	(V)
$U_{OC}$	napětí panelu naprázdno	(V)
$W$	celková vyrobená energie fotovoltaického panelu	(J)
$W_{id}$	celková vyrobená energie při sezonní změně úhlu naklonění	(J)
$W_{nat}$	celková energie vyrobená natáčeným fotovoltaickým	(J)
$W_{stac}$	celková energie vyrobená stacionárním panelem	(J)
$Z$	koeficient znečištění atmosféry	(-)
$a_m$	délka panelu z monokrystalického křemíku	(m)
$a_p$	délka panelu z polykrystalického křemíku	(m)
$b_m$	šířka panelu z monokrystalického křemíku	(m)
$b_p$	šířka panelu z polykrystalického křemíku	(m)
$d$	vzdálenost světelného zdroje od fotovoltaického panelu	(m)

$h$	výška světelného zdroje	(m)
$n$	pořadí dne v roce	(-)
$t_d$	délka dne	(s)
$t_1$	čas východu slunce	(s)
$t_2$	čas západu slunce	(s)
$\Phi$	zeměpisná šířka daného místa na Zemi	(°)
$\alpha$	úhel, který svírá dopadající sluneční záření s normálou plochy A	(rad)
$\beta$	úhel naklonění panelu vůči horizontální rovině	(°)
$\delta$	úhel deklinace	(°)
$\varepsilon_v$	odchylka dopadajících paprsků od naklonění panelu v horizontální ose	(°)
$\eta$	účinnost fotovoltaického panelu	(-)
$\eta_e$	účinnost Carnotova tepelného cyklu	(-)
$\eta_{monokrystal}$	účinnost panelu z monokrystalického křemíku	(-)
$\eta_{polykrystal}$	účinnost panelu z polykrystalického křemíku	(-)
$\eta_p$	dílčí účinnost způsobená neschopností křemíku přizpůsobit se spektru slunečního záření	(-)
$\eta_r$	poměr výkonu záření odraženého a výkonu záření dopadajícího	(-)
$\lambda$	vlnová délka	(m)
$\varphi$	úhel mezi dopadajícím zářením a horizontální rovinou	(rad)
$\varphi_m$	úhel daný oběhem Země okolo Slunce tj. výška nad obzorem	(rad)
$\omega$	úhlová rychlost otáčení Země kolem své osy	(rad·s <sup>-1</sup> )
D <sub>1</sub> -D <sub>2</sub>	blokovací diody	
D <sub>3</sub> -D <sub>6</sub>	bypassové diody	
EU	Evropská unie	
M	stejnoseměrný motor pro natáčení systému	
PVF	válcovaný hliníkový plech chráněný proti povětrnostním vlivům polymerní vrstvou	
R <sub>z</sub>	odpor zátěže	

# 1 OBECNÝ ÚVOD DO FOTOVOLTAICKÝCH TECHNOLOGIÍ

V této kapitole jsou uvedeny základní principy funkce a výroby fotovoltaických panelů. Dále jsou zde zmíněny nejběžnější typy fotovoltaických panelů, vhodnost ČR pro jejich umístění i výhody a nevýhody fotovoltaiky obecně.

## 1.1 Úvod

Fotovoltaická energetika ještě do nedávna zažívala významný rozmach, a to především díky různým fiskálním programům podpory výroby energie z obnovitelných zdrojů, které většina zemí zaváděla. Tyto programy byly součástí jednotné strategie Evropské unie na rozvoj obnovitelných zdrojů energie, která měla za cíl zvýšení podílu elektrické energie vyrobené z obnovitelných zdrojů v zemích EU na srovnatelnou úroveň s konvenčními zdroji. Mělo se tak stát především na úkor tepelné elektroenergetiky [1][2].

Díky zavádění nových technologií ve výrobě ceny křemíku stále klesají. Tento fakt napomáhá snaze EU o podporu výroby energie z obnovitelných zdrojů, a přispívá tak k nevídanému rozvoji fotovoltaiky. Nové fotovoltaické elektrárny byly budovány takovým tempem, že jejich připojování mnohdy ohrožovalo stabilitu distribučních sítí, hrozilo navíc skokové zvýšení ceny elektrické energie pro spotřebitele v důsledku vyplácení dotací producentům. Proto v roce 2011 byla podpora fotovoltaiky v České Republice výrazně redukována [1][2].

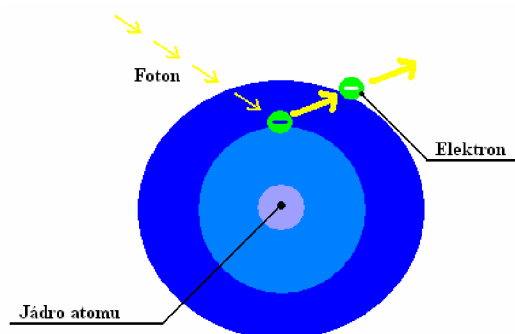
Bylo by tedy vhodné zvážit, zda by efektivita provozu stávajících fotovoltaických panelů nešla zvýšit. Práce se proto zabývá analýzou oprávněnosti využití natáčecích zařízení pro fotovoltaické systémy v dané lokalitě. Okrajově pak i jinými metodami zvýšení výkonu fotovoltaických panelů.

## 1.2 Princip fotovoltaické přeměny

Fotovoltaický jev vzniká při dopadu slunečního záření na vhodný materiál, kdy dochází k pohlcení fotonu a následně ke generaci páru elektron-díra. V polovodiči tak vznikají volné elektrické náboje, které jsou přechodem PN separovány a nemohou tak svévolně rekombinovat. Zadní plocha panelu bývá tvořena celoplošným kontaktem, na kterém se hromadí díry. Na tomto kontaktu tedy vzniká tedy kladný potenciál. Naopak elektrony se shromažďují na záporné elektrodě, která bývá na přední straně panelu. Záporná elektroda má tvar mřížky, aby co nejméně bránila dopadu slunečního záření, a tvoří se na ní záporný potenciál. Rozdíl těchto potenciálů obvykle bývá cca 0,6 V [3][4].

Fotovoltaický článek je složen ze dvou vrstev krystalického křemíku. Vrchní vrstvu plátkového křemíku tvoří většinou polovodič typu N sycený fosforem. Spodní vrstva je tvořena stříbrnou mřížkou obohacenou hliníkem, který při výrobě proniká do křemíku, čímž vzniká polovodič typu P [3][4].

Fotovoltaický jev ilustruje *Obrázek 1-1* [3].



*Obrázek 1-1 Ilustrace fotovoltaické přeměny, modifikováno z [3]*

Po připojení do elektrického obvodu začnou ihned elektrony vyrovnávat rozdíl potenciálů, což znamená, že začnou proudit z vrchní vrstvy N do spodní vrstvy P. Zdrojem energie v tomto případě je sluneční záření [3][4].

### 1.3 Fotovoltaické panely

Téměř jediným materiálem pro výrobu fotovoltaických panelů je v dnešní době křemík, a to především pro své značné výhody. Křemík je druhý nejrozšířenější prvek v zemské kůře, především ve formě křemene ( $\text{SiO}_2$ ). Křemík v surovém stavu se vyrábí z křemenného písku redukcí uhlíkem. Proces probíhá v obloukové peci. Nejjednodušší chemické rovnice těchto dějů lze vyjádřit [5][6].



Takto vyrobený surový křemík hutní kvality je čistý asi jen z 99 %, zbývající 1 % obvykle tvoří příměsi Fe, Al a C. Křemík této čistoty je však pro výrobu polovodičů nepoužitelný, je tedy nutné ho vyčistit a vyrobit tak finální polotovar, který již bude vhodný k výrobě polovodičů [5][6].

Před asi 20 lety vznikl nový jednostupňový výrobní proces, který umožňuje produkci velmi čistého křemíku, který je již vhodný i pro fotovoltaické články. Výrobní náklady představují asi desetinu nákladů nutných pro jiné metody. Výroba spočívá ve využití odpadního produktu v průmyslu fosfátových hnojiv  $\text{Na}_2[\text{SiF}_6]$ , který se redukuje kovovým sodíkem. Taková reakce je silně exotermická, nevyžaduje tedy žádnou spotřebu paliva [5][6].

#### 1.3.1 Křemík

Křemík vhodný pro výrobu fotovoltaických článků se v podstatě dělí na dva druhy.

### 1.3.1.1 Polykrystalický křemík

Polykrystalické články sestávají z více krystalů křemíku, které bývají různě veliké. Princip výroby spočívá v odlévání vrstvy křemíku, což sice znamená menší výrobní náklady a rychlou produkci, ale tento křemík je méně čistý. Také účinnost těchto panelů je nižší, zpravidla nepřesahuje (13 – 15) %. Poněkud lepší účinnosti dosahují při difúzním záření, což je předurčuje pro použití na stacionárním panelu [5][6].

### 1.3.1.2 Monokrystalický křemík

Monokrystalické články se skládají prakticky z jednoho krystalu křemíku. Princip výroby spočívá v tažení z roztaveného křemíku, nejčastěji ve tvaru tyčí. Tyto tyče se pak řezou na tenké plátky. Současné technologie však umožňují produkci přímo tenkých pásů. Při dostatečném osvětlení mají články vyšší účinnost než při použití polykrystalického křemíku. Článek z monokrystalického křemíku o ploše 100 cm<sup>2</sup> je schopen dodávat proud (3-4) A. Účinnost těchto článků bývá (14 – 17) %. Tyto články hůře využívají difúzní světelné záření. Jsou proto vhodné zejména na natáčecí zařízení [5][6].

### 1.3.2 Amorfnní články

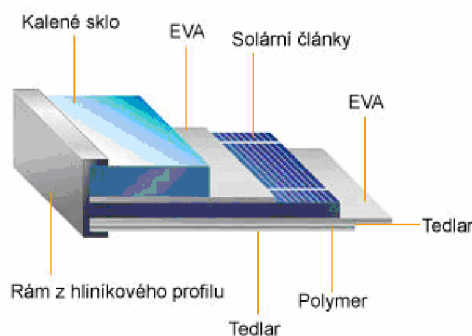
Struktura těchto článků již není krystalická, ale spíše sklovitá. Výroba spočívá v napařování na vhodný podklad. Křemík vyrobený tímto způsobem ale obsahuje určité procento vodíku, což způsobuje menší stabilitu a postupnou degradaci vlastností. Účinnost těchto článků se pohybuje mezi 5 % až 7 % [5][6].

### 1.3.3 Další materiály

Arsenid Galia (GaAs) má vyšší účinnost (20 %), je odolnější proti kosmickému (tvrdému) záření a je schopen pracovat i při teplotách nad 100 °C. Arsenid Galia je ale dražší [5][6].

Sírník kademnatý (CdS) dosahuje účinnosti 10 %, je lehčí (kosmické aplikace), je ale méně stabilní. V kombinaci s teluridem kademnatým (systém CdS - CdTe) je schopen napájet pouze zařízení s malým výkonem. Řez fotovoltaickým panelem je na obrázku 1-2 [5][6].

Řez fotovoltaickým panelem je na *Obrázek 1-2* [5].



Obrázek 1-2 Řez fotovoltaickým panelem a jeho jednotlivé vrstvy, převzato z [5]



## 1.4 Legislativa

Převážnou část problematiky výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů upravují tyto normy:

- Zákon č. 180/2005 Sb. o podpoře výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů energie:

*„Tento zákon upravuje v souladu s právem Evropských společenství způsob podpory výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů energie a z důlního plynu z uzavřených dolů a výkon státní správy a práva a povinnosti fyzických a právnických osob s tím spojené [7].“*

- Zákon č. 458/2000 Sb. o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích (Energetický zákon) [8].
- Vyhláška ERÚ č. 475/2005 Sb., Vyhláška ERÚ č. 541/2005 Sb. a Vyhláška ERÚ č. 150/2007 Sb. [9][10][11].

Energetický regulační úřad (dále jen „Úřad“) stanoví podle § 98 odst. 7 zákona č. 458/2000 Sb., o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (Energetický zákon), ve znění zákona č. 670/2004 Sb., a podle § 12 odst. 3 zákona č. 180/2005 Sb., o podpoře výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů energie a o změně některých zákonů (zákon o podpoře využívání obnovitelných zdrojů), k provedení § 17 odst. 7 písm. c) Energetického zákona a § 4 odst. 10 zákona o podpoře využívání obnovitelných zdrojů [12][13].

Tato vyhláška stanoví termíny a podrobnosti výběru způsobu podpory elektřiny vyrobené z obnovitelných zdrojů, termíny oznámení záměru nabídnout elektřinu vyrobenou z obnovitelných zdrojů k povinnému výkupu a technické a ekonomické parametry [12][13].

Koncem roku 2010 byla schválena novela zákona č. 180/2005 Sb. o podpoře výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů energie. Týká se fotovoltaických elektráren uvedených do provozu v letech 2009-2010. Na elektrickou energii vyrobenou těmito elektrárnami je po dobu tří let od uvedení do provozu uvalena daň 26 %. Dosud bezplatné emisní povolenky nově podléhají 32% dani a navíc se zvýšily poplatky za zábor zemědělské půdy. Stalo se tak v reakci na extrémní rozvoj fotovoltaiky a hrozbě skokového zdražení elektrické energie [7][14].

### 1.4.1 Zelený bonus

*„Zelený bonus je příplatek k tržní ceně elektřiny, který může získat výrobce elektřiny z obnovitelných zdrojů energie. Výrobce prodává vyrobenou elektřinu konečnému zákazníkovi nebo obchodníkovi s elektřinou, navíc má právo od provozovatele regionální distribuční soustavy inkasovat zelené bonusy. Výhodou je dosažení vyššího výnosu než v případě režimu výkupních cen. Nevýhodou je určitá míra nejistoty, protože výrobce si musí sám hledat odběratele vyrobené elektřiny a nemá zaručen odběr 100 % vyrobené elektřiny tak jako v případě výkupních cen [12][13].“*

## 1.4.2 Výkupní cena

Výkupní cena je částka, kterou provozovatel regionální distribuční soustavy platí výrobcí elektřiny. Prodávat lze pouze veškerou vyrobenou elektrickou energii. Změna systému zelených bonusů na systému výkupních cen a naopak je možná pouze jednou ročně. Tyto případné změny na další kalendářní rok je přitom nutné nahlásit provozovateli regionální distribuční soustavy nejpozději do 30. listopadu příslušného kalendářního roku. Takto zvolený způsob podpory pak nabývá platnosti 1. ledna následujícího kalendářního roku [12][13].

Výkupní cena je garantována na 20 let dopředu a případný meziroční nárůst je s ohledem na index cen průmyslových výrobců minimálně 2 % a maximálně 4 %. Zelený bonus je garantován na 1 rok [12][13].

## 1.5 Vhodnost ČR pro fotovoltaické systémy

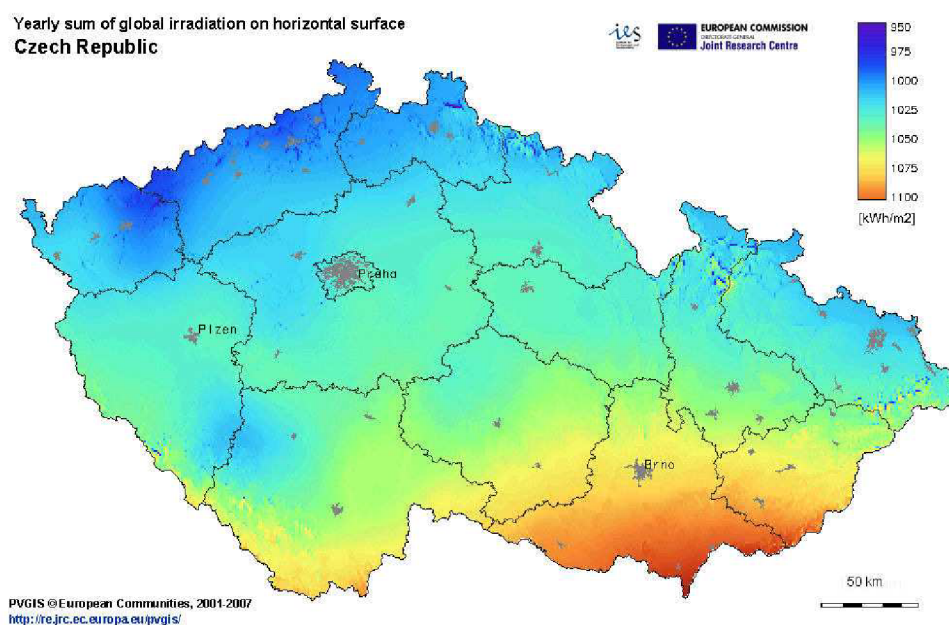
Na zemský povrch v České republice dopadá sluneční záření o průměrné intenzitě  $800 \text{ W m}^{-2}$ . Tato hodnota je však silně ovlivněna místními klimatickými podmínkami. Za rok tedy na  $1 \text{ m}^2$  našeho území dopadne energie  $1000\text{--}1250 \text{ kWh m}^{-2}$ , přičemž průměr pro ČR je  $1081 \text{ kWh m}^{-2}$ . V našich podmínkách je fotovoltaický systém s výkonem 1 kW ročně schopen vyrobit  $900\text{--}1000 \text{ kWh}$  elektrické energie [15][6].

Průměrné hodnoty elektrické energie vyrobené za jednotlivé měsíce jsou uvedeny v *Tabulka 1-1* [16].

*Tabulka 1-1 Průměrné hodnoty elektrické energie za měsíc při plném využití teoretického potenciálu v ČR, data získána z [16]*

	leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec
<i>E</i> (GWh)	280	490	1150	1190	1440	1395	1440	1310	870	500	220	200

Roční úhrn slunečního záření dopadajícího na horizontální povrch v ČR je na *Obrázek 1-3* [17].



*Obrázek 1-3 Roční úhrn slunečního záření dopadajícího na horizontální povrch v ČR, převzato z [17]*

## 1.6 Výhody a nevýhody fotovoltaických panelů

Mezi hlavní výhody fotovoltaických technologií obecně patří jednoznačně ekologie provozu, protože neprodukuje žádné znečišťující látky. Na druhé straně, ekologická likvidace těchto panelů vyžaduje docela vysoké náklady. Tavení křemíku při výrobě těchto panelů je navíc velice energeticky náročné [1].

Fotovoltaické panely nevyžadují zásadní údržbu, existují ale faktory (sníh, padající listí, prach a jiné), které snižují jejich účinnost, pro zachování optimálních provozních podmínek je tedy do jisté míry údržba nutná [1][6].

Fotovoltaika představuje ekologickou alternativu ke stávajícím zdrojům elektrické energie. V nedávné minulosti byla podporována státními dotacemi. Tato snaha byla mnohdy až zneužita, k instalaci fotovoltaických systémů je využívána úrodná půda a původní záměr využít v tomto směru nevyužitě zastavěné plochy vyšel vniveč. Je také třeba podotknout, že instalace těchto systémů i jimi vyrobená energie je relativně drahá, a bez státních pobídek by fotovoltaika byla z ekonomického hlediska nezajímavá [1][6].

Instalace fotovoltaických systémů podporuje celosvětovou snahu o rozptýlení menších zdrojů elektrické energie místo velkých elektráren. Při připojení do distribuční sítě může napomáhat efektivnějšímu využití vyrobené energie, protože může být spotřebována víceméně v místě výroby [1][18].

Není třeba zdůrazňovat, že z principu funkce fotovoltaických panelů je zřejmé, že v noci žádnou energii neprodukují. Je tedy nutné tyto systémy kombinovat se zdroji energie, které jsou schopny pokrýt spotřebu i v noci, nemluvě o tom, že pro případ nepříznivých povětrnostních podmínek je nutné zálohovat celou kapacitu fotovoltaických systémů [1].

Fotovoltaické panely produkují stejnosměrný proud, který je pro připojení do distribuční sítě nutno pomocí střídače převést na střídavý proud, což samozřejmě neprobíhá beze ztrát. Tyto ztráty se pohybují kolem (4-12) %. Střídače navíc produkují i vyšší harmonické síťové frekvence, které je nutno odfiltrovat, protože v distribuční síti způsobují ztráty [1][12].

Konečně, i samotné sluneční záření nepůsobí na materiál fotovoltaického panelu nijak pozitivně. Největší vliv má na křemík, který pod jeho vlivem degraduje, a s časem se tak snižuje výkon fotovoltaického panelu [1][6].

## 2 STACIONÁRNÍ A NATÁČECÍ FOTOVOLTAICKÉ SYSTÉMY

Tato kapitola je věnována stacionárním a natáčecím systémům a energii opadající na povrch těchto panelů. Dále jsou zde popsány způsoby natáčení fotovoltaických panelů, princip činnosti pasivních a aktivních natáčecích systémů.

### 2.1 Stacionární fotovoltaické panely

Při stacionárním uložení fotovoltaických panelů se v průběhu dne i roku mění kolmý průmět plochy panelu. Znamená to, že aktivní plocha fotovoltaického panelu je funkcí času. Vycházíme z předpokladů [19][20]

- 1) Na zemský povrch kolmo dopadá maximální intenzita záření  $I$ , která je přibližně rovna  $1100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$
- 2) Délka dne, po kterou lze využívat dopadající sluneční záření je 12 h (=43200 s, 0 se uvažuje jako poledne, začátek je v čase  $t_1=-21600$  s, konec pak v čase  $t_2=21600$  s)
- 3) Plocha  $A_0$  je jednotková plocha fotovoltaického panelu, která je kolmá ke směru dopadajícího slunečního záření přesně v čase  $t=0$ , tedy v poledne [19][20]

#### 2.1.1 Výkon

Pro výkon platí vztah [19][20]

$$P = I \cdot A_{ak} \cdot \eta \quad (2.1)$$

kde  $P$  je výkon panelu (ve W),  $I$  je intenzita slunečního záření při dopadu kolmo na plochu  $A$  (ve  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ),  $A_{ak}$  je aktivní plocha fotovoltaického panelu (v  $\text{m}^2$ ) a  $\eta$  je účinnost fotovoltaického panelu (-).

Budeme-li intenzitu slunečního záření  $I$  považovat pro modelový případ za konstantní a aktivní plochu fotovoltaického panelu za [19][20]

$$A_{ak} = A_0 \cdot \cos \alpha \quad (2.2)$$

kde  $A_0$  je jednotková plocha fotovoltaického panelu ( $A_0=1 \text{ m}^2$ ) a  $\alpha$  je úhel, který svírá dopadající sluneční záření s normálou plochy  $A$  (v rad).

Přitom úhel  $\alpha$  lze vyjádřit pomocí úhlové frekvence  $\omega$ , pro kterou platí [19][20]

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{(24 \cdot 60 \cdot 60)\text{s}} = \underline{\underline{7,2722 \cdot 10^{-5} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}}} \quad (2.3)$$

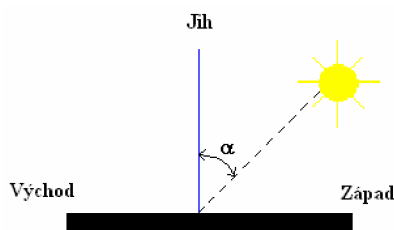
kde  $\omega$  je úhlová rychlost otáčení Země kolem své osy (v  $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ) a  $T$  je perioda oběhu Země kolem své osy (v s).

Úhel  $\alpha$  je dán vztahem [19][20]

$$\alpha = \omega \cdot t \quad (2.4)$$

kde  $t$  je čas (v s).

Úhel  $\alpha$  je znázorněn na *Obrázek 2-1* [21].

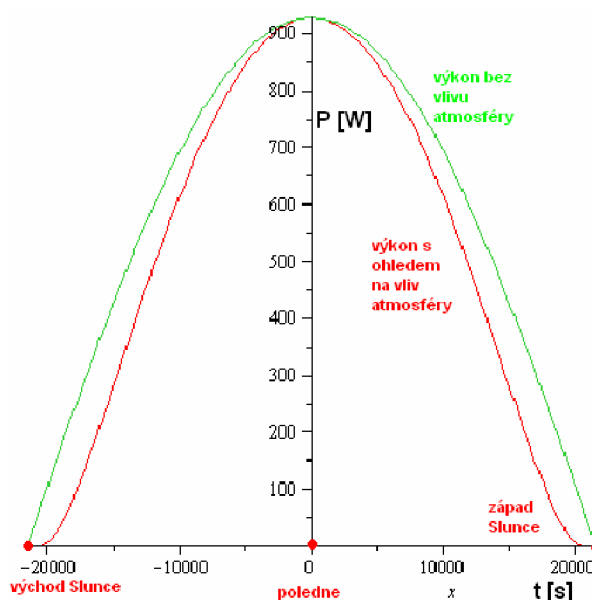


*Obrázek 2-1* Znázornění úhlu  $\alpha$ , modifikováno z [21]

Konečná závislost výkonu  $P$  na čase  $t$  je [19][20]

$$P = I \cdot A \cdot \cos \omega \cdot t \cdot \eta \quad (2.5)$$

Grafické znázornění vztahu (2.5) je na *Obrázek 2-2*.



*Obrázek 2-2* Grafické znázornění závislosti výkonu stacionárního fotovoltaického panelu na čase pro modelový případ bez uvažování vlivu atmosféry a s vlivem atmosféry

### 2.1.2 Celková vyrobená energie

Celková vyrobená energie je dána vztahem [19][20]

$$W_{stac} = \eta \cdot \int_{t_1}^{t_2} I \cdot A_{ak} dt \quad (2.6)$$

kde  $W_{stac}$  je celková energie vyrobená stacionárním panelem (v J),  $A_{ak}$  je aktivní plocha fotovoltaického panelu (v  $m^2$ ),  $t_1$  čas východu slunce (v s) a  $t_2$  čas západu slunce (v s).

Výše uvedený vztah lze vyjádřit i

$$W_{stac} = \frac{2 \cdot I \cdot A_0}{\omega} \cdot \eta \quad (2.7)$$

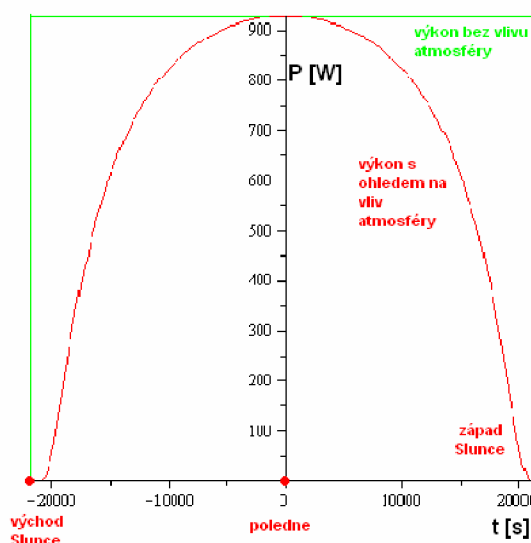
## 2.2 Fotovoltaické panely na natáčecích systémech

### 2.2.1 Výkon

Pro modelový výpočet výkonu fotovoltaického panelu platí stejné předpoklady jako v případě stacionárního panelu. Důsledkem natáčení je aktivní plocha fotovoltaického panelu víceméně konstantní, stejně tak podle předpokladu i intenzita slunečního záření, výpočet se tak zjednoduší na [19][20]

$$P = I \cdot A_0 \cdot \eta \quad (2.8)$$

Grafické znázornění vztahu (2.9) je na Obrázek 2-3.



Obrázek 2-3 Grafické znázornění závislosti výkonu natáčeného fotovoltaického panelu na čase pro modelový případ bez uvažování vlivu atmosféry a s vlivem atmosféry

### 2.2.2 Celková vyrobená energie

Celková vyrobená energie je pro ideální případ dána vztahem [19][20]

$$W_{nat} = \eta \cdot I \cdot A_0 \cdot (t_2 - t_1) \quad (2.9)$$

kde  $W_{nat}$  je celková energie vyrobená fotovoltaickým panelem umístěným na natáčecím systému během dne (v J)

Porovnání vyrobené energie stacionárním panelem a panelem na natáčecím systému [19][20]

$$\frac{W_{nat}}{W_{stac}} = \frac{\omega \cdot (t_2 - t_1)}{2} \quad (2.10)$$

Navýšení energie umístěním panelu na natáčecí systém je závislé pouze na délce dne, a během roku se tak mění přímo úměrně s délkou dne. Pro modelový den, odpovídající jarní a podzimní rovnodennosti, kdy je délka dne zhruba 12h, je poměr těchto dvou výkonů

$$\frac{W_{nat}}{W_{stac}} = \frac{\omega \cdot (t_2 - t_1)}{2} = \frac{7,2722 \cdot 10^{-5} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot [21600 \text{ s} - (-21600 \text{ s})]}{2} = \underline{\underline{157,08\%}} \quad (2.11)$$

Pro léto

$$\frac{W_{nat}}{W_{stac}} = \frac{\omega \cdot (t_2 - t_1)}{2} = \frac{7,2722 \cdot 10^{-5} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot [29490 \text{ s} - (-29490 \text{ s})]}{2} = \underline{\underline{214,46\%}} \quad (2.12)$$

Pro zimu

$$\frac{W_{nat}}{W_{stac}} = \frac{\omega \cdot (t_2 - t_1)}{2} = \frac{7,2722 \cdot 10^{-5} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot [14520 \text{ s} - (-14520 \text{ s})]}{2} = \underline{\underline{105,59\%}} \quad (2.13)$$

## 2.3 Způsoby natáčení fotovoltaických panelů

Natáčeční systémy mají za úkol přizpůsobovat během dne a některé i během roku pozici fotovoltaického panelu vůči Slunci. To má za následek zvýšení výkonu takového panelu, přináší však i řadu aspektů, které je třeba uvažovat. Mezi ně patří např. pořizovací náklady, provozní náklady, spolehlivost, spotřeba elektrické energie, nutná údržba a konečně i dokonalost a efektivita natáčení. Natáčeční systémy lze dělit [20][21]

- a) podle schopnosti kompenzovat změnu pozice Slunce
  - systémy natáčení v jedné ose
  - systémy natáčení v obou osách
- b) podle regulace natáčení
  - pasivní (mechanické) systémy natáčení
  - aktivní systémy natáčení založené na sledování času a pořadí dne v roce
  - aktivní systémy natáčení řízené podle snímané intenzity dopadajícího záření
- c) podle provozu během roku
  - systémy natáčení po celý rok
  - systémy natáčení po celý rok kromě zimy
- d) podle pohybu fotovoltaického systému
  - kontinuální pohyb
  - krokový pohyb

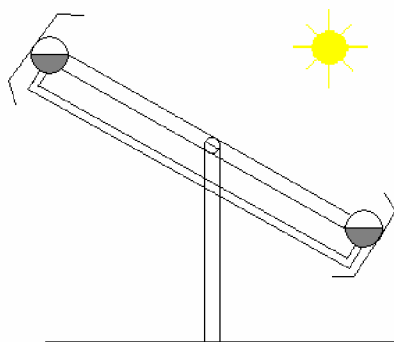
Mezi systémy natáčení by bylo možné zařadit i skokovou změnu úhlu naklonění stacionárního fotovoltaického panelu prováděnou nejčastěji čtyřikrát do roka a to na každé roční období [20][22].

### 2.3.1 Pasivní natáčeční systémy

Pasivní natáčeční systémy jsou založené na tepelné roztažnosti látky, kterou obvykle bývají freony nebo slitiny s tvarovou pamětí. Normálně bývá pohyb zabezpečován více pohony, které pracují proti sobě a to tak, že při stejném osvětlení jsou v rovnováze. Z principu činnosti je tedy zřejmé, že jejich využití je značně omezené, což spolu s menší účinností znamená nevelké rozšíření této technologie mezi uživateli [20][22].

Nevýhodou těchto systémů je, že v porovnání s aktivními systémy natáčení mají menší účinnost, navíc při nižších teplotách přestávají fungovat. Výhodou je jejich nízká cena [20][22].

Příklad pasivního natáčečního systému je na *Obrázek 2-4* [20].



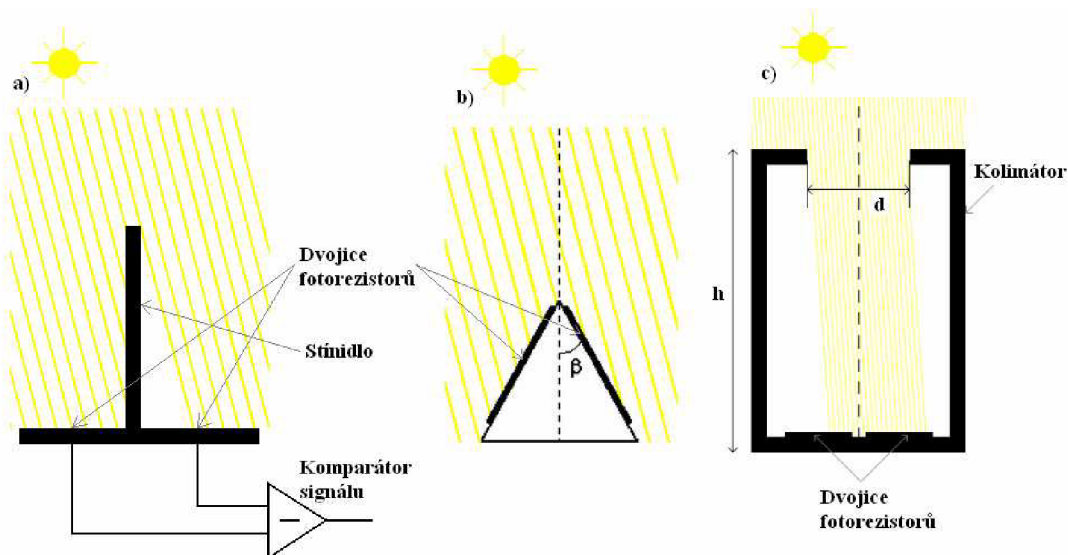
Obrázek 2-4 Pasivní natáčecí systém, modifikováno z [20]

## 2.3.2 Aktivní natáčecí systémy

### 2.3.2.1 Mikroprocesorové natáčecí systémy

Tyto systémy pracují na základě aktivního zjišťování polohy Slunce pomocí optoelektronických zařízení, které vyhodnocují aktuální úhel natočení a mikroprocesor pak změní natočení tak, aby pozice panelu vůči Slunci byla co nejeefektivnější [20][22].

Nejčastější zapojení optoelektrických zařízení je na Obrázek 2-5 [20].



Obrázek 2-5 Nejčastější druhy optoelektrických zařízení, modifikováno z [20]

Nejčastější použití má varianta a), pro zvýšení citlivosti se používá konfigurace b) a v aplikacích s koncentrátorovými fotovoltaickými panely používáme variantu c), kdy je jako stínidlo použita kolimační trubice, která zabraňuje vstupu difúzního záření na plochu senzoru. Obecně lze říci, že všechna tři zapojení by se principiálně dala použít pro jakýkoliv panel, největší opodstatnění mají přece jenom pro koncentrátorové fotovoltaické panely [20][22].

Optoelektrická zařízení bývají složena z dvojice antiparalelně zapojených fotorezistorů, nebo přímo fotovoltaických článků, které jsou konstruovány tak, aby při dopadajícím záření docházelo k rozdílnému osvětlení obou fotorezistorů a tvořilo se tak na nich rozdílné napětí. Tento rozdíl je pak vyhodnocován řídicí elektronikou, která vyše řídící signál motoru, který natočí panel tak, aby rozdíl napětí na fotorezistorech byl blízký nule [20][22].

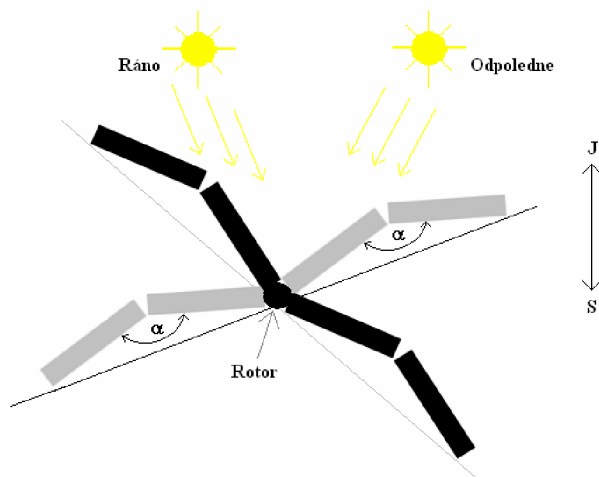
Výhodou těchto zařízení je vysoká přesnost, zvláště při použití s koncentrátorovými panely. Nevýhodou je však jejich složitost a i přes jejich vysokou cenu malá spolehlivost [20][22].



### 2.3.2.2 Systémy založené na pomocném oboustranném fotovoltaickém panelu

Pomocné fotovoltaické články jsou přímo připojeny na stejnosměrný motor, který je umístěn na rotační ose systému, kterou může otáčet oběma směry [20][22].

Příklad systému s oboustranným fotovoltaickým panelem je na *Obrázek 2-6* [20].

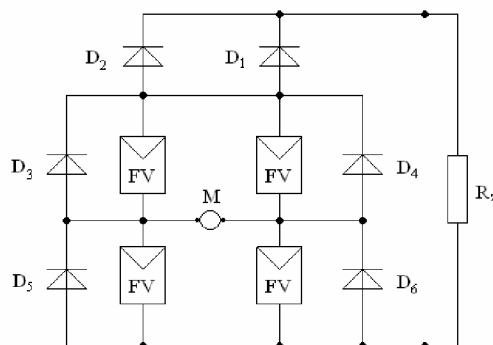


*Obrázek 2-6* Natáčecí systém založený na pomocném oboustranném fotovoltaickém panelu, modifikováno z [20]

Tento systém má čtyři fotovoltaické moduly instalované přímo na rotor. Sklon rotační osy v axiálním směru je možné manuálně napevno (pro danou sezónu) nastavit na  $23^\circ$ ,  $34^\circ$  nebo  $45^\circ$ . Fotovoltaické panely jsou rozdělené do dvou dvojic a úhel, který mezi sebou svírají, je  $170^\circ$ . Panely podle situace slouží jak na snímání polohy, tak pro výrobu energie [20][22].

Hlavní princip těchto zařízení spočívá v tom, že panely jsou zapojeny do Wheastonova můstku. V případě, že výstupní napětí všech čtyř fotovoltaických panelů není stejné, vzniká na stejnosměrném natáčecím motoru napětí úměrné rozdílu výstupních napětí panelů. To způsobí pohyb motoru tak, že se zařízení otočí do efektivnější polohy. V ten moment je výstupní napětí fotovoltaických panelů takřka stejné, v diagonále Wheastonova můstku nevzniká žádné napětí, a motor se tak přestane otáčet [20][22].

Zapojení fotovoltaických panelů do Wheastonova můstku je zobrazeno na *Obrázku 2-7* [20].



*Obrázek 2-7* Zapojení fotovoltaických panelů do Wheastonova můstku se stejnosměrným natáčecím motorem v diagonále, modifikováno z [20]

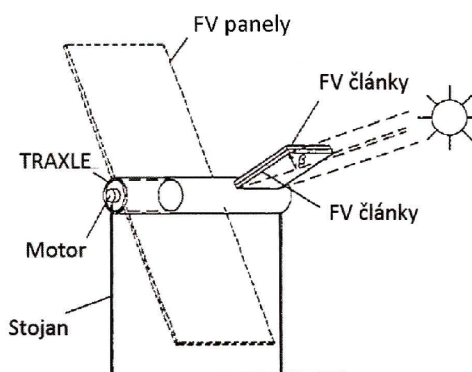
Na *Obrázek 2-7* FV představuje fotovoltaické panely,  $D_1$  a  $D_2$  jsou blokové diody,  $D_3 - D_6$  jsou bypasse diody, M je stejnosměrný motor pro natáčení systému a  $R_z$  je odpor zátěže [20][22].

Výhodou je, že výstupní napětí fotovoltaických panelů večer a ráno je prakticky stejné, na rozdíl od stacionárního uložení. Získáme tak o 30 % víc energie [20][22].

Další variantou natáčení je uspořádání, kde pomocné fotovoltaické články jsou přímo připojené na reverzibilní stejnosměrný motor. Oboustranný fotovoltaický článek je umístěn na rotační ose, která je orientovaná severojižně s přesností na 10 %. Plocha pomocného fotovoltaického článku bývá zpravidla kolem 2 % plochy hlavních natáčených fotovoltaických panelů [20][22].

Výhodou těchto zařízení je, že takto můžeme získat až o 40 % více energie oproti stacionárnímu uložení panelů [20][22].

Princip natáčení v horizontální ose je naznačen na *Obrázek 2-8* [20].



*Obrázek 2-8 Princip natáčení v horizontální ose, převzato z [20]*

### 2.3.2.3 Natáčeční systémy založené na sledování času a pořadí dne v roce

Tyto systémy pracují na principu sledování času a data počítačem nebo procesorem, který následně pomocí algoritmu určuje pozici Slunce na obloze. Algoritmus navíc zohledňuje geografickou polohu a řídí samotné natáčení [20][22].

Možná je i kombinace předešlého systému se senzory. Senzory získávají data, která jsou pak porovnávána s údaji z databáze popisující pozici Slunce během roku. Vyhodnocováním údajů z předešlých dnů lze navíc dosáhnout vysoké přesnosti natáčení, protože tento systém dokáže stanovit i sebemenší odchylku od ideálního stavu a provést tak potřebné kroky ke korekci natočení [20][22].

Nevýhodou těchto systémů je, že systémy bez senzorů natáčí panely i při malém osvětlení hlavních fotovoltaických panelů, čímž může spotřebovat více energie, než vyrobí. Je tedy nutné za nepříznivých povětrnostních podmínek natáčení omezit, což lze výhodně řešit právě kombinací se senzory [20][22].

### 3 TEORETICKÉ ZVÝŠENÍ VÝKONU

Tato kapitola je věnována možnostem zvýšení výkonu fotovoltaického panelu. Zabývá se vlivem atmosféry na sluneční záření i možnostmi využití koncentrátorů. Dále se zabývá faktory ovlivňující výkon fotovoltaického panelu.

#### 3.1 Intenzita slunečního záření uvažovaná pro reálnou situaci

V reálné situaci je však intenzita dopadajícího slunečního záření velmi proměnná v závislosti na lokalitě a na vlivu atmosféry. Při východu i západu Slunce prochází sluneční záření mnohem tlustší vrstvou vzduchu než při kolmém záření, tedy v poledne, kdy se vliv atmosféry projevuje nejméně. Tento vliv respektuje koeficient atmosférické masy, který značíme  $AM$ . Tento koeficient je definován [21][23]

$$AM = \frac{1}{\sin \varphi} \quad (3.1)$$

kde  $AM$  je koeficient atmosférické masy (-) a  $\varphi$  je úhel mezi dopadajícím zářením a horizontální rovinou (v rad).

V modelovém příkladě však máme definovaný úhel, který svírá dopadající sluneční záření s normálou plochy  $A$ . Úhel  $\varphi$  je dále závislý na úhlu  $\varphi_m$ , který je daný změnou pozice Slunce v důsledku změny ročních období (oběhem okolo Slunce). Za úhel  $\varphi$  tedy dosadíme [21][23]

$$\varphi = \left( \frac{\pi}{2} - \alpha \right) \cdot \sin \varphi_m \quad (3.2)$$

kde  $\varphi_m$  úhel daný oběhem země okolo Slunce tj. „výška“ slunce nad obzorem daná ročním obdobím) (v rad).

Po dosazení vztahu (3.1) do vztahu (3.2) dostaneme [21][23]

$$AM = \frac{1}{\sin \left( \left( \frac{\pi}{2} - \omega \cdot t \right) \cdot \sin \varphi_m \right)} \quad (3.3)$$

Intenzita slunečního záření dopadající na zemský povrch korigovaná o vliv atmosféry je určena empirickým vztahem [21][23]

$$I_{kor} = N \cdot 0,7^{AM} \quad (3.4)$$

kde  $I_{kor}$  je intenzita slunečního záření dopadající na zemský povrch korigovaná o vliv atmosféry (ve  $W \cdot m^{-2}$ ).

Tuto intenzitu slunečního záření budeme dále uvažovat jako výchozí pro reálné výpočty, přičemž její maximální hodnota  $I_{kor,max}$  nastane při maximální hodnotě  $\varphi_m=63,5^\circ$ , tedy v den letního slunovratu 21. června a při  $t=0$ , tedy v poledne. Bude tedy rovna [21][23]

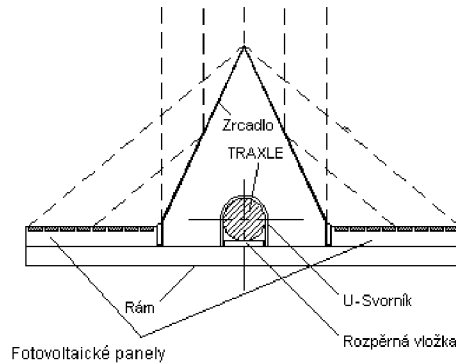
$$I_{kor,max} = N \cdot 0,7^{\frac{1}{\sin \left( \frac{\pi}{2} \cdot \sin \left( \frac{63,5 \cdot 180}{\pi} \right) \right)}} = \underline{\underline{622,53 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}} \quad (3.5)$$

kde  $I_{kor,max}$  je maximální intenzita slunečního záření dopadající na zemský povrch korigovaná o vliv atmosféry pro reálné případy (ve  $W \cdot m^{-2}$ ).

### 3.2 Koncentrátory

Další možností zvýšení výkonu je tzv. koncentrátor. Koncentrátor je zařízení složené nejčastěji ze dvou rovinných zrcadel, která jsou sestavena do tvaru písmene V a svírají mezi sebou ostrý úhel. Koncentrátor se pak umísťuje doprostřed rámu nosné konstrukce a fotovoltaické panely po obou jeho stranách [24].

Řez koncentrátorem je na *Obrázek 3-1* [24].

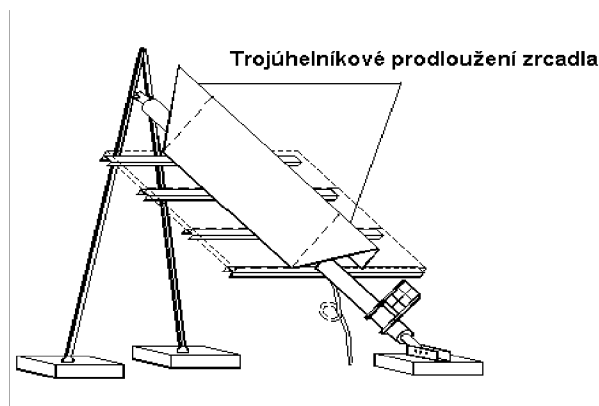


*Obrázek 3-1* Řez koncentrátorem, převzato z [24]

Znázorněný koncentrátor je hřebenového typu (cca  $C=1,6$ ), který nevyžaduje žádná vnější zrcadla. Momenty sil tvořené větrem jsou proto mnohem menší než u staršího a dnes již méně používaného V-žlabového koncentrátoru. Ten sice má vyšší koncentrační poměr (cca  $C=2,4$ ), ale právě proto také způsobuje degradaci zapouzdření panelů a jejich vyšší provozní teplotu, což výrazně snižuje účinnost fotovoltaické přeměny. Proto nové koncentrátory hřebenového typu (bez vnějších zrcadel) umožňují výrazně lepší proudění vzduchu kolem kolektoru a dosahujeme tak u nich mnohem lepšího chlazení [24].

Pro zajištění homogenního osvětlení fotovoltaických panelů i při sezónních změnách úhlu, který svírá rovina pohybu Slunce po obloze s horizontální rovinou, se používá trojúhelníkového prodloužení na obou krajích. U natáčecích systémů natáčených v jedné ose a s nastavitelným sklonem osy podle ročního období není prodloužené zrcadlo nutné [24].

Mechanická konstrukce koncentrátoru a trojúhelníkové prodloužení zrcadla jsou zobrazeny na *Obrázek 3-2* [24].



*Obrázek 3-2* Mechanická konstrukce koncentrátoru, převzato z [24]

Tato zařízení nevyžadují nijak zvlášť speciální zrcadla, měla by ale odolávat povětrnostním vlivům minimálně po dobu životnosti, která je 10 let. Jejich celková odrazivost pro fotony v

intervalu vlnových délek cca  $\lambda=(300-1100)$  nm by navíc měla být co nevyšší. Jako nejvhodnější materiály se v praxi osvědčily tyto materiály [24]

- postříbřená akrylátová fólie
- hliníkem pokrytá akrylátová fólie
- válcovaný hliníkový plech chráněný proti povětrnostním vlivům polymerní vrstvou (PVF)
- válcovaný plech z nerezavějící oceli se speciální povrchovou úpravou

Nejvhodnější materiál většinou bývá válcovaný hliníkový plech chráněný proti povětrnostním vlivům polymerní vrstvou (PVF) díky poměru odrazivosti a ceny. PVF lak bývá v praxi nahrazován samolepicí PVF fólií. Samotná výroba ohnutého plechového zrcadla je pak zcela jednoduchá [24].

Hřebenový koncentrátor se může použít od dvou malých fotovoltaických panelů (50 W) až do deseti velkých fotovoltaických panelů (120 W), který je pak v suchém slunečném podnebí srovnatelný se stacionární soustavou dvaceti fotovoltaických panelů (120 W). Koncentrátory lze aplikovat jak u jednoosých natáčecích systémů (s vodorovnou i polární osou), tak u dvouosých natáčecích systémů. Velké využití rovněž našly pro aplikace ve vesmíru či za polárním kruhem, a to u natáčecích systémů otočných o celých  $360^\circ$  [24].

Použitím koncentrátorů lze teoreticky navýšit roční množství vyrobené energie o 100 % oproti stacionárnímu uložení fotovoltaických panelů. 100 % bychom dosáhli v suchém a slunečném podnebí (rovníkové oblasti, Austrálie apod.). V našich podmínkách bychom mohli dosáhnout nejvýše 70 % navýšení. Z praktických měření provedených nedaleko Prahy ( $50^\circ$  severní šířky) za jasného červencového dne vyplývá, že použitím koncentrátoru u článku, který běžně vyrobí 6,8 kWh na každý  $m^2$  své plochy za den, zvýšíme množství celkové energie vyrobené tímto článkem o 107 % [24].

### 3.3 Faktory ovlivňující výkon fotovoltaických panelů

#### 3.3.1 Rozdílná impedance panelů

Při sériovém či paralelním řazení má značný vliv rozdílná impedance použitých panelů. Ani použití panelů stejného modelu od téhož výrobce nezaručuje jejich stejné elektrické vlastnosti. Tyto rozdílné impedance způsobují energetické ztráty při zpracování vyrobené energie invertorem. K eliminaci tohoto vlivu se používají speciální optimalizační systémy, které na základě snímané teploty, proudu a napětí panelů s využitím datového centra vytváří virtuální impedance jednotlivých panelů. Výsledkem je vyšší výkon předaný do invertoru. Příkladem takového optimalizačního systému je *Maximizer* [26][27].

#### 3.3.2 Teplotní vliv

S rostoucí teplotou výrazně klesá napětí panelů, což má za následek pokles výkonu. Rozdílná teplota sériově spojených panelů tedy znamená jejich rozdílný výkon, což má opět za následek ztráty při odvodu energie do invertoru. Měřením bylo zjištěno, že účinnost fotovoltaických panelů klesá o  $0,6 \text{ \%} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ . Následkem je, že v období, kdy fotovoltaický panel vyrobí nejvíce energie (v létě), má nejnižší účinnost, a naopak v zimním období má účinnost nejvyšší. Řešením může být hybridní panel, který v sobě kombinuje solární ohřev vody a výrobu elektřiny. Nevýhodou ovšem zůstává fakt, že čím teplejší vodu vyrobíme, tím nižší účinnost bude mít fotovoltaická přeměna [26][27].

V souvislosti s teplotním vlivem na účinnost je třeba také zmínit vliv nehomogenity rozložení teploty na panelu. Ta může mít za následek nadměrné přehřívání jednoho místa, panel by tak parciálně pracoval mimo jmenovité parametry. Výsledný výkon i účinnost tohoto panelu by tedy klesly [26][27].

### 3.3.3 Závada na by-pass diodě

Fotovoltaický panel bývá vybaven by-pass diodou, kterou obvykle tvoří kombinace tří diod. Dojde-li k závadě na této diodě, napětí a tedy i výkon panelu výrazně klesne, a to až o 1/3. Při sériovém řazení panelů má tato závada opět za následek pokles výkonu celého řetězce [26][27].

### 3.3.4 Rozdílné naklonění fotovoltaických panelů

Při sériovém či paralelním řazení fotovoltaických panelů je třeba dbát na to, aby panely v jednom řetězci měly stejné parametry, a to jak elektrické tak i polohové. Při montáži s pevným úhlem naklonění rozdíl jednoho stupně způsobí rozkmitání celého systému. Tato komplikace hrozí zejména při náběhu do provozu (ráno) a při ukončování provozu (pozdě odpoledne) [26][27].

### 3.3.5 Vliv oblačnosti

Oblačnost, neboli stupeň pokrytí oblohy mraky, obecně způsobuje pokles výkonu fotovoltaických panelů, protože stíní sluneční záření. Postupující mrak navíc způsobuje postupné zastiňování a odkrývání panelů řazených do řetězce. Z předešlých vlivů vyplývá, že největší komplikace tvoří „nejslabší článek“ v řetězci. Při postupujícím mraku se tímto „nejslabším článkem“ postupně stávají všechny články, což má méně příznivé následky než zhoršené parametry na jednom článku v řetězci. Může tak dojít nejen k poklesu výkonu, ale i k rozkmitání systému [28][27].

Stupně pokrytí oblohy mraky jsou popsány v *Tabulka 3-1* [28].

*Tabulka 3-1 Popis typů oblačnosti, převzato z [28]*

Stupeň	Slovní označení
0-1	Oblačno
2	Skoro jasno
3	Polojasno, polooblačno
4	Zataženo
5-6	Jasno
7	Malá oblačnost
8	Skoro zataženo

### 3.3.6 Vliv znečištění atmosféry

Stav znečištění atmosféry popisuje Linkeho vztah, jež určuje koeficient znečištění atmosféry  $Z$  [29]

$$Z = \frac{\ln N - \ln I_n}{\ln N - \ln I_c} \quad (3.6)$$

kde  $I_n$  je intenzita dopadající na plochu kolmou ke slunečním paprskům za daného znečištění atmosféry (ve  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) a  $I_c$  je intenzita dopadající na plochu kolmou ke slunečním paprskům za dokonalé čisté atmosféry (ve  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ).

Koeficient znečištění atmosféry dosahuje nejvyšších hodnot (5) ráno a večer, během dne se pohybuje mezi 3-3,5, přičemž mírný nárůst nastává kolem poledne (3,6) [29].

### **3.3.7 Zhodnocení negativních vlivů na výkon fotovoltaických panelů**

Eliminace předešlých vlivů není nereálná, vyžaduje ale buď investici do optimalizačního systému, nebo systematickou kontrolu panelů. Natáčecí systémy pro fotovoltaické elektrárny mohou být vhodným řešením, neboť je v lidských silách měnit úhel natočení, na rozdíl od oblačnosti, teploty či znečištění atmosféry.

## 4 NÁVRH FOTOVOLTAICKÉHO SYSTÉMU V DANÉ LOKALITĚ

V této kapitole jsou uvedeny veličiny potřebné pro návrh fotovoltaického systému v dané lokalitě, a to jak pro stacionární panel, tak i pro panel se sezonní změnou úhlu naklonění.

### 4.1 Výpočet ideálního naklonění fotovoltaického panelu vůči horizontální rovině

Země obíhá okolo Slunce po téměř kruhové dráze s dobou oběhu 365 dní a náklon její osy od normály roviny oběhu je  $23,5^\circ$ . Pro úhel deklinace  $\delta$  platí [21][23]

$$\delta = 23,5^\circ \cdot \sin\left(2\pi \cdot \frac{n-80}{365}\right) \quad (4.1)$$

kde  $\delta$  je úhel deklinace (ve  $^\circ$ ) a  $n$  je pořadí dne v roce (-).

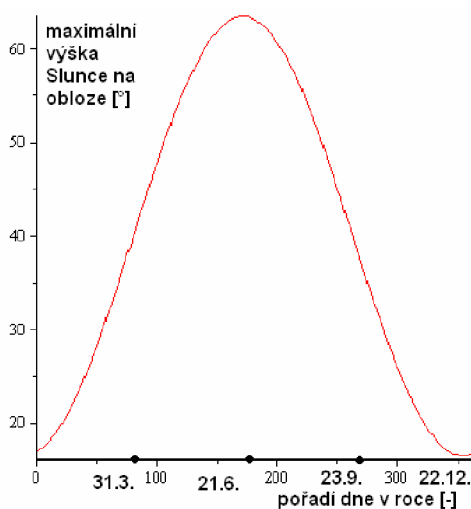
Vezmeme-li horizontální rovinu na povrchu Země o zeměpisné šířce  $\Phi$ , je patrné, že maximální úhel dopadajících paprsků v  $n$ -tém dni v roce  $\varphi_m$  je dán vztahem [21][23]

$$\varphi_m = 90^\circ - \Phi + \delta = 90^\circ - \Phi + 23,5^\circ \cdot \sin\left(2\pi \cdot \frac{n-80}{365}\right) \quad (4.2)$$

kde  $\varphi_m$  je maximální úhel dopadajících paprsků v daném roční období ( $^\circ$ ),  $\Phi$  je zeměpisná šířka daného místa na Zemi ( $^\circ$ ).

Výše uvedené veličiny jsou znázorněny na *Obrázek 4-2* [21].

Grafické znázornění vztahu (4.2) při uvažování  $\Phi=50^\circ$  je na *Obrázek 4-1*.



*Obrázek 4-1* Grafické znázornění maximálního úhlu dopadajících paprsků během roku

Maximální úhel dopadajících paprsků ve dny, kterými začínají roční období, jsou

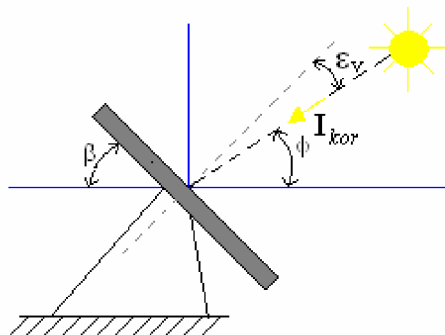
jarní rovnodennost	21. března	( $n=80$ )	$\varphi_m=40^\circ$
letní slunovrat	21. června	( $n=172$ )	$\varphi_m=63,5^\circ$
podzimní rovnodennost	23. září	( $n=266$ )	$\varphi_m=38,6^\circ$
zimní slunovrat	22. prosince	( $n=356$ )	$\varphi_m=16,5^\circ$



Ideální úhel naklonění  $\beta$  lze vyjádřit ze vztahu [21][23]

$$\beta = 90^\circ - \varphi \quad (4.3)$$

kde  $\beta$  je úhel naklonění panelu vůči horizontální rovině ( $^\circ$ ).



Obrázek 4-2 Znárodnění úhlů užívaných při výpočtech, modifikováno z [21]

Ideální úhel naklonění pro jednotlivá roční období by pak byl

jarní a podzimní rovnodennost	21. března a 23. září	$\beta = 90^\circ - 40^\circ = 50^\circ$
letní slunovrat	21. června	$\beta = 90^\circ - 63,5^\circ = 26,5^\circ$
zimní slunovrat	22. prosince	$\beta = 90^\circ - 16,5^\circ = 73,5^\circ$

## 4.2 Stacionární panel s pevným nakloněním v horizontální rovině

Pro využitelnou intenzitu záření dopadajícího na stacionární panel s pevným úhlem naklonění vůči horizontální rovině platí [21][23][29]

$$I_{vyuz} = N \cdot 0,7^{AM} \cdot \cos \varepsilon_v \quad (4.4)$$

kde  $I_{vyuz}$  je využitelná intenzita dopadajícího záření,  $N$  je solární konstanta ( $N = 1327 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) [30] a  $\varepsilon_v$  je odchylka úhlu dopadajících paprsků od úhlu naklonění panelu v horizontální ose (ve  $^\circ$ ).

$\varepsilon_v$  je rovno [21][29]

$$\varepsilon_v = 90^\circ - \beta - \varphi \quad (4.5)$$

Uvažujme panel s úhlem naklonění  $\beta = 45^\circ$ , potom  $\varepsilon_v$  bude rovno [21][29]

$$\varepsilon_v = 90^\circ - 45^\circ - \varphi = 45^\circ - \varphi \quad (4.6)$$

Pro využitelnou intenzitu slunečního záření dopadajícího na tento panel pro jednotlivá roční období platí [21][23]

Jaro a podzim

$$I_{vyuz} = N \cdot 0,7^{\frac{1}{\sin(40^\circ)}} \cdot \cos 5^\circ = \underline{\underline{759 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}} \quad (4.7)$$

Léto

$$I_{vyuz} = N \cdot 0,7^{\frac{1}{\sin(63,5^\circ)}} \cdot \cos(-18,5^\circ) = \underline{\underline{845 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}} \quad (4.8)$$

Zima

$$I_{vyuz} = N \cdot 0,7 \frac{1}{\sin(16,5^\circ)} \cdot \cos 28,5^\circ = \underline{\underline{332 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}} \quad (4.9)$$

Poměr celkové energie vyrobené panelem bez sezónní změny úhlu naklonění a celkové energie vyrobené panelem, jehož úhel naklonění je sezónně měněn je podle vztahu 2.6 pro jednotlivá období [21][23]

Jaro a podzim

$$\frac{W}{W_{id}} = \frac{\eta \cdot 2 \cdot N \cdot 0,7 \frac{1}{\sin(40^\circ)} \cdot \cos 5^\circ \cdot A_0}{\eta \cdot 2 \cdot N \cdot 0,7 \frac{1}{\sin(40^\circ)} \cdot \cos 0^\circ \cdot A_0} = \frac{\cos 5^\circ}{\cos 0^\circ} = \underline{\underline{99,62\%}} \quad (4.10)$$

Léto

$$\frac{W}{W_{id}} = \frac{\eta \cdot 2 \cdot N \cdot 0,7 \frac{1}{\sin(63,5^\circ)} \cdot \cos(-18,5^\circ) \cdot A_0}{\eta \cdot 2 \cdot N \cdot 0,7 \frac{1}{\sin(63,5^\circ)} \cdot \cos 0^\circ \cdot A_0} = \frac{\cos(-18,5^\circ)}{\cos 0^\circ} = \underline{\underline{94,83\%}} \quad (4.11)$$

Zima

$$\frac{W}{W_{id}} = \frac{\eta \cdot 2 \cdot N \cdot 0,7 \frac{1}{\sin(16,5^\circ)} \cdot \cos 28,5^\circ \cdot A_0}{\eta \cdot 2 \cdot N \cdot 0,7 \frac{1}{\sin(16,5^\circ)} \cdot \cos 0^\circ \cdot A_0} = \frac{\cos 28,5^\circ}{\cos 0^\circ} = \underline{\underline{87,88\%}} \quad (4.12)$$

kde  $W_{id}$  celková energie vyrobená panelem za jeden den při sezónní změně úhlu naklonění (v J).

### 4.3 Fotovoltaický panel se skokovou sezónní změnou úhlu naklonění vůči horizontální ose

Pro využitelnou intenzitu slunečního záření dopadajícího na stacionární panel, jehož úhel naklonění vůči horizontální rovině je sezónně (čtyřikrát do roka) sezónně měněn, platí [21]

$$\varepsilon_v = 90^\circ - (90^\circ - \varphi) - \varphi = \underline{\underline{0^\circ}} \quad (4.13)$$

Využitelná intenzita dopadajícího záření pak bude [21][23]

Jaro a podzim

$$I_{vyuz} = N \cdot 0,7 \frac{1}{\sin(40^\circ)} \cdot \cos 0^\circ = I_{kor} = \underline{\underline{762 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}} \quad (4.14)$$

Léto

$$I_{vyuz} = N \cdot 0,7 \frac{1}{\sin(63,5^\circ)} \cdot \cos 0^\circ = I_{kor} = \underline{\underline{891 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}} \quad (4.15)$$

Zima

$$I_{vyuz} = N \cdot 0,7 \frac{1}{\sin(16,5^\circ)} \cdot \cos 0^\circ = I_{kor} = \underline{\underline{378 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}} \quad (4.16)$$

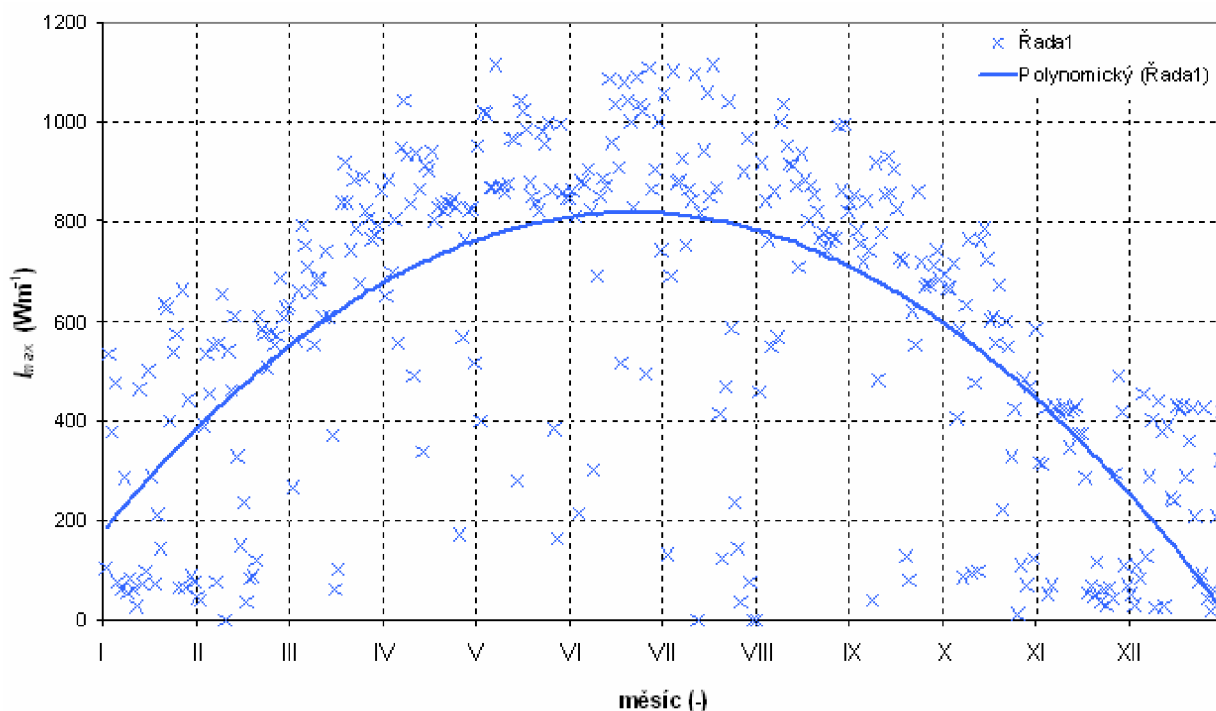
Celková energie vyrobená takovým panelem je podle vztahu 2.6 pro všechna roční období [21][23]

$$W_{id} = \eta \cdot \frac{2 \cdot I_{vyuz} \cdot A_0}{\omega} \quad (4.17)$$

#### 4.4 Statistika parametrů na konkrétním místě

Lokalita má souřadnice 49°28'12,7" s.š. a 17°06'44,9"v.d. a je to budova Cyrilometodějského gymnázia, na níž je instalovaný fotovoltaický systém EZS 1200Wp. Uvedená data jsou za rok 2011. Systém je uložený stacionárně s úhlem naklonění 45°. Monitorována je maximální hodnota intenzity slunečního záření za jednotlivé dny [31].

Průběh maximální hodnoty intenzity slunečního záření je na Obrázku 4-3 [31].



Obrázek 4-3 Maximální hodnota intenzity slunečního záření v průběhu roku, data získána z [31]

Průměrné hodnoty maximálních intenzit slunečního záření, celková vyrobená energie a doba provozu fotovoltaického systému EZS 1200Wp jsou uvedeny v Tabulce 4-1 [31].

Tabulka 4-1 Průměrné hodnoty maximálních intenzit slunečního záření, celková vyrobená energie a doba provozu fotovoltaického systému EZS 1200Wp, data získána z [31]

	$I_{max\_prum}$ ( $W \cdot m^{-1}$ )	$E_{celk}$ (kWh)	$t_p$ (h)
Leden	264,520	20,933	228,200
Únor	414,300	66,148	245,750
Březen	664,390	137,075	339,450
Duben	779,570	139,044	376,920
Květen	835,810	168,932	437,480
Červen	859,600	143,032	435,820
Červenec	713,330	103,734	388,530
Srpen	825,300	141,952	395,280
Září	689,170	132,687	345,430
Říjen	469,870	82,772	292,270
Listopad	247,730	48,718	236,400
Prosinec	242,900	34,669	217,150
Rok	584,060	1219,696	3938,680

## 5 LABORATORNÍ EXPERIMENTY

Tato kapitola se zabývá praktickým ověřením teoretických poznatků o průběhu výkonu stacionárně uloženého panelu v souvislosti se změnou polohy slunce během dne i během roku. Tyto předpoklady budou ověřeny navrženým experimentem.

### 5.1 Zadání a cíle experimentu

Cílem experimentu je stanovit závislost dodávaného výkonu na úhlu natočení panelu, a to jak ve vertikální ose, tak v horizontální ose.

Prvním úkolem je stanovit V-A a výkonové charakteristiky předložených fotovoltaických panelů. Pro předložené fotovoltaické panely bude změřena závislost výkonu panelu na úhlu natočení v horizontální ose, a to pro odchylky úhlu dopadu slunečních paprsků od úhlu naklonění stacionárně uloženého panelu. Odchylky jsou uvažovány pro začátky ročních období.

### 5.2 Postup

Úlohu je zapojena dle schématu zapojení, přičemž měřicí přístroje jsou nastaveny na příslušný rozsah a propojeny se vstupem měřicí karty v PC. Je zvolena vzdálenost  $d$  a výška  $h$ . Světelný zdroj je zapnut a jeho osa nastavena do středu vybraného panelu podle normály tohoto panelu. Je přitom dbáno na to, aby střed měřeného panelu byl také ve výšce  $h$ .

#### 5.2.1 Měření V-A charakteristiky

Modul s měřenými panely je postaven kolmo ke světelnému zdroji ( $\varepsilon_v$  i  $\varphi$  jsou nulové). Je spuštěn příslušný program a v něm jsou zaznamenávána jednotlivá měření. Na odporové dekádě je postupně nastavován odpor tak, aby V-A charakteristika daného panelu byla proměřena s dostatečnou přesností. Krok na ose proudu je zvolen 1-2 mA. Buď z V-A, nebo z výkonové charakteristiky se stanoví pracovní bod, který je ponechán pro všechna měření na tomto panelu stejný.

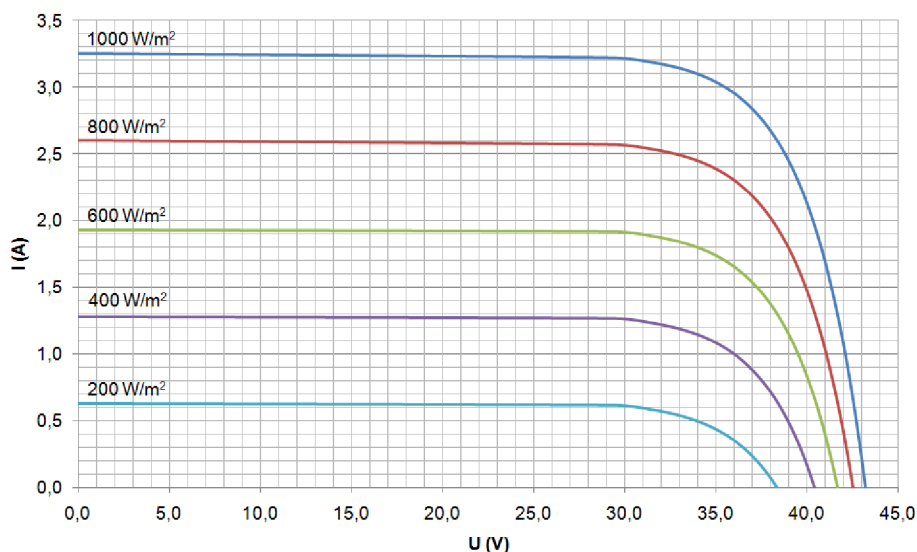
#### 5.2.2 Měření závislosti výkonu panelu na úhlu natočení v obou osách

Pro odchylky úhlu dopadu slunečních paprsků od úhlu naklonění stacionárně uloženého panelu  $\varepsilon_v$  se měří závislost výkonu panelu na úhlu natočení v horizontální ose  $\varphi$ . Odchylky jsou uvažovány pro začátky ročních období. V-A charakteristiku, výkonovou charakteristiku i změřené závislosti jsou následně zpracovány graficky i tabelárně. Naměřené hodnoty jsou porovnány s teoreticky předpokládanými hodnotami a jsou zhodnoceny možné nepřesnosti měření.

### 5.3 Teoretický rozbor

V-A charakteristika fotovoltaického panelu je závislost dodávaného proudu na napětí panelu.

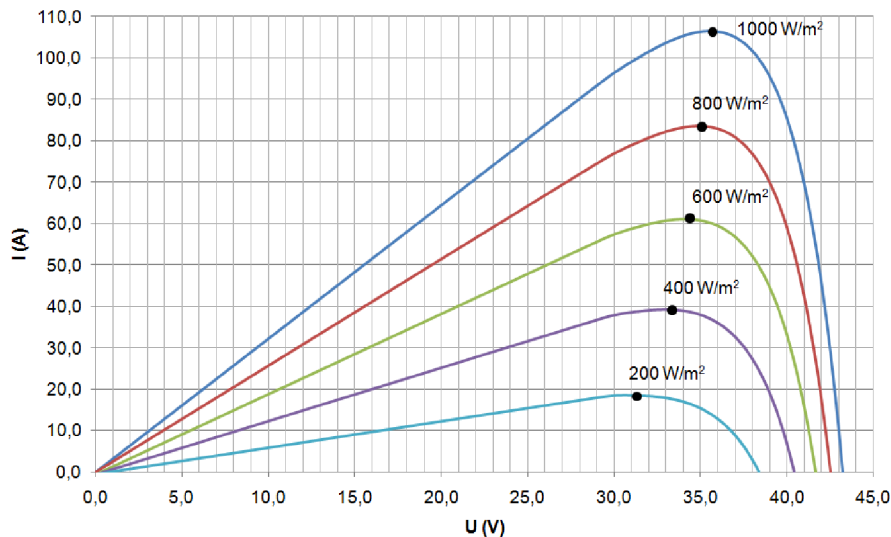
Typický průběh V-A charakteristiky je na *Obrázek 5-1* [19].



*Obrázek 5-1* V-A charakteristiky fotovoltaického panelu FVP SOLARTEC SG 72-106 pro různé intenzity osvětlení, převzato z [19]

Po vynesení závislosti výkonu na napětí panelu získáme výkonovou charakteristiku.

Typický průběh výkonové charakteristiky je na *Obrázek 5-2* [19].



*Obrázek 5-2* Výkonové charakteristiky fotovoltaického panelu FVP SOLARTEC SG 72-106 pro různé intenzity osvětlení, převzato z [19]

Pracovní bod panelu stanovíme v místě maximálního výkonu panelu a volíme jej pro všechny provozní stavy panelu stejný.

Závislost výkonu na úhlu natočení je blíže popsána v kapitole 2. Pro tento experiment platí

$$P = \eta \cdot I \cdot A \cdot \cos \varphi \quad (5.1)$$

Nebo také

$$P = \eta \cdot P_{\max} \cdot \cos\varphi \quad (5.2)$$

kde  $P_{\max}$  je výkon fotovoltaického panelu při  $\varphi=0^\circ$  (ve W).

Závislost výkonu na natočení panelu by tedy měla odpovídat kosinusoidě.  $P_{\max}$  volíme pro jednotlivá  $\varepsilon_v$  jako výkon při  $\varphi=0^\circ$ .

Odchytky úhlu dopadu slunečních paprsků od úhlu naklonění stacionárně uloženého panelu stanovíme ze vzorce (4.5)

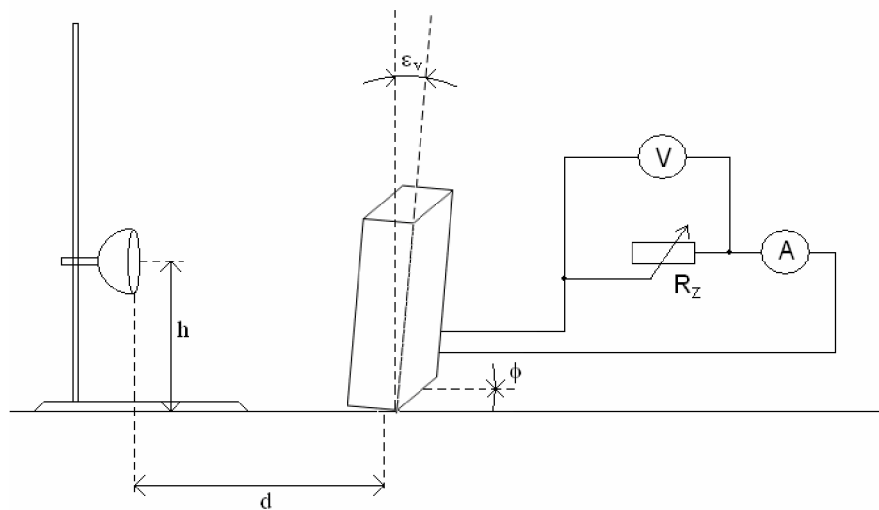
$$\varepsilon_v = 90^\circ - \beta - \varphi \quad (5.3)$$

$\beta$  je v našem případě  $45^\circ$ ,  $\varepsilon_v$  tedy pro jednotlivá roční období bude

- a) pro jaro  $\varepsilon_v = 90^\circ - 45^\circ - 40^\circ = 5^\circ$
- b) pro léto  $\varepsilon_v = 90^\circ - 45^\circ - 63,5^\circ = -18,5^\circ$
- c) pro podzim  $\varepsilon_v = 90^\circ - 45^\circ - 38,6^\circ = 6,4^\circ$
- d) pro zimu  $\varepsilon_v = 90^\circ - 45^\circ - 16,5^\circ = 28,5^\circ$

Protože je závislost kosinusová, není třeba uvažovat záporný smysl odchytky.

Schéma zapojení experimentu je na *Obrázek 5-3*.



*Obrázek 5-3 Schéma zapojení*

## 6 REALIZACE NAVRŽENÝCH EXPERIMENTŮ

Tato kapitola je zaměřena na provedení experimentu z předešlé kapitoly. Měřené hodnoty jsou zde tabelárně i graficky zpracovány a porovnány s teoreticky předpokládanými hodnotami.

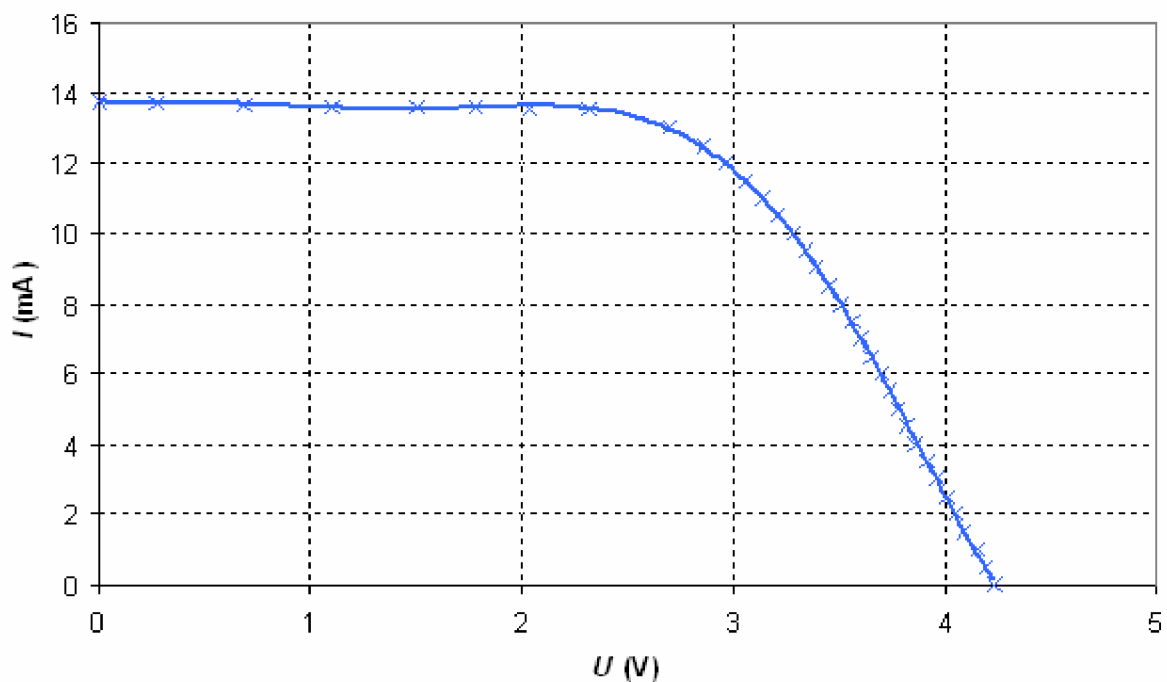
Volíme pro všechna měření: vzdálenost světelného zdroje od fotovoltaického panelu  $d=55$  cm a výšku světelného zdroje  $h=24$  cm, světelný zdroj: Halogenová žárovka OSRAM 100 W.

### 6.1 Monokrystalický křemík

#### 6.1.1 V-A a výkonová charakteristika

Parametry panelu z monokrystalického křemíku při použité intenzitě osvětlení jsou: délka  $a_m=2,5$  cm, šířka  $b_m=2,5$  cm, plocha  $A_m=6,25$  cm<sup>2</sup>,  $I=400$  W·m<sup>-2</sup>

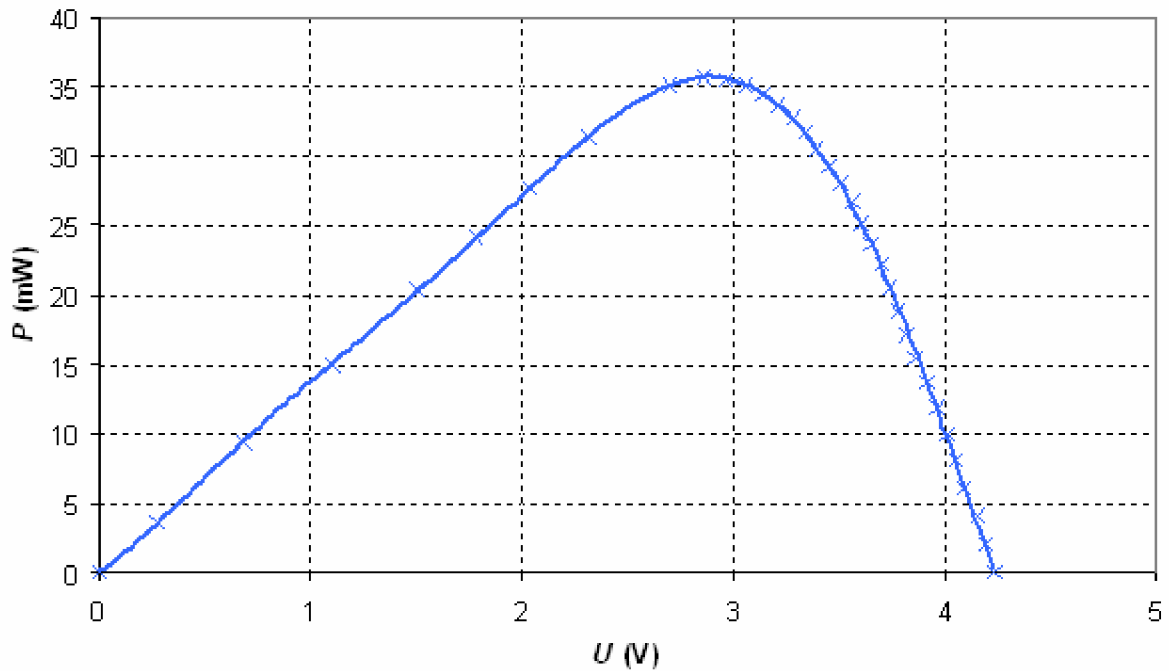
V-A charakteristika měřeného panelu je na *Obrázek 6-1*.



*Obrázek 6-1* V-A charakteristika panelu z monokrystalického křemíku



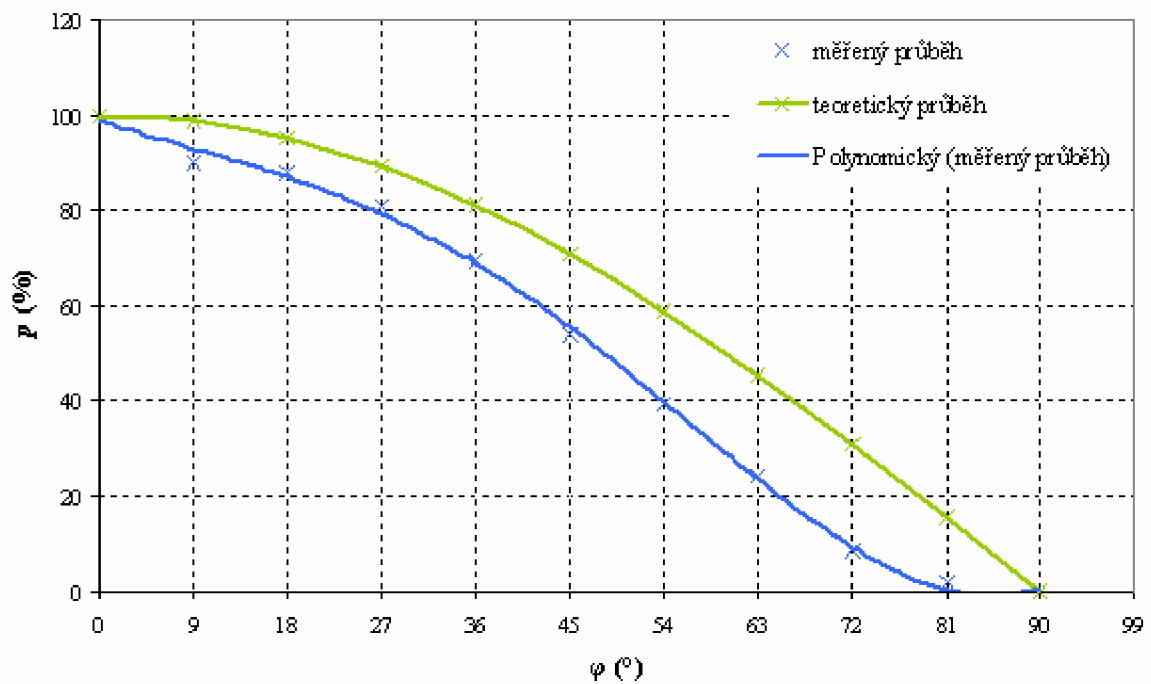
Výkonová charakteristika měřeného panelu je na *Obrázek 6-2*.



*Obrázek 6-2* Výkonová charakteristika panelu z monokrystalického křemíku

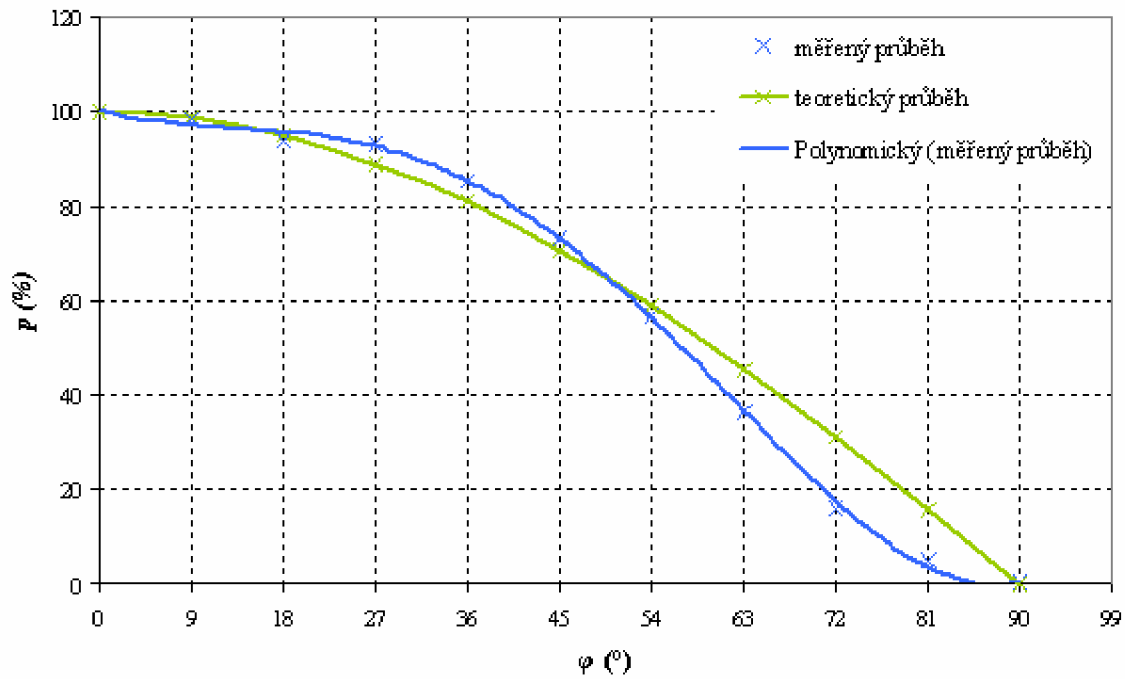
### 6.1.2 Natáčení

Průběh výkonu měřeného panelu při naklonění  $5^\circ$  je na *Obrázek 6-3*.



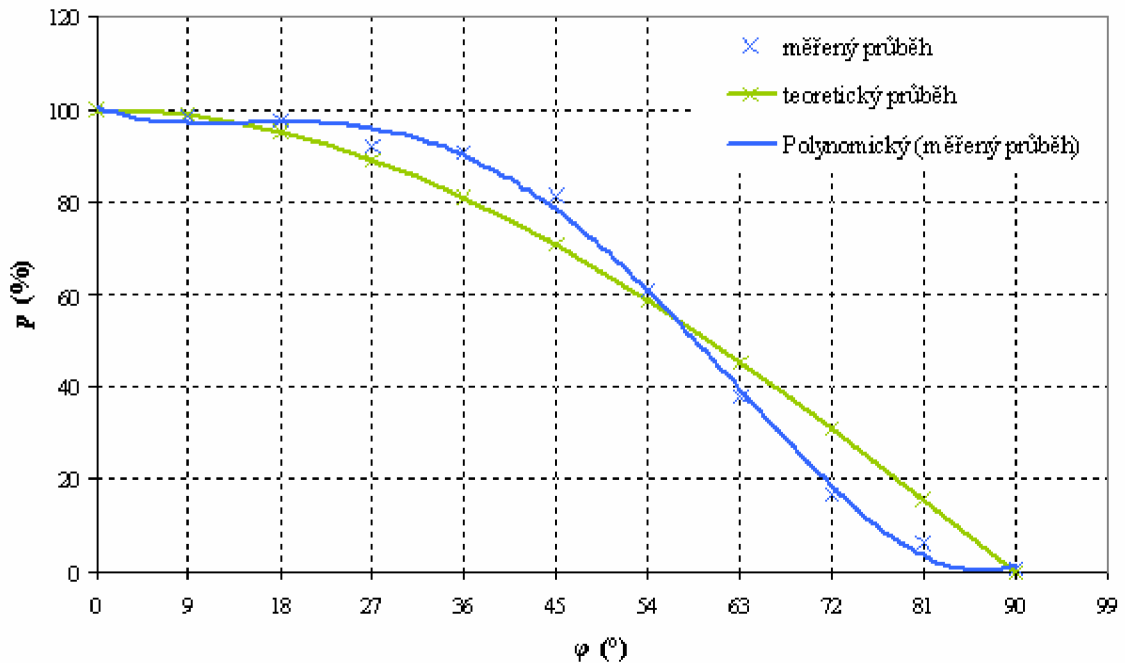
*Obrázek 6-3* Průběh výkonu při úhlu naklonění  $5^\circ$

Průběh výkonu měřeného panelu při naklonění  $18,5^\circ$  je na *Obrázek 6-4*.



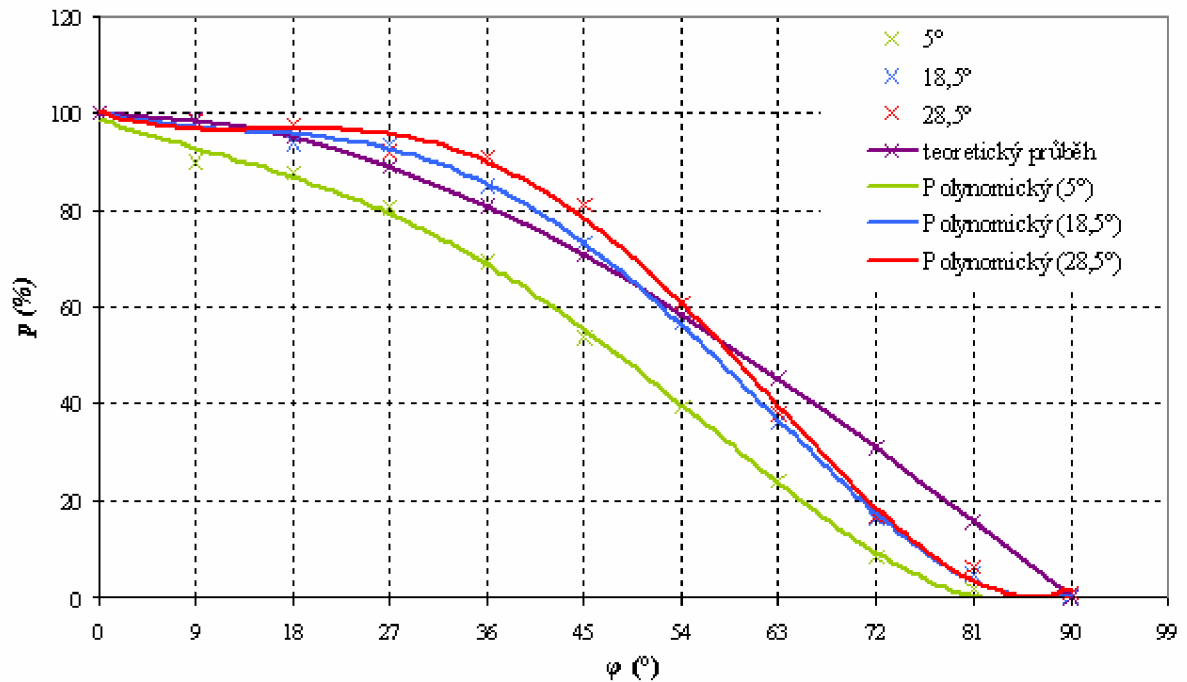
*Obrázek 6-4* Průběh výkonu při úhlu naklonění  $18,5^\circ$

Průběh výkonu měřeného panelu při naklonění  $28,5^\circ$  je na *Obrázek 6-5*.



*Obrázek 6-5* Průběh výkonu při úhlu naklonění  $28,5^\circ$

Porovnání průběhů výkonu pro všechny měřené úhly naklonění je na *Obrázek 6-6*.



*Obrázek 6-6* Porovnání průběhů výkonu pro všechny měřené úhly naklonění

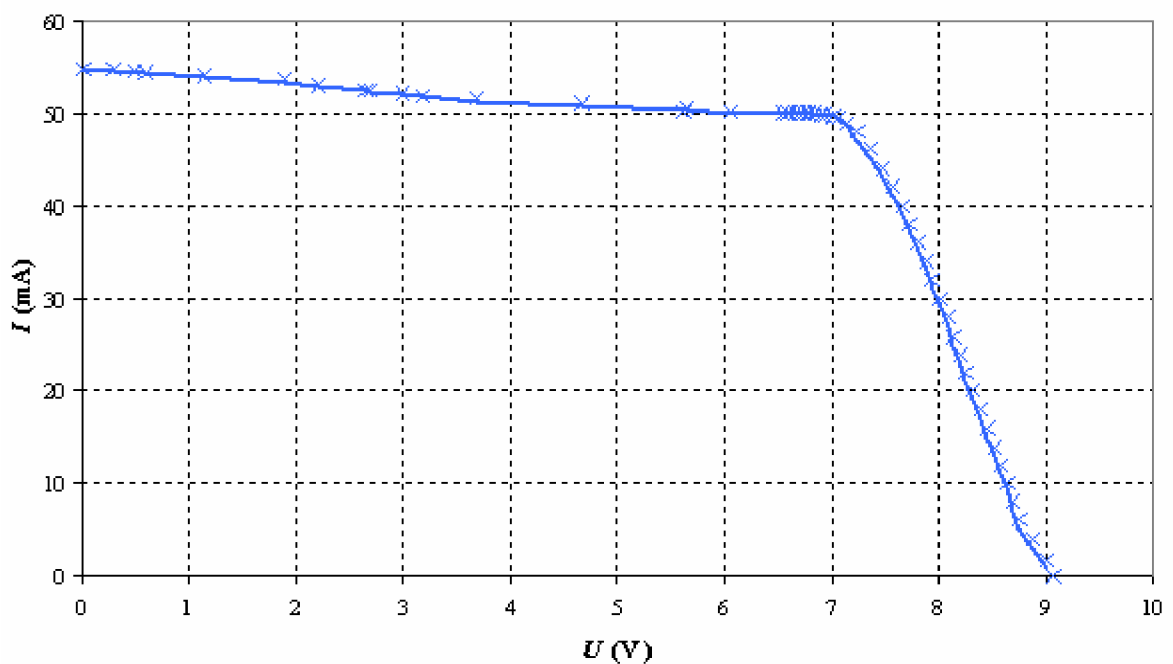
## 6.2 Polykrystalický křemík

### 6.2.1 V-A a výkonová charakteristika

Parametry panelu z polykrystalického křemíku při použité intenzitě osvětlení jsou:

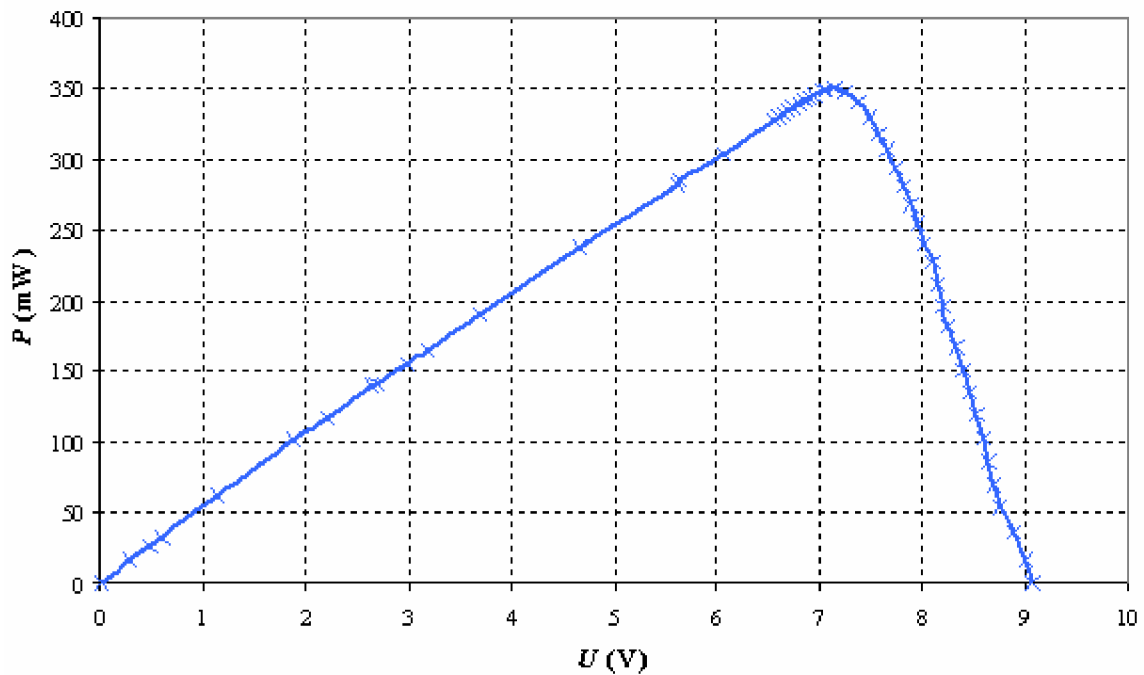
délka  $a_p = 10,5$  cm, šířka  $b_p = 4,5$  cm, plocha  $A_p = 47,25$  cm<sup>2</sup>,  $I = 400$  W m<sup>-2</sup>

V-A charakteristika měřeného panelu je na *Obrázek 6-7*.



*Obrázek 6-7* V-A charakteristika panelu z polykrystalického křemíku

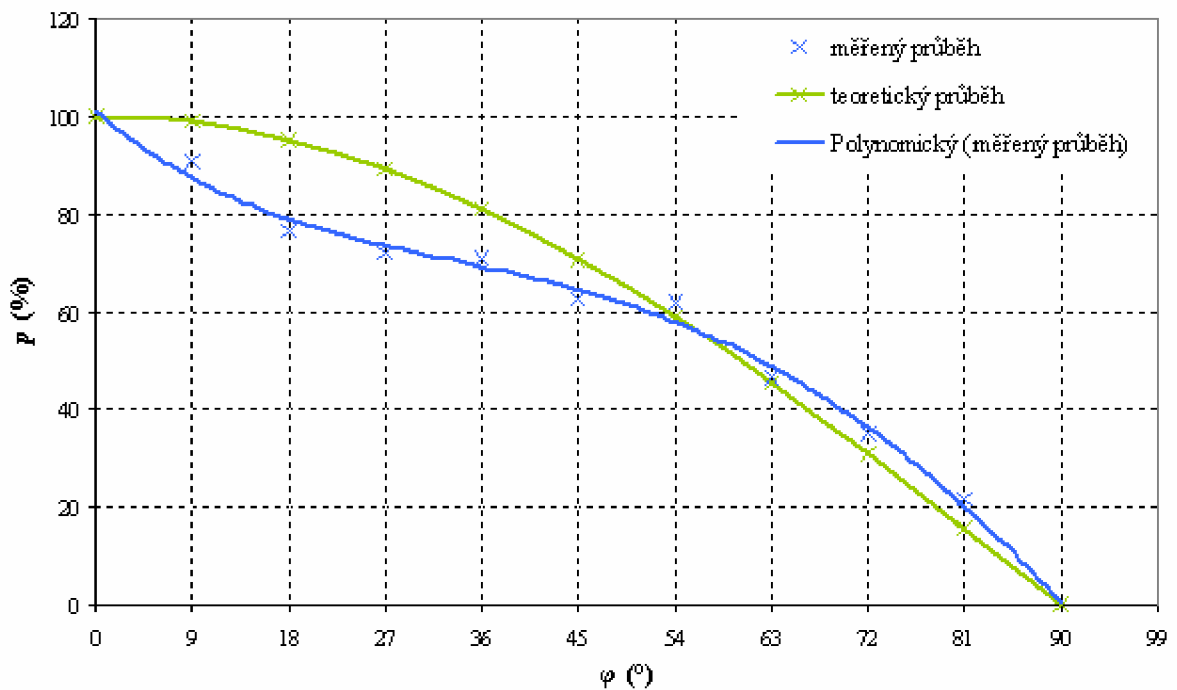
Výkonová charakteristika měřeného panelu je na *Obrázek 6-8*.



*Obrázek 6-8* Výkonová charakteristika panelu z polykrystalického křemíku

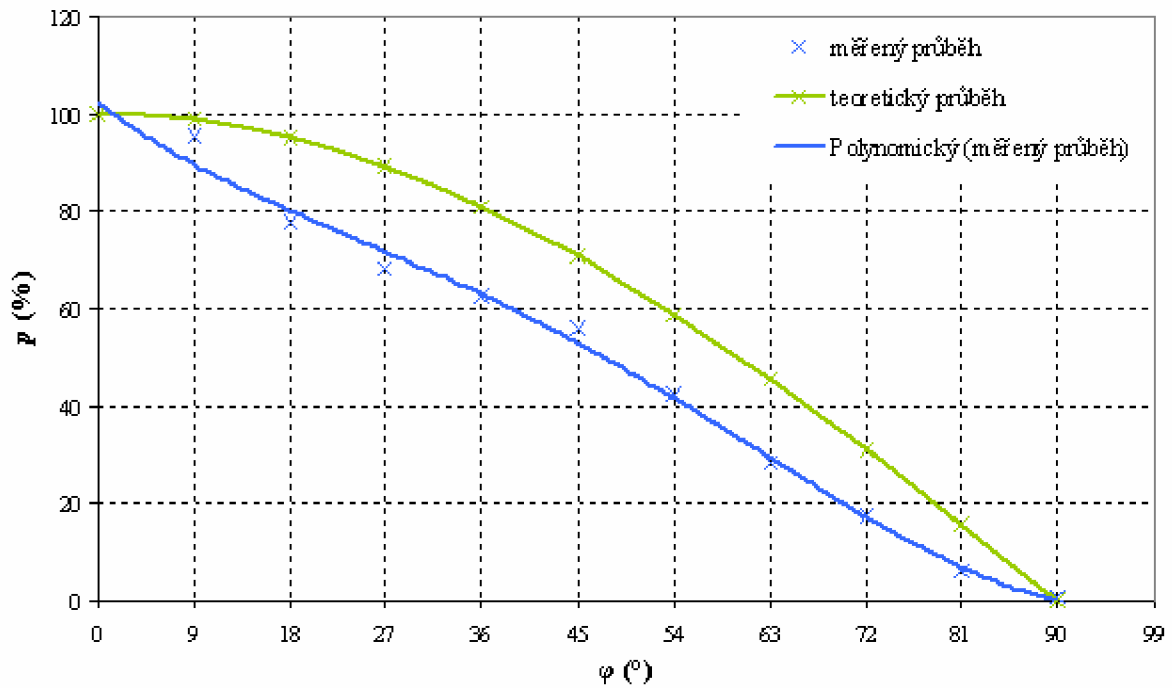
## 6.2.2 Natáčení

Průběh výkonu měřeného panelu při naklonění  $5^\circ$  je na *Obrázek 6-9*.



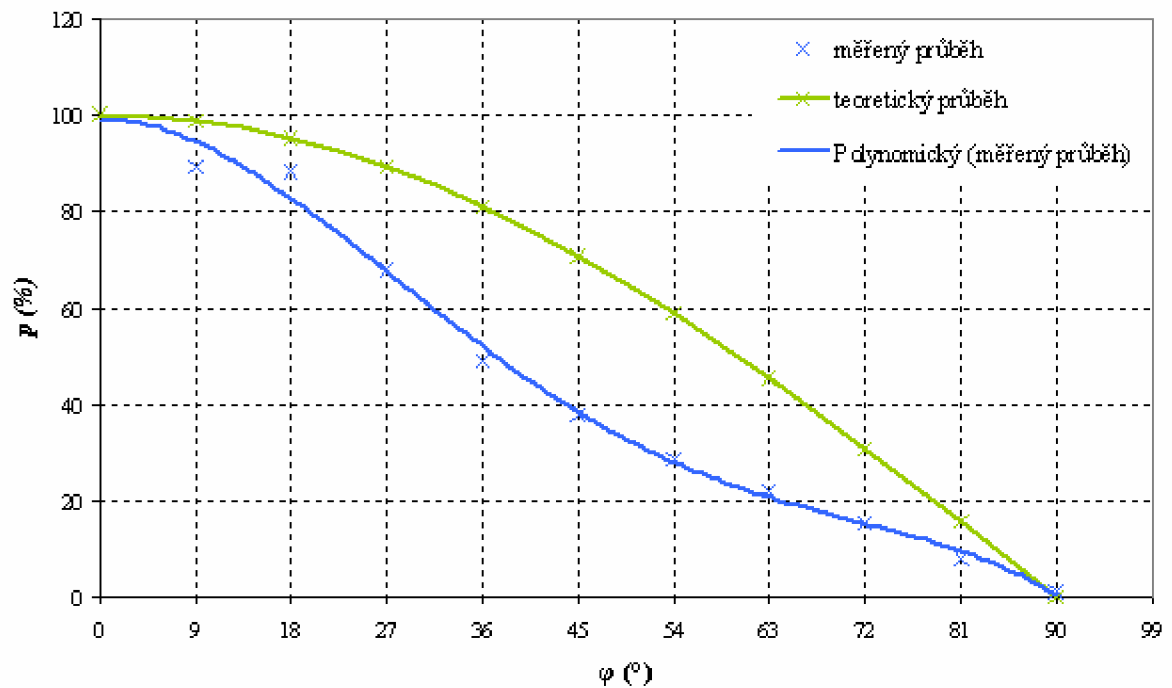
*Obrázek 6-9* Průběh výkonu při úhlu naklonění  $5^\circ$

Průběh výkonu měřeného panelu při naklonění  $18,5^\circ$  je na Obrázek 6-10.



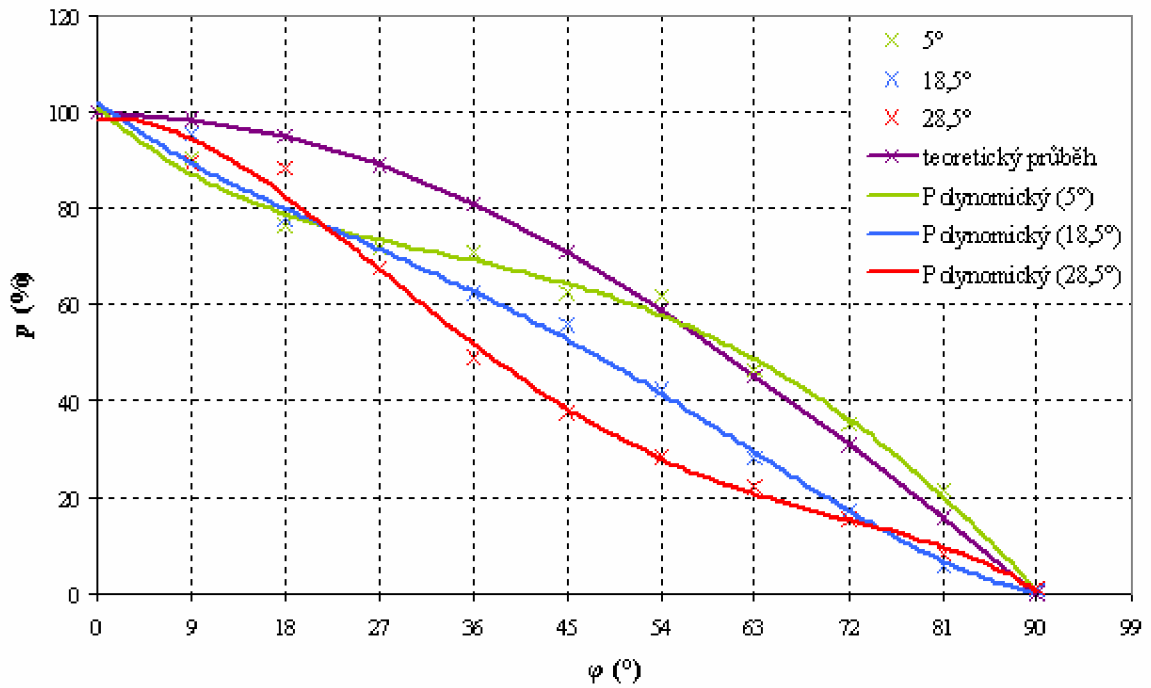
Obrázek 6-10 Průběh výkonu při úhlu naklonění  $18,5^\circ$

Průběh výkonu měřeného panelu při naklonění  $28,5^\circ$  je na Obrázek 6-11.



Obrázek 6-11 Průběh výkonu při úhlu naklonění  $28,5^\circ$

Porovnání průběhů výkonu pro všechny měřené úhly naklonění je na *Obrázek 6-12*.



*Obrázek 6-12* Porovnání průběhů výkonu pro všechny měřené úhly naklonění

## 7 VYHODNOCENÍ PROVEDENÝCH EXPERIMENTŮ

V této kapitole jsou zhodnocena všechna experimentálně získaná data, jejich průběh a odlišnost od předpokládaných hodnot. Jsou zde také specifikovány možné chyby či nepřesnosti měření, stejně tak i možné negativní vlivy na přesnost měření.

### 7.1 V-A charakteristika

Prvním bodem zadání bylo stanovit V-A charakteristiku předložených vzorků fotovoltaických panelů. Prvním měřením byl panel z monokrystalického křemíku. Jeho V-A charakteristika vyšla zcela podle předpokladů. Z V-A byl určen proud panelu nakrátko  $I_{SC}=13,73$  mA a napětí panelu naprázdno  $U_{OC}=4,23$  V.

V-A charakteristika panelu z polykrystalického křemíku vyšla opět dle předpokladů, ovšem v oblasti od 0 V do 6 V charakteristika mírně klesá, což mohlo být způsobeno zahříváním panelu. Z V-A byl určen proud panelu nakrátko  $I_{SC}=54,8$  mA a napětí panelu naprázdno  $U_{OC}=9,07$  V.

### 7.2 Výkonová charakteristika

Dalším úkolem bylo stanovit výkonové charakteristiky daných panelů. U monokrystalického panelu vyšla tato charakteristika opět podle očekávání. Svého maxima dosahuje při 2,86 V a 35,75 mW, zde jsme také zvolili pracovní bod (velikost zátěžného odporu byla 228,8  $\Omega$ ). Tak byl určen proud v pracovním bodě  $I_m=12,5$  mA a napětí v pracovním bodě  $U_m=2,86$  V.

U panelu z polykrystalického křemíku vyšla výkonová charakteristika poněkud symetričtější, než v prvním případě. Nárůst výkonu v oblasti od (0,01-7) V je zdatelně pozvolnější, než v předešlém případě. Výkon svého maxima 350,35 mW dosahuje při 7,15 V, což odpovídá hodnotě zátěžného odporu 146  $\Omega$ , kterým jsme určili pracovní bod panelu. Tak byl určen proud v pracovním bodě  $I_m=49$  mA a napětí v pracovním bodě  $U_m=7,15$  V.

### 7.3 Natáčení fotovoltaického panelu

Tato část experimentu měla simulovat pokles výkonu stacionárně uloženého panelu vlivem změny polohy slunce během roku. Zvolený postup neumožňuje tento jev věrohodně ověřit, protože použitý světelný zdroj je charakteru bodového, na rozdíl od slunečního záření, které je charakteru plošného. Při natáčení panelu se měnily podmínky, kterým byly jednotlivé části panelu vystavovány, což bylo způsobeno nehomogenitou intenzity osvětlení v rozdílných vzdálenostech od světelného zdroje. Pro každý úhel natočení by pak bylo nutné zvolit nový pracovní bod panelu, a tedy i proměřit V-A charakteristiku. Pracovní bod jsme nechali pro všechna prováděná měření stejný. Za předpokladu, že maximální intenzitu pro dané naklonění budeme odvozovat od výkonu panelu při nulovém úhlu natočení, lze experimentem ověřit průběh výkonu při simulaci pohybu slunce během dne.

Natáčení jsme prováděli podle zadání. Pro odchylky 5° a 6,4° jsme provedli jedno měření, protože měření tak malých výchylek bylo velmi obtížně proveditelné. Měření jsme prováděli pouze v rozsahu (0-90)°, protože jsme vycházeli z předpokladu symetrického průběhu výkonu.

U panelu z monokrystalického křemíku odpovídá průběh výkonů pro všechny odchylky  $\varepsilon_v$  víceméně předpokládané kosinusoidě. Chyba měření roste s rostoucím úhlem natočení  $\varphi$  a kromě posledních tří úhlů u každého měření není chyba měření nijak výrazná.

U panelu z polykrystalického křemíku vyšly průběhy podobně jako u monokrystalického křemíku, přičemž větší nepřesnosti vznikly při měření pro úhel naklonění  $\varepsilon_v=28,5^\circ$ , což může být způsobeno zapnutím jiného světelného zdroje mimo naše pracoviště. Všechny průběhy pak opět kopírovaly průběh předpokládané kosinusoidy.

Větší rozdíly mezi předpokládaným a měřeným výkonem panelu vykazoval panel z polykrystalického křemíku, který dobře zpracovává difúzní záření. Záření z použitého světelného zdroje bylo ale přímé, což umí lépe využít křemík monokrystalický. Tento poznatek ověřuje teoretický předpoklad o vhodnosti polykrystalického křemíku pro stacionární uložení a monokrystalického křemíku pro natáčecí systémy.

## 7.4 Účinnost měřených panelů

Účinnost fotovoltaického panelu je dána vztahem

$$\eta = \eta_r \cdot \eta_e \cdot \eta_p \cdot FF \quad (7.1)$$

Kde  $\eta_r$  je poměr výkonu záření odraženého a výkonu záření dopadajícího (uvažuje se průměrná odrazivost křemíku  $R=0,30$ ) a je dán vztahem  $\eta_r = \frac{P_{abs}}{P_{rad}} \cong 0,70$ ,  $\eta_e$  je účinnost Carnotova

tepelného cyklu a je dána vztahem  $\eta_e = 1 - \frac{T_O}{T_S} = 0,95$  (kde  $T_O$  je teplota okolí  $T_O \cong 300$  K a  $T_S$  je

teplota Slunce  $T_S = 6000$  K),  $\eta_p$  dílčí účinnost způsobená neschopností křemíku přizpůsobit se spektru slunečního záření  $\eta_p \cong 0,42$  a  $FF$  je činitel plnění fotovoltaického panelu, který je dán vztahem

$$FF = \frac{U_m \cdot I_m}{U_{OC} \cdot I_{SC}} \quad (7.2)$$

kde  $U_m$  je napětí v pracovním bodě (ve V),  $I_m$  je proud v pracovním bodě (v A),  $U_{OC}$  je napětí panelu naprázdno (ve V) a  $I_{SC}$  je proud panelu nakrátko (v A) [32].

Činitel plnění panelu z monokrystalického křemíku je

$$FF_{monokrystal} = \frac{2,86 \text{ V} \cdot 12,5 \text{ mA}}{4,23 \text{ V} \cdot 13,73 \text{ mA}} = \underline{\underline{0,6156}} \quad (7.3)$$

Činitel plnění panelu z polykrystalického křemíku je

$$FF_{polykrystal} = \frac{7,15 \text{ V} \cdot 49 \text{ mA}}{9,07 \text{ V} \cdot 54,8 \text{ mA}} = \underline{\underline{0,7049}} \quad (7.4)$$

Účinnost panelu z monokrystalického křemíku tedy bude

$$\eta_{monokrystal} = \eta_r \cdot \eta_e \cdot \eta_p \cdot FF_{monokrystal} = 0,70 \cdot 0,95 \cdot 0,42 \cdot 0,6156 = \underline{\underline{0,1719}} \quad (7.5)$$

Účinnost panelu z polykrystalického křemíku potom bude

$$\eta_{polykrystal} = \eta_r \cdot \eta_e \cdot \eta_p \cdot FF_{polykrystal} = 0,70 \cdot 0,95 \cdot 0,42 \cdot 0,7049 = \underline{\underline{0,1969}} \quad (7.6)$$

Účinnost panelu z monokrystalického křemíku vyšla poměrně přesně v předpokládaném rozmezí (14-17) %. U panelu z polykrystalického křemíku vyšla účinnost mírně vyšší, než předpokládaných (13-15) %, ale i přesto je tato hodnota reálná [6].



## 7.5 Možné chyby měření

Chyby měření byly způsobeny osvětlením laboratoře, případně i jinými světelnými zdroji v blízkosti prováděného experimentu (PC monitor). Další chyby mohly vzniknout nepřesným nastavením úhlu naklonění, které zvláště pro  $5^\circ$  bylo velmi obtížné udržet po celou dobu měření stejné. Další nepřesnosti mohly být způsobeny změnou vzdálenosti od světelného zdroje v důsledku naklánění ve vertikální ose ( $\varepsilon_v$ ). Oba měřené panely se nacházely v horní části modulů, na kterých byly umístěny. Proto i přes průběžnou kontrolu vzdálenosti  $d$  i výšky  $h$  mohlo při naklánění ve vertikálním směru dojít k nárůstu vzdálenosti mezi světelným zdrojem a měřeným panelem. Případné nepřesnosti mohly být způsobeny upevněním panelů na modulu, protože panely nebyly uchyceny přímo na povrchu modulů. Zvláště měření panelů z monokrystalického křemíku, které byly na modulu uchyceny pěnovou hmotou, mohlo být zatíženo chybou, protože skutečný úhel naklonění se mohl mírně lišit od měřeného. Takto vzniklá chyba by ale neměla mít zásadnější vliv na přesnost výsledků měření. Další nepřesnost měření mohlo způsobit to, že jsme pro všechna měření na daném panelu nechávali pracovní bod panelu stejný. Panel tak nemusel, na rozdíl od teoretických předpokladů, vždy dodávat maximální výkon.

## 8 ZHODNOCENÍ OPRÁVNĚNOSTI VYUŽITÍ NATÁČECÍCH SYSTÉMŮ

V této kapitole je zhodnocena oprávněnost natáčecích systémů, a to jak z teoretických předpokladů, tak i z praktických výsledků.

### 8.1 Výkon stacionárního fotovoltaického panelu

Měřené hodnoty jsou přepočítány tak, že výkon při úhlu natočení  $\varphi=0^\circ$  je roven 100 % a následně hodnoty výkonu pro další úhly jsou vztaženy k této hodnotě.

Výkon panelu z monokrystalického křemíku pro úhel naklonění  $\varepsilon_v=5^\circ$  víceméně odpovídá modelovému dnu, protože délka dne je 12h 6,5min. Lze tedy uvažovat, že úhel  $\varphi=90^\circ$  představuje východ a západ slunce a  $\varphi=0^\circ$  představuje poledne. Zvolený krok  $9^\circ$  tedy odpovídá 36min 39s. Budeme-li výkon panelu v poledne ( $\varphi=0^\circ$ ) považovat za 100%, tak ve 13:13 je výkon 87,9%, v 13:49 80,7%, v 15:03 53,9%, v 16:16 24,2%, v 16:53 8,4% a v 18:06 (západ slunce) je výkon panelu nulový. Průběh výkonu pro dopoledne je analogický.

Obdobně pro panel z polykrystalického křemíku při stejné konfiguraci platí, že výkon v poledne ( $\varphi=0^\circ$ ) je považován za 100%. Ve 13:13 je potom výkon 76,5%, v 13:49 70,8%, v 15:03 62,6%, v 16:16 46,5%, v 16:53 34,9% a v 18:06 (západ slunce) je výkon panelu nulový. Průběh výkonu pro dopoledne je analogický.

### 8.2 Navýšení výkonu panelu natáčením v jedné ose

Pro praktické ověření vztahu (2.10) je zaveden předpoklad pro celkovou vyrobenou energii natáčeným panelem (v jedné ose)

$$W_{nat} = t_d \cdot P_0 \quad (8.1)$$

kde  $t_d$  je délka dne (v s) a  $P_0$  je výkon při nulovém úhlu natočení ( $\varphi=0^\circ$ ) pro  $\varepsilon_v$  (ve W).

Jako příklad použijeme panel z polykrystalického křemíku pro jaro ( $\varepsilon_v=5^\circ$ ). Celková energie natáčeného panelu by tedy byla

$$W_{nat} = 43980 \text{ s} \cdot 269,799 \cdot 10^{-3} \text{ W} = \underline{\underline{11865,760 \text{ W} \cdot \text{s}}} \quad (8.2)$$

Celkovou vyrobenou energii měřeného stacionárního panelu získáme integrací polynomu, který je rovnicí křivky, kterou jsou proloženy body naměřených hodnot v grafech v kapitole 6. Rovnice regrese křivky je

$$P = 6 \cdot 10^{-6} \cdot \varphi^4 - 0,0017 \cdot \varphi^3 + 0,1316 \cdot \varphi^2 - 5,19 \cdot \varphi + 272,75 \quad (8.3)$$

Celková vyrobená energie měřeného stacionárního panelu bude

$$W_{stac} = \frac{t_d}{180^\circ \cdot 1000} \int_0^{90^\circ} P d\varphi \quad (8.4)$$

$$W_{stac} = \frac{43980 \text{ s}}{180^\circ \cdot 1000} \cdot \int_0^{90^\circ} (6 \cdot 10^{-6} \cdot \varphi^4 - 0,0017 \cdot \varphi^3 + 0,1316 \cdot \varphi^2 - 5,19 \cdot \varphi + 272,75) d\varphi = \underline{\underline{7187,519 \text{ W} \cdot \text{s}}} \quad (8.5)$$

Poměr celkové vyrobené energie natáčeného a stacionárního panelu je

$$\frac{W_{nat}}{W_{stac}} = \frac{11865,76 \text{ W} \cdot \text{s}}{7187,519 \text{ W} \cdot \text{s}} = \underline{\underline{165,088\%}} \quad (8.6)$$

Vypočtená hodnota odpovídá předpokládanému poměru 157,08 % (2.11).

Pro léto ( $\varepsilon_v=18,5^\circ$ ) a pro panel z polykrystalického křemíku by celková vyrobená energie natáčeného panelu byla

$$W_{nat} = 58980 \text{ s} \cdot 238,579 \cdot 10^{-3} \text{ W} = \underline{\underline{14071,389 \text{ W} \cdot \text{s}}} \quad (8.7)$$

Rovnice regrese křivky prokládající body v grafu je

$$P = 9 \cdot 10^{-6} \cdot \varphi^4 - 0,0016 \cdot \varphi^3 + 0,0826 \cdot \varphi^2 - 3,9653 \cdot \varphi + 243,82 \quad (8.8)$$

Celková vyrobená energie měřeného stacionárního panelu bude

$$W_{stac} = \frac{58980 \text{ s}}{180^\circ \cdot 1000} \cdot \int_0^{90^\circ} (9 \cdot 10^{-6} \cdot \varphi^4 - 0,0016 \cdot \varphi^3 + 0,0826 \cdot \varphi^2 - 3,9653 \cdot \varphi + 243,82) d\varphi = \underline{\underline{6776,773 \text{ W} \cdot \text{s}}} \quad (8.9)$$

Poměr celkové vyrobené energie natáčeného a stacionárního panelu je

$$\frac{W_{nat}}{W_{stac}} = \frac{14071,389 \text{ W} \cdot \text{s}}{6776,773 \text{ W} \cdot \text{s}} = \underline{\underline{207,641\%}} \quad (8.10)$$

Vypočtená hodnota odpovídá předpokládanému poměru 214,46 % (2.12).

Průměrné navýšení výkonu za celý rok je teoreticky zhruba 57 %. V praxi se navýšení výkonu pohybuje kolem cca 45 %, a to za příznivých podmínek. Toto navýšení je ale velmi negativně ovlivňováno následujícími faktory [19]

- Při východu a západu slunce prochází záření silnou vrstvou atmosféry, konečná intenzita záření dopadající na panel je tedy výrazně snížena
- V oblastech blíže pólům se střídá období delších dnů a delších nocí
- Vliv difúzního záření [19].

Hlavní vliv na výkon panelu v obou uloženích má ale oblačnost. Tento faktor nelze nijak ovlivnit. Obecně platí, že čím jižněji, tím méně oblačnosti a více přímého záření. Při převažujícím difúzním záření není navýšení výkonu takřka žádné. V našich střeoevropských podmínkách při natáčení v obou osách lze natáčením panelu v jedné ose navýšit výkon jen asi o 11 % [19].

### 8.3 Instalační plocha

Při umisťování natáčecích systémů na pozemek je třeba počítat s plochou na jeden systém mnohem větší, než je samotná plocha fotovoltaických panelů. Kvůli vzájemnému stínění musí být rozestupy mezi natáčecími systémy větší, než u stacionárního uložení [7][8].

Uvádí se, že pro instalaci stacionárně uloženého fotovoltaického panelu je zapotřebí přibližně 10 m<sup>2</sup> na 1 kWp. Pro natáčecí systém TRAXLE o výkonu 2,1 kWp je potřeba asi 100 m<sup>2</sup>, což je zhruba 50 m<sup>2</sup> na 1 kWp. Při použití zrcadlového koncentrátoru se dokonce uvádí, že pro natáčecí systém o výkonu 2,52 kWp je zapotřebí 144 m<sup>2</sup>, což je v přepočtu zhruba 60 m<sup>2</sup> na 1 kWp. [7][8].

## 9 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo analyzovat oprávněnost využití solárních natáčecích zařízení pro fotovoltaické systémy v dané lokalitě. Dle teoretických předpokladů by mělo být navýšení celkové vyrobené energie přibližně 57 %. Tento fakt byl ověřen i prakticky. Dalším výsledkem praktického měření je účinnost panelů z monokrystalického a polykrystalického křemíku. Účinnost měřeného panelu z monokrystalického křemíku je 17,19%, což ještě spadá do intervalu obvyklých hodnot (14-17) %. Účinnost měřeného panelu z polykrystalického křemíku je 19,69%, což je nepatrně více než předpokládaných (13-15) %. I přesto ale lze i tuto hodnotu považovat za relevantní.

Z praktického měření bylo též provedeno ověření navýšení celkové vyrobené energie natáčením panelu. Pro panel z polykrystalického křemíku vyšlo navýšení na jaře 65,1 %, což je hodota blízká teoreticky určené hodnotě 57,1 %. Podobně pro stejný panel v létě 107,6 %, což v porovnání s teoreticky určenými 114,5 % je ještě relevantní hodnota. Každé navýšení výkonu, ať už natáčecím systémem nebo i použitím koncentrátoru, sice zvyšuje výkon fotovoltaického panelu, znamená však i vyšší nároky na instalační plochu. Navíc hlavní vliv na výkon fotovoltaického panelu má oblačnost, což není v lidských silách ovlivnit. Z těchto příčin lze v našich klimatických podmínkách považovat za reálné navýšení jen asi o 11 %. Proto pro komerční využití, kdy mnohdy cena pozemku bývá vyšší, než samotné fotovoltaické panely, se použití natáčecích systémů nejeví jako výhodné.

Panel natáčený za sluncem je více vystavován tepelnému záření slunce, což opět snižuje jeho účinnost. Při použití koncentrátorů je navíc rozhodující čistota povrchu zrcadlové plochy, což vyžaduje náročnější údržbu. Z výše uvedených hodnot plyne, že natáčecí systém s koncentrátorem zabere až 60 m<sup>2</sup> na 1 kWp. Na této ploše by stacionárně mohly být uloženy panely o výkonu až 6 kWp. Znamená to sice vyšší pořizovací náklady na fotovoltaické panely, ale pravděpodobnost, že všechny tyto panely budou současně zapadány listím či sněhem, je menší než u jednoho natáčeného fotovoltaického panelu s koncentrátorem. Uvážíme-li, že při malých intenzitách osvětlení či při zakrytí snímacích (pomocných) fotovoltaických panelů nedochází k natáčení vůbec, a panel je tak náchylnější k usazování různých nečistot.

Dalším vlivem, kterým je třeba uvažovat, je síla větru. Je jistě snadnější upevnit stacionárně uložený panel tak, aby odolával náporu větru, než zkonstruovat natáčecí systém, který by i při silném větru byl schopen spolehlivě natáčet panel. Tyto aspekty je třeba uvažovat i při usazování listí, sněhu či jiných nečistot.

Z uvažovaných metod přizpůsobení úhlu naklonění panelu úhlu dopadu slunečního záření se nejvýhodněji jeví sezónní změna úhlu naklonění stacionárně uloženého panelu. Tento způsob je jednoduše proveditelný, nevyžaduje žádné velké investice a je aplikovatelný i na již instalované panely.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Fotovoltaika. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 16. 2. 2012 [cit. 2012-03-24]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Fotovoltaika>
- [2] V České republice začíná éra fotovoltaiky bez podpory. TZB-info [online]. 28.2.2011 [cit. 2012-03-24]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/7193-v-ceske-republice-zacina-era-fotovoltaiky-bez-podpory>
- [3] Alternativní zdroje energie: elektronické informační stránky. Alternativní zdroje [online]. 2007 [cit. 2012-03-24]. Dostupné z: <http://www.alternativni-zdroje.cz>.
- [4] Fotovoltaika-princip. ENER G Servis [online]. 2009 [cit. 2012-03-24]. Dostupné z: <http://www.energyservis.cz/cs/fotovoltaika/fotovoltaika-princip/>
- [5] Legislativa. Solarmania [online]. 2010 [cit. 2012-03-24]. Dostupné z: <http://www.solarmania.cz/fotovoltaika-legislativa.php>.
- [6] ŘEHÁK, J., BÁRTEK, J., BAŘINKA, R. Fotovoltaika a fotovoltaické systémy v podmínkách ČR a jejich navrhování. Mpo-efekt [online]. 1999 [cit. 2012-03-24]. Dostupné z: [www.mpo-efekt.cz/dokument/98\\_8050.pdf](http://www.mpo-efekt.cz/dokument/98_8050.pdf)
- [7] Zákon č. 180/2005 Sb. In: *Sbírka zákonů České republiky*. 2005
- [8] Zákon č. 458/2000 Sb. In: *Sbírka zákonů České republiky*. 2000
- [9] Vyhláška ERÚ č. 475/2005 Sb. In: *Sbírka zákonů České republiky*. 2005
- [10] Vyhláška ERÚ č. 541/2005 Sb. In: *Sbírka zákonů České republiky*. 2005
- [11] Vyhláška ERÚ č. 150/2007 Sb. In: *Sbírka zákonů České republiky*. 2007
- [12] Informační stránky společnosti: Fotovoltaické systémy. Solartec [online]. 2007 [cit. 2012-03-24]. Dostupné z: <http://www.solartec.cz/cs/fv-systemy.html>.
- [13] Fotovoltaika a legislativa. Fotovoltaické solární elektrárny [online]. 2012 [cit. 2012-05-09]. Dostupné z: <http://www.fotovoltaicke-solarni-elektrarny.com/legislativa/>.
- [14] Poslanci schválili omezení podpory fotovoltaiky, chystají se arbitráže. *ekolist.cz* [online]. 9.11.2010 [cit. 2012-05-09]. Dostupné z: [http://ekolist.cz/cz/zpravodajstvi/zpravy/poslanci-schvalili-omezeni-podpory-fotovoltaiky-chystaji-se-arbitraze?sel\\_ids=1](http://ekolist.cz/cz/zpravodajstvi/zpravy/poslanci-schvalili-omezeni-podpory-fotovoltaiky-chystaji-se-arbitraze?sel_ids=1)
- [15] LACINA, D. Fotovoltaické elektrárny - podmínky v ČR. Obnovitelné energie [online]. 2010 [cit. 2012-03-24]. Dostupné z: <http://www.obnovitelne-energie.cz/fotovoltaicke-elektrarny-podminky-cr.php>
- [16] BERANOVSKÝ, J., KAŠPAROVÁ, M., MACHOLDA, F., SRDEČNÝ, K., TRUXA, J. Energie slunce - výroba elektřiny. EkoWATT [online]. 2007 [cit. 2012-03-24]. Dostupné z: <http://www.ekowatt.cz/cz/informace/energie-slunce---vyroba-elektriny>
- [17] [http://re.jrc.ec.europa.eu/pvGIS/countries/europe/g13y\\_cz.png](http://re.jrc.ec.europa.eu/pvGIS/countries/europe/g13y_cz.png)
- [18] Energetická bezpečnost a decentralizace. Ministerstvo životního prostředí [online]. 4.11. 2011 [cit. 2012-03-24]. Dostupné z: [http://www.mzp.cz/cz/akce\\_energeticka\\_bezpecnost](http://www.mzp.cz/cz/akce_energeticka_bezpecnost)
- [19] BANNERT, P., POTŮČEK, J. Natáčecí fotovoltaický systém. VOŠ a SPŠ Varnsdorf [online]. 2009 [cit. 2012-03-24].
- [20] KOLÁRIK, J., KOVAL, P., LIŠKA, M., JANÍČEK, F. Systémy natáčania za Slnkom. časopis Energetika, 2010(8-9/2010): str. 501-504. Praha: 2010.
- [21] LAŠTŮVKA, Z. Význam a využití solární energie [online]. 2006 [cit. 2012-03-24].
- [22] CATARIUS, A., CHRISTINER, M. Azimuth-Altitude Dual Axis Solar Tracker. Worcester polytechnic institute [online]. 16.12. 2010 [cit. 2012-03-24]. Dostupné z:

- [http://www.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-121710-140419/unrestricted/Dual\\_Axis\\_Tracker\\_Final\\_Report.pdf](http://www.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-121710-140419/unrestricted/Dual_Axis_Tracker_Final_Report.pdf)
- [23] LIBRA, M., POULEK, V. Fotovoltaika: teorie i praxe využití solární energie. 1. vyd. Praha: ILSA, 2009, 160 s. ISBN 978-80-904311-0-2 (Váz.).
- [24] POULEK, V. Solar Tracker TRAXLE. PV pumps [online]. 2010 [cit. 2012-03-24]. Dostupné z: <http://www.pvpumps.com/koncentr.htm>.
- [25] POULEK, V. Sledovač Slunce Traxle. PV pumps [online]. 2010 [cit. 2012-03-24]. Dostupné z: <http://www.pvpumps.com/sledovac.htm>.
- [26] Faktory ovlivňující činnost solární elektrárny. Sunlux [online]. 10.6. 2011 [cit. 2012-03-24]. Dostupné z: <http://www.sunlux.cz/cs/sluzby/realizace-na-klic/345-ovlivnujici-faktory-fve>
- [27] BŘEZINA, F. Faktory ovlivňující výnos fotovoltaických střídačů. TZB-info [online]. 24.2.2010 [cit. 2012-03-24]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/6267-faktory-ovlivnujici-vynos-fotovoltaickych-stridacu>
- [28] GRÓFOVÁ, J. Vliv stavu atmosféry na účinnost fotovoltaického [online]. 18.4.2007 [cit. 2012-03-24]. Dostupné z: [http://is.muni.cz/th/135862/pedf\\_b/Bakalarska\\_prace.pdf](http://is.muni.cz/th/135862/pedf_b/Bakalarska_prace.pdf)
- [29] MILÉŘ, T. Sluneční záření a atmosféra. Amper.ped.muni [online]. 30.12. 2007 [cit. 2012-03-24]. Dostupné z: <http://amper.ped.muni.cz/~miler/HEUREKA/atmosfera/071226.pdf>
- [30] MIKULČÁK, J., KRAKOVEC, L., KLIMEŠ, B., BARTŮŇEK, J., ŠIROKÝ, J., PAUKROVÁ, M.: Matematické, fyzikální a chemické tabulky. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, n. p. 1970.
- [31] Historie naměřených dat. CMG a MŠ Prostějov [online]. 2012 [cit. 2012-03-31]. Dostupné z: [http://www.cmg.prostejov.cz/svs1/historie\\_rok\\_n.htm](http://www.cmg.prostejov.cz/svs1/historie_rok_n.htm)
- [32] Charakteristika fotovoltaického slunečního článku. *karlov.mff.cuni* [online]. 2006 [cit. 2012-05-10]. Dostupné z: <http://kdt-4.karlov.mff.cuni.cz/stare/ulohy/fotovoltaika.html>

## PŘÍLOHY

### A Panel z monokrystalického křemíku

Tabulka A-1 Naměřené hodnoty pro V-A a výkonovou charakteristiku panelu z monokrystalického křemíku

U (V)	I (mA)	P (mW)	U (V)	I (mA)	P (mW)	U (V)	I (mA)	P (mW)	U (V)	I (mA)	P (mW)
4,230	0,000	0,000	3,820	4,500	17,190	3,390	9,010	30,544	2,320	13,530	31,390
4,190	0,500	2,095	3,780	5,000	18,900	3,340	9,500	31,730	2,040	13,560	27,662
4,150	0,990	4,109	3,740	5,510	20,607	3,280	10,000	32,800	1,780	13,590	24,190
4,090	1,500	6,135	3,700	6,010	22,237	3,210	10,500	33,705	1,500	13,590	20,385
4,050	2,000	8,100	3,650	6,500	23,725	3,140	10,990	34,509	1,100	13,610	14,971
4,010	2,490	9,985	3,600	7,000	25,200	3,060	11,500	35,190	0,690	13,640	9,412
3,960	3,010	11,920	3,560	7,510	26,736	2,960	12,000	35,520	0,270	13,700	3,699
3,910	3,500	13,685	3,510	7,990	28,045	2,860	12,500	35,750	0,000	13,730	0,000
3,860	4,000	15,440	3,450	8,510	29,360	2,700	13,000	35,100			

Tabulka A-2 Naměřené hodnoty výkonu pro úhel naklonění 5°

$\varphi$ (°)	U (V)	I (mA)	P (mW)	$P_{teor}$ (mW)
0,000	2,620	11,680	30,602	30,602
9,000	2,480	11,110	27,553	30,225
18,000	2,450	10,980	26,901	29,104
27,000	2,350	10,510	24,699	27,266
36,000	2,180	9,760	21,277	24,757
45,000	1,920	8,590	16,493	21,639
54,000	1,640	7,330	12,021	17,987
63,000	1,290	5,740	7,405	13,893
72,000	0,760	3,400	2,584	9,456
81,000	0,340	1,520	0,517	4,787
90,000	0,050	0,200	0,010	0,000

Příklad výpočtu teoretického výkonu  $P_{teor} = P_0 \cdot \cos \varphi = 30,602 \text{ mW} \cdot \cos 9^\circ = 30,225 \text{ mW}$

Tabulka A-3 Naměřené hodnoty výkonu pro úhel naklonění 18,5°

$\varphi$ (°)	U (V)	I (mA)	P (mW)	$P_{teor}$ (mW)
0,000	2,050	9,180	18,819	18,819
9,000	2,040	9,100	18,564	18,587
18,000	1,990	8,890	17,691	17,898
27,000	1,980	8,870	17,563	16,768
36,000	1,890	8,490	16,046	15,225
45,000	1,760	7,840	13,798	13,307
54,000	1,550	6,910	10,711	11,062
63,000	1,240	5,530	6,857	8,544
72,000	0,830	3,680	3,054	5,815
81,000	0,450	2,020	0,909	2,944
90,000	0,130	0,570	0,074	0,000

Tabulka A-4 Naměřené hodnoty výkonu pro úhel naklonění 28,5°

$\varphi$ (°)	$U$ (V)	$I$ (mA)	$P$ (mW)	$P_{teor}$ (mW)
0,000	1,780	7,990	14,222	14,222
9,000	1,770	7,900	13,983	14,047
18,000	1,760	7,890	13,886	13,526
27,000	1,710	7,650	13,082	12,672
36,000	1,700	7,610	12,937	11,506
45,000	1,610	7,170	11,544	10,057
54,000	1,390	6,230	8,660	8,360
63,000	1,100	4,900	5,390	6,457
72,000	0,760	3,140	2,386	4,395
81,000	0,450	1,970	0,887	2,225
90,000	0,160	0,780	0,125	0,000



## B Panel z polykrystalického křemíku

Tabulka B-1 Naměřené hodnoty pro V-A a výkonovou charakteristiku panelu z polykrystalického křemíku

U (V)	I (mA)	P (mW)	U (V)	I (mA)	P (mW)	U (V)	I (mA)	P (mW)	U (V)	I (mA)	P (mW)
9,070	0,060	0,560	8,090	28,010	226,601	6,940	49,800	345,612	3,690	51,500	190,035
9,000	1,800	16,506	8,010	30,000	240,300	6,890	49,800	343,122	3,180	51,800	164,724
8,880	4,020	35,698	7,940	32,000	254,080	6,840	49,900	341,316	2,990	52,100	155,779
8,750	6,140	53,725	7,880	34,000	267,920	6,840	49,900	341,316	2,690	52,400	140,956
8,690	8,030	69,781	7,810	36,000	281,160	6,790	49,900	338,821	2,650	52,500	139,125
8,640	9,990	86,314	7,730	38,010	293,817	6,740	49,900	336,326	2,210	53,000	117,130
8,580	12,030	103,217	7,660	40,000	306,400	6,690	49,900	333,831	2,150	52,100	112,015
8,520	13,980	119,110	7,570	42,000	317,940	6,650	50,000	332,500	1,890	53,600	101,304
8,460	16,010	135,445	7,480	44,000	329,120	6,600	50,000	330,000	1,150	54,000	62,100
8,390	18,000	151,020	7,370	46,100	339,757	6,550	50,000	327,500	0,600	54,400	32,640
8,320	20,120	167,398	7,240	48,000	347,520	6,060	50,100	303,606	0,490	54,500	26,705
8,250	21,980	181,335	7,150	49,000	350,350	5,640	50,500	284,820	0,300	54,700	16,410
8,200	23,910	196,062	7,060	49,400	348,764	5,620	50,200	282,124	0,010	54,800	0,548
8,140	25,930	211,070	7,020	49,700	348,894	4,670	51,000	238,170			

Tabulka B-2 Naměřené hodnoty výkonu pro úhel naklonění 5°

$\varphi$ (°)	U (V)	I (mA)	P (mW)	$P_{teor}$ (mW)
0,000	6,470	41,700	269,799	269,799
9,000	6,160	39,690	244,490	266,477
18,000	5,660	36,460	206,364	256,594
27,000	5,490	35,410	194,401	240,393
36,000	5,440	35,110	190,998	218,272
45,000	5,120	32,980	168,858	190,777
54,000	5,090	32,780	166,850	158,584
63,000	4,410	28,420	125,332	122,486
72,000	3,810	24,730	94,221	83,372
81,000	3,010	19,210	57,822	42,206
90,000	0,150	0,950	0,143	0,000

Tabulka B-3 Naměřené hodnoty výkonu pro úhel naklonění 18,5°

$\varphi$ (°)	U (V)	I (mA)	P (mW)	$P_{teor}$ (mW)
0,000	6,080	39,240	238,579	238,579
9,000	5,940	38,320	227,621	235,642
18,000	5,350	34,710	185,699	226,902
27,000	5,010	32,300	161,823	212,576
36,000	4,810	31,010	149,158	193,015
45,000	4,440	30,060	133,466	168,701
54,000	3,960	25,520	101,059	140,233
63,000	3,230	20,810	67,216	108,313
72,000	2,520	16,300	41,076	73,725
81,000	1,460	9,400	13,724	37,322
90,000	0,480	3,130	1,502	0,000

Tabulka B-4 Naměřené hodnoty výkonu pro úhel naklonění 28,5°

$\varphi$ (°)	$U$ (V)	$I$ (mA)	$P$ (mW)	$P_{teor}$ (mW)
0,0000	5,1300	33,1100	169,8543	169,8543
9,0000	4,8500	31,2800	151,7080	167,7631
18,0000	4,8200	31,1000	149,9020	161,5410
27,0000	4,2300	27,2600	115,3098	151,3413
36,0000	3,6000	23,1800	83,4480	137,4150
45,0000	3,1500	20,2900	63,9135	120,1051
54,0000	2,7500	17,6600	48,5650	99,8379
63,0000	2,4100	15,5300	37,4273	77,1122
72,0000	2,0300	13,0000	26,3900	52,4879
81,0000	1,4700	9,4800	13,9356	26,5711
90,0000	0,5200	3,3700	1,7524	0,0000