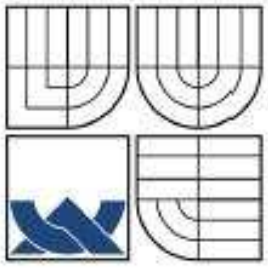
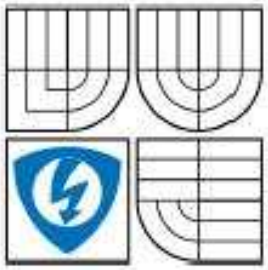


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

EFEKTIVNOST PROVOZU FOTOVOLTAICKÝCH GENERÁTORŮ

OPERATIONAL EFFICIENCY OF PHOTOVOLTAIC GENERATORS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Bc. FILIP KOVAL
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. JAN GREGOR, CSc.
SUPERVISOR

BRNO 2008

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

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektroenergetika

Student: Koval Filip, Bc. ***ID:*** 47510
Ročník: 2 ***Akademický rok:*** 2007/08

NÁZEV TÉMATU:

Efektivnost provozu fotovoltaických generátorů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Návrh opatření k intenzifikaci využití a optimalizaci provozu fotovoltaického generátoru v reálných provozních podmínkách a jejich experimentální ověření.
1. Teoreticky analyzujte pozitivní i negativní působení koncentrátorů slunečního záření na provoz FV generátoru.
2. Navrhněte soubor měřených veličin k podrobnému sledování vlivu provozních podmínek na efektivnost využití FV genrátoru.
3. Realizujte ověřovací měření na rekonstruovaném experimentálním uspořádání s generátorem typu ..... s využitím automatizovaného monitorovacího systému v solární laboratoři UEEN.
4. Vyhodnoťte provedená měření a porovnejte dosažené výsledky s teoretickými předpoklady.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího

Termín zadání: 17.12.2007 ***Termín odevzdání:*** 28.5.2008

Vedoucí projektu: Ing. Jan Gregor, CSc.

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA
POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení:	Bc. Filip Koval
Bytem:	Mikuláškovo náměstí 572/11, 625 00, Brno - Bohunice
Narozen/a (datum a místo):	27.4.1983, Brno

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

se sídlem Údolní 244/53, 602 00, Brno

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1
Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):
   - □ disertační práce
   - x diplomová práce
   - □ bakalářská práce
   - □ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....

   (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP:	Efektivnost provozu fotovoltaických generátorů
Vedoucí/ školitel VŠKP:	Ing. Jan Gregor, CSc.
Ústav:	Ústav elektroenergetiky
Datum obhajoby VŠKP:	9.6.2008

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v*:

- x tištěné formě – počet exemplářů - 1
- x elektronické formě – počet exemplářů - 2

* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2
Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizovaní výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
   - x ihned po uzavření této smlouvy
   - □ 1 rok po uzavření této smlouvy
   - □ 3 roky po uzavření této smlouvy
   - □ 5 let po uzavření této smlouvy
   - □ 10 let po uzavření této smlouvy

   (z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3
Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísni a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 27.5.2008

Doc. Ing. Petr Toman, Ph. D.	Bc. Filip Koval
Nabyvatel	Autor

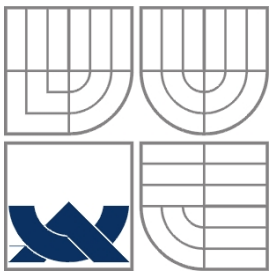
Bibliografická citace práce:

KOVAL, F. *Efektivnost provozu fotovoltaických generátorů.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 48 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Gregor, CSc.

Prohlašuji, že jsem svou **diplomovou práci** vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

Zároveň bych na tomto místě chtěl poděkovat vedoucímu **diplomové práce** Ing. Janu Gregorovi, CSc. za cenné rady a připomínky k mé práci, poskytnutou literaturu a svým rodičům za podporu během celé doby mého studia.

Bc. Filip Koval



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

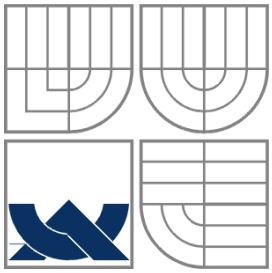
Efektivnost provozu fotovoltaických generátorů

Bc. Filip Koval

vedoucí: Ing. Jan Gregor, CSc.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2008

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Faculty of Electrical Engineering and Communication

Department of Electrical Power Engineering

Master's Thesis

Operational efficiency of photovoltaic generators

by

Bc. Filip Koval

Supervisor: Ing. Jan Gregor, CSc.

Brno University of Technology, 2008

Brno

ABSTRAKT

Cílem teoretické části diplomové práce je především objasnění vlivu provozních podmínek, jako je intenzita slunečního záření, teplota, či znečištění aktivní plochy fotovoltaického generátoru, na zatěžovací a výkonovou charakteristiku fotovoltaického generátoru, resp. na účinnost fotovoltaické konverze. Jsou posuzovány možné varianty zvyšující efektivnost využití fotovoltaického generátoru, jako je koncentrace slunečního záření, ochlazování aktivní plochy fotovoltaického generátoru či aplikace optimalizačního obvodu.

Stěžejní část diplomové práce je věnována praktické realizaci experimentálního zařízení, konkrétně fotovoltaického generátoru typu MSQ36-10 s orientovanými koncentrátory slunečního záření. Praktická realizace zahrnuje návrh konstrukce experimentální části diplomové práce s následným návrhem pohybového cyklu fotovoltaického generátoru nezbytného k adekvátní simulaci variant konfigurací řešených pomocí jediného testovacího fotovoltaického generátoru. Navazuje popis konstrukce vlastního experimentálního zařízení s výčtem měřících míst úlohy. Pro měření požadovaných veličin a následný sběr dat je využito automatického monitorovacího systému fungujícího jako samostatná měřící úloha a probíhajícího ve dvou krocích. První krok představuje měření všech žádaných veličin, ve druhém kroku je potom provedeno měření s připojeným optimalizačním obvodem, jehož úkolem je nastavení nejlepšího pracovního bodu fotovoltaického generátoru s ohledem na aktuální provozní podmínky.

Záměrem diplomové práce je experimentální ověření výhodnosti aplikace koncentrátorů slunečního záření, orientace samotného fotovoltaického generátoru, či jejich vzájemné kombinace, a to pomocí fotovoltaického generátoru typu MSQ36-10. Cílem je vyhodnocení dosaženého energetického zisku pro jednotlivá uspořádání experimentálního zařízení a to při proměnných provozních podmínkách.

KLÍČOVÁ SLOVA: fotovoltaický generátor; sluneční energie; účinnost fotovoltaické konverze; fotovoltaika; koncentrace slunečního záření; vliv provozních podmínek; orientované koncentrátory; experimentální zařízení; optimalizace zatěžování;

ABSTRACT

Objective of master's thesis theoretical part is especially to illustrate influence of operation conditions, such as solar radiation, temperature or pollution of photovoltaic generator active area, on load and power characteristics of photovoltaic generator, or more precisely on photovoltaic conversion efficiency. Possible variants of increasing effectivity of using photovoltaic generator are explored, such as solar radiation concentration, photovoltaic generator active area cooling or aplication of optimalization circuit.

Pivotal part of master's thesis is focused on experimental device practical realisation, concretely type MSQ36-10 photovoltaic generator with oriented concentrators of solar radiation. Practical realisation includes design of master's thesis experimental part construction with subsequent design of photovoltaic generator motion cycle necessary for adequate simulation of configuration variants solved using single testing photovoltaic generator. Description of own experimental device construction with list of measuring places used in task takes up. It is used automatic monitoring system working as independent measurement task for required values measuring and consecutive data collecting. It is done in two phases. First phase is measurement of all required values, in second phase measurement with attached optimalization circuit is made. Optimalization circuit sets best working point of photovoltaic generator according to actual working conditions.

Master's thesis intention is experimental verification of solar radiation concentrators application convenience, orientation of photovoltaic generator or its mutual combination, namely using type MSQ36-10 photovoltaic generator. Objective is evaluation of reached energetic gain for all experimental device layouts in variable operating conditions.

KEY WORDS: photovoltaic generator; solar energy; photovoltaic conversion efficiency; photovoltaic; solar radiation concentration; operational conditions influence; oriented concentrators; experimental device; load optimalization;

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ **11**

SEZNAM TABULEK **12**

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK **13**

1 VYUŽITÍ SLUNEČNÍ ENERGIE, JEJÍ VÝHODY A NEVÝHODY **15**

2 VLIV PROVOZNÍCH PODMÍNEK NA FOTOVOLTAICKÝ GENERÁTOR **16**

3 MOŽNOSTI ZVYŠOVANÍ EFEKTIVNOSTI VYUŽITÍ FOTOVOLTAICKÉHO GENERÁTORU **20**

4 POPIS EXPERIMENTÁLNÍHO ZAŘÍZENÍ **23**

4.1 CÍLE EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI DIPLOMOVÉ PRÁCE **23**

4.2 POHYBOVÝ CYKLUS VÍCEÚČELOVÉHO FOTOVOLTAICKÉHO GENERÁTORU **24**

4.2.1 JEDNOTLIVÉ FÁZE KAŽDÉHO POHYBOVÉHO CYKLU 25

4.2.2 VÝPOČET ODPOVÍDAJÍCÍCH ÚHLŮ NATOČENÍ 27

4.3 OPTIMALIZACE ZATĚŽOVÁNÍ FOTOVOLTAICKÉHO GENERÁTORU **29**

4.4 POPIS KONSTRUKCE FOTOVOLTAICKÉHO GENERÁTORU **31**

4.5 MĚŘÍCÍ MÍSTA EXPERIMENTÁLNÍ ÚLOHY **38**

4.6 POPIS MĚŘÍCÍHO SYSTÉMU **39**

4.6.1 ORGANIZACE VLASTNÍHO MĚŘENÍ 40

5 NAMĚŘENÉ HODNOTY **41**

6 ZÁVĚR **42**

POUŽITÁ LITERATURA **43**

PŘÍLOHA A **44**

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2-1 Zatěžovací a výkonová charakteristika fotovoltaického generátoru [2] 16

Obr. 2-2 Zatěžovací a výkonová charakteristika závislá na intenzitě slunečního záření G [5] 17

Obr. 2-3 Zatěžovací a výkonová charakteristika závislá na teplotě [5] ϑ 18

Obr. 3-1 Koncentrace slunečního záření za použití dvou rovinných zrcadel [2] 20

Obr. 3-2 Koncentrace slunečního záření prostřednictvím pyramidového koncentrátoru [2] 21

Obr. 4-1 Experimentální zařízení představované trojicí fotovoltaických generátorů [2] 23

Obr. 4-2 Orientace fotovoltaického generátoru a koncentrátorů slunečního záření 24

Obr. 4-3 1. fáze každého pohybového cyklu 25

Obr. 4-4 2. fáze každého pohybového cyklu 26

Obr. 4-5 3. fáze každého pohybového cyklu 26

Obr. 4-6 4. fáze každého pohybového cyklu 27

Obr. 4-7 5. fáze každého pohybového cyklu 27

Obr. 4-8 Algoritmus pro řešení optimalizace zatížení [5] 30

Obr. 4-9 Náhradní schéma zvyšujícího a snižujícího DC-DC měniče [5] 31

Obr. 4-10 Náhradní schéma zvyšujícího DC-DC měniče [5] 31

Obr. 4-11 Detail krokového motoru Superior Electric (SLO-SYN) 33

Obr. 4-12 Detail krokových motorů Sankyo orientujících rovinná zrcadla 34

Obr. 4-13 Ventilátor SUNON typu KD 1206 PTS1.GN [6] 34

Obr. 4-14 Experimentální zařízení simulující provoz orientovaného fotovoltaického generátoru bez koncentrátorů slunečního záření 35

Obr. 4-15 Experimentální zařízení simulující provoz průběžně orientovaného fotovoltaického generátoru s napevno fixovanými zrcadlovými koncentrátory 36

Obr. 4-16 Experimentální zařízení simulující provoz trvale orientovaného fotovoltaického generátoru na jih s pevně fixovanými koncentrátory pod úhlem 60° 37

Obr. 4-17 Experimentální zařízení simulující fotovoltaický generátor s aktivní plochou trvale orientovanou na jih opatřený pohyblivými zrcadly 37

Obr. 4-18 Zapojení multiplexerů (uprostřed MUX 0, blíže MUX 1) 40

SEZNAM TABULEK

Tab. 4-1 Vypočtené úhly pro jednotlivé krokové motory v závislosti na čase *28*

Tab. 4-2 Rozměry experimentálního zařízení *32*

Tab. 4-3 Parametry krokového motoru Superior Electric (SLO-SYN) *32*

Tab. 4-4 Parametry krokových motorů Sankyo *33*

Tab. 4-5 Parametry ventilátorů SUNON [6] *35*

Tab. 4-6 Přehled měřících míst *38*

Tab. 4-7 Cejchovní rovnice teplotních čidel KTY81/210 ..... *39*

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

A	krokový motor orientující fotovoltaický generátor kolem své osy	-
B	krokový motor orientující levé zrcadlo fotovoltaického generátoru	-
C	krokový motor orientující pravé zrcadlo fotovoltaického generátoru	-
G	intenzita slunečního záření	W/m^2
$G_{20\%}$, $G_{50\%}$, $G_{100\%}$	intenzita slunečního záření při 20 %, 50 %, 100 %	W/m^2
E_o	doba ukončení orientace fotovoltaického generátoru a zrcadel	h
I	elektrický proud	A
I_{aku}	elektrický proud akumulátorové baterie	A
I_f	fotovoltaický proud	A
I_k, I_{k1}	elektrický proud nakrátko	A
I_n	jmenovitý proud fotovoltaického generátoru	A
I_{opt1}, I_{opt2}	optimální elektrický proud	A
I_p	elektrický proud fotovoltaického generátoru	A
I_V	elektrický proud ventilátorů	A
N	normála fotovoltaického generátoru	-
P	elektrický výkon	W
S	stupeň koncentrace	-
S_o	doba začátku orientace fotovoltaického generátoru a zrcadel	h
S_p	plocha přijímače slunečního záření	m^2
S_z	plocha zrcadla odrážejícího sluneční záření	m^2
T_{pd}	teplota spodní strany fotovoltaického generátoru	V (°C)
T_{ph}	teplota aktivní plochy fotovoltaického generátoru	V (°C)
T_V	venkovní teplota	V (°C)
T_{1in}	teplota na vstupu ventilátoru číslo 1	V (°C)
T_{1out}	teplota na výstupu ventilátoru číslo 1	V (°C)
T_{2in}	teplota na vstupu ventilátoru číslo 2	V (°C)
T_{2out}	teplota na výstupu ventilátoru číslo 2	V (°C)
U	elektrické napětí	V
U_{aku}	napětí akumulátorové baterie	V
U_{opt1}, U_{opt2}	optimální elektrické napětí	V

$U_{opt,0°C}$	optimální napětí při teplotě 0 °C	V
$U_{opt,20°C}$	optimální napětí při teplotě 20 °C	V
$U_{opt,40°C}$	optimální napětí při teplotě 40 °C	V
$U_{opt,60°C}$	optimální napětí při teplotě 60 °C	V
$U_{opt,100\%}$	optimální napětí při intenzitě slunečního záření 100 %	V
$U_{opt,50\%}$	optimální napětí při intenzitě slunečního záření 50 %	V
$U_{opt,20\%}$	optimální napětí při intenzitě slunečního záření 20 %	V
U_p	elektrické napětí fotovoltaického generátoru	V
U_{py}	elektrické napětí pyranometru	V
U_V	elektrické napětí na ventilátorech	V
U_0, U_{01}	elektrické napětí naprázdno	V
d	průměr válcových čepů	mm
t	čas	s
t_C	celková doba denního cyklu	min
t_p	časový interval mezi jednotlivými fázemi jednoho cyklu	min
α	úhel, který svírá normála a směrová osa východ-západ	°
β	úhel, který svírá levý koncentrátor s rovinou fotovoltaického generátoru	°
γ	úhel, který svírá pravý koncentrátor s rovinou fotovoltaického generátoru	°
θ	Celsiova teplota	°C
λ	vlnová délka záření	nm

1 VYUŽITÍ SLUNEČNÍ ENERGIE, JEJÍ VÝHODY A NEVÝHODY

V posledních letech sílí potřeba po větším využívání alternativních zdrojů elektrické energie, a to zejména kvůli redukci spotřeby zdrojů neobnovitelných, jako je ropa, zemní plyn nebo uhlí, v návaznosti na neustále se zvyšující růst celkové spotřeby elektrické energie.

Jedním z alternativních, a zároveň základních, zdrojů elektrické energie, který se řadí mezi zdroje obnovitelné, tedy nevyčerpatelné, patří energie získaná ze Slunce – sluneční energie. Dnes však dokážeme „zpracovat“ pouze nepatrnou část slunečního záření, které k nám proudí z povrchu Slunce. Přibližně je to jedna dvoumiliardtina, tedy z $3{,}8.10^{23}$ kW (celkový výkon vyzařovaný Sluncem) je to asi $1{,}8.10^{14}$ kW. Dále viz. [1].

Mezi nesporné výhody energie získané ze slunečního záření patří, že je prakticky nevyčerpatelná a čistá, tedy neznečišťuje životní prostředí. Také nesmíme opomenout skutečnost, že je poměrně levná, protože sluneční záření dopadá na Zemi neustále, a nemusí se pracně získávat například těžbou, fermentací, apod.

Sluneční energie má však také své nevýhody, a to že sluneční záření dopadá na Zemi ve zředěné podobě, což má za následek malou koncentraci slunečního záření na aktivní ploše přijímacích zařízení, kterou je energie ze slunečního záření získávána. Další značnou nevýhodou je skutečnost, že sluneční energie nedopadá na Zemi, respektive na danou lokaci po celý den, což je zapříčiněno otáčením Země kolem své vlastní osy. Za nevýhodu bychom mohli také považovat to, že získanou sluneční energii nelze dlouhodobě skladovat ve velkých množstvích, jako je to běžné např. u uhlí nebo ropy.

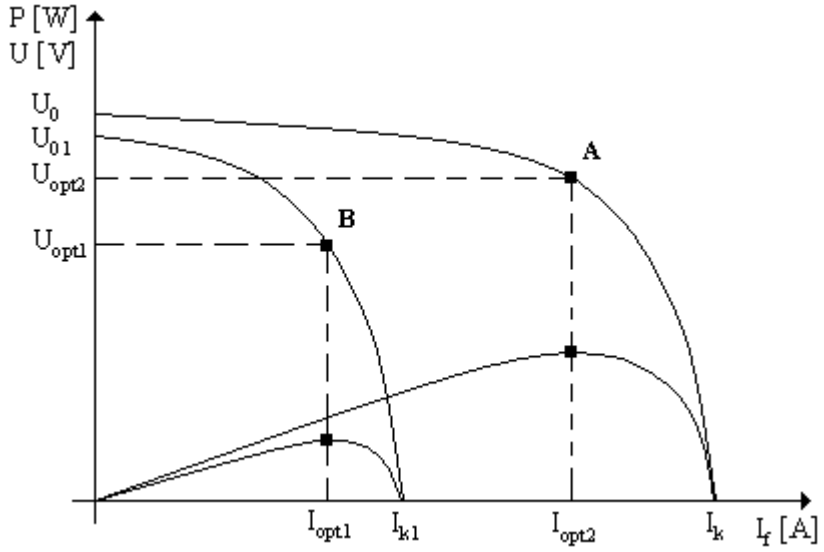
Získanou sluneční energii můžeme využít pomocí dvou základních fyzikálních principů. Jedním z nich je fotovoltaická přeměna [2], kdy se získané sluneční záření transformuje ve fotovoltaickém generátoru na principu PN přechodu na stejnosměrný proud, a ten může být dále rozváděn přes střídač do napájecí sítě (grid-on systémy) nebo akumulován v akumulační baterii. Tento způsob výroby elektrické energie je v dnešní době investičně stále poměrně náročný, jelikož fotovoltaické generátory mají poměrně nízkou účinnost přeměny slunečního záření na elektrickou energii, a to 9 – 12 %. V případě, že k fotovoltaickým generátorům připojíme koncentrátory slunečního záření, vzroste míra využití fotovoltaického generátoru přibližně na 15 – 18 %.

Druhý fyzikální princip spočívá ve fototermické přeměně, kdy dopadající sluneční záření ohřívá pracovní médium (teplonosná kapalina nebo plyn) kolující v absorbéru termálního kolektoru. Absorbér tedy zachycuje energii dopadajícího slunečního záření, a ve formě tepla ji předává pracovnímu médiu. Takto ohřáté pracovní médium koluje zpravidla do cílového objektu (výměník tepla, bojler, apod.), kde je následně toto teplo využito dle záměru. Tento způsob využití sluneční energie je investičně mnohem příznivější, neboť termální kolektory dosahují daleko větší účinnosti, a to až kolem 80 %. Jejich míru využití je možné ještě zvýšit prostřednictvím koncentrátorů slunečního záření.

Jelikož je energetický zisk z fotovoltaické přeměny poměrně malý, dochází ze strany odborníků ke snaze zvýšit efektivnost fotovoltaických generátorů.

2 VLIV PROVOZNÍCH PODMÍNEK NA FOTOVOLTAICKÝ GENERÁTOR

Fotovoltaický generátor je charakterizován zatěžovací a výkonovou charakteristikou, která je znázorněna na „obr. 2-1“ [2]. Tyto charakteristiky jsou více či méně ovlivňovány různými provozními podmínkami, jak je podrobněji vysvětleno v následujícím textu.



Obr. 2-1 Zatěžovací a výkonová charakteristika fotovoltaického generátoru [2]

Charakteristickými parametry fotovoltaického generátoru jsou hodnota proudu nakrátko (zkratový proud) označená jako I_k, resp. I_{k1} a napětí naprázdno U_0, resp. U_{01}. Proud nakrátko můžeme definovat jako maximální proud, který je schopen fotovoltaický generátor při dané intenzitě slunečního záření dodávat. Jeho velikost je dána intenzitou slunečního záření a rozměry aktivní plochy fotovoltaického generátoru. Napětí naprázdno vyjadřuje maximální napětí, kterého je možno dosáhnout, pokud není fotovoltaický generátor připojen na žádný spotřebič [3].

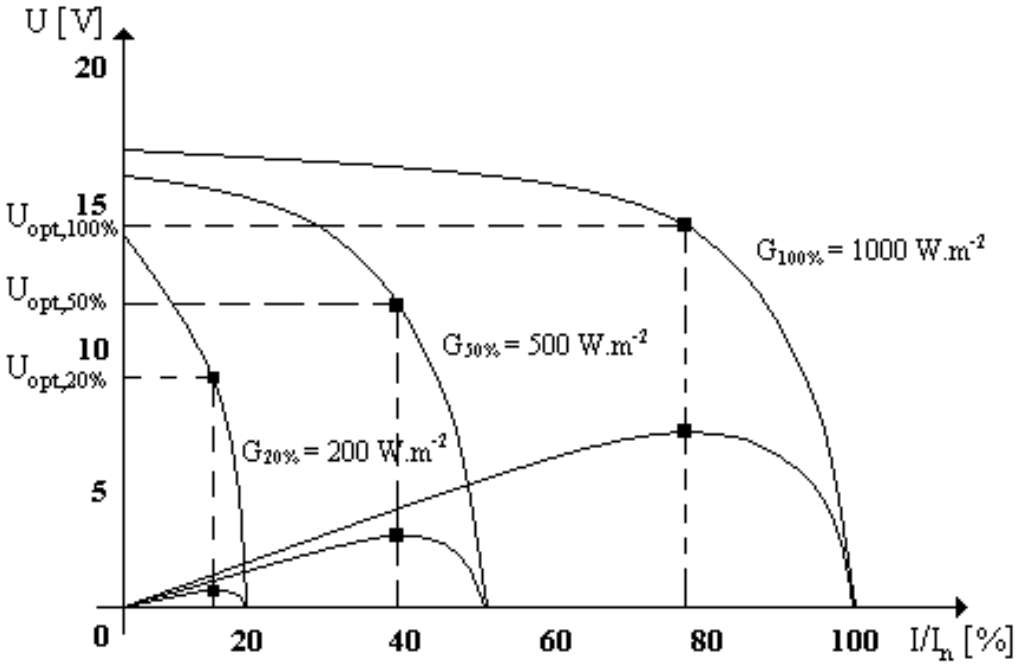
Pracovní bod **A**, resp. **B** na „obr. 2-1“, označují oblasti s optimální zátěží, které odpovídají maximu dosažitelného výkonu na odpovídající charakteristice.

Optimální napětí U_{opt1}, resp. U_{opt2} a optimální proud I_{opt1}, resp. I_{opt2} je dán pracovními body jednotlivých charakteristik a představuje hodnoty proudu a napětí, při kterých fotovoltaický generátor dodává maximální možný výkon.

Výkon fotovoltaického generátoru je definován jako součin proudu vyráběného fotovoltaickým generátorem a jeho napětím. V bodech nakrátko i naprázdno nedodává fotovoltaický generátor žádný výkon.

Různorodost provozních podmínek, zejména změna intenzity slunečního záření, ale i změna pracovní teploty, spektrálního složení dopadajícího slunečního záření nebo znečištění aktivní plochy fotovoltaického generátoru má za následek změnu účinnosti fotovoltaické konverze. Jinými slovy, se změnou provozních podmínek dochází nevyhnutelně ke změně zatěžovací charakteristiky fotovoltaického generátoru. Díky tomu dochází k neustálým změnám lokace pracovního bodu na pracovní křivce daného fotovoltaického generátoru.

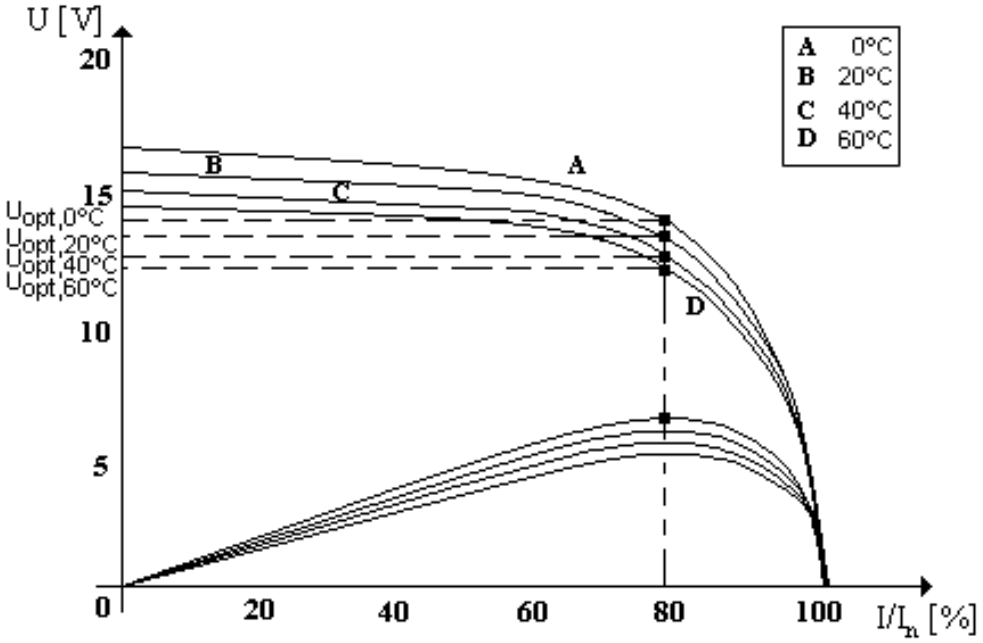
Na „obr. 2-2“ je znázorněn vliv změny intenzity slunečního záření *G* na průběh zatěžovací a výkonové charakteristiky fotovoltaického generátoru [5].



Obr. 2-2 Zatěžovací a výkonová charakteristika závislá na intenzitě slunečního záření G [5]

Na „obr. 2-2“ jsou vyneseny tři dvojice charakteristik, tedy zatěžovací a výkonové charakteristiky fotovoltaických generátorů. Jednotlivé průběhy jsou odstupňovány podle intenzity dopadajícího slunečního záření. Kde na první průběh působí zdroj energie, resp. Slunce, nejslaběji, a to o celkové hodnotě intenzity slunečního záření $G_{20\%} = 200\ W.m^2$, naopak na poslední průběh nejsilněji ($G_{100\%} = 1000\ W.m^2$). Z obrázku je patrné, že různé hodnotě intenzity slunečního záření odpovídá různá zatěžovací a výkonová charakteristika fotovoltaického generátoru, a tomu odpovídá poloha optimálního pracovního bodu. Při běžném denním provozu fotovoltaického generátoru dochází ke změnám intenzity slunečního záření, což má za následek snížení energetického zisku.

Zatěžovací a výkonovou charakteristiku fotovoltaického generátoru také výrazně ovlivňují změny teploty ϑ („obr. 2-3“ [5]), kterým je aktivní plocha fotovoltaického generátoru vystavena.



Obr. 2-3 Zatěžovací a výkonová charakteristika závislá na teplotě [5] ϑ

Při nárůstu provozní teploty fotovoltaického generátoru dochází ke zhoršení jeho provozních vlastností, tedy zatěžovací a výkonové charakteristiky, jak je patrné pro případ **40 °C** nebo **60 °C**.

V opačném případě, tedy při poklesu teploty fotovoltaického generátoru, který je vyvolaný poklesem okolní teploty prostředí nebo chlazením aktivní plochy fotovoltaického generátoru, dochází k nezanedbatelnému zlepšení jeho provozní charakteristiky (viz. případ **0 °C**). Standardní provozní charakteristiku fotovoltaického generátoru definuje případ **20 °C**.

Účinnost fotovoltaické konverze také do jisté míry souvisí se spektrálním složením slunečního záření a je dána vlastnostmi polovodičového materiálu užitého k výrobě fotovoltaického generátoru, především šířkou zakázaného pásma, která je u jednotlivých materiálů různá. Každý polovodičový materiál užitý k výrobě fotovoltaického generátoru má definované rozmezí využitelnosti spektra slunečního záření.

V dnešní době se k výrobě fotovoltaických článků upřednostňuje typický polovodičový materiál – křemík (*Si*). A to jednak díky své velké spektrální využitelnosti slunečního záření a jednak díky cenové dostupnosti. Křemík dokáže absorbovat dopadající záření o vlnových délkách, které jsou kratší než $\lambda = 1000\ nm$. Těmto vlnovým délkám odpovídají fotony o energii větší než *1,1 eV*, čemuž odpovídá i šířka zakázaného pásma křemíku. Toto rozmezí se vztahuje na část infračerveného, celé viditelné a ultrafialové spektrum slunečního záření. Dopadá-li tedy na křemík foton o energii menší než *1,1 eV*, projde křemíkem a není absorbován. Když je jeho energie větší než *1,1 eV* (tato energie odpovídá šířce zakázaného pásma křemíku a tedy i jeho absorpční hraně), pak je tento foton absorbován a v polovodiči vznikne jeden volný elektron a jedna volná díra. Energetický rozdíl mezi energií dopadajícího fotonu a šířkou zakázaného pásma křemíku se přeměňuje na teplo.

Poslední provozní podmínkou, která ovlivňuje výsledný energetický zisk fotovoltaického generátoru je znečištění jeho aktivní plochy. Znečištění aktivní plochy může být buď *celkové* nebo *lokální*. Celkové znečištění aktivní plochy by se dalo definovat jako souvislá vrstva nečistot (prach, pyl, sníh, apod.), která rovnoměrně pokrývá celou aktivní plochu fotovoltaického

generátoru. Naproti tomu u lokálního znečištění aktivní plochy dochází k zakrytí pouze části fotovoltaického generátoru, např. jednoho fotovoltaického článku spadlým listem.

V extrémním případě klesá při zakrytí absorpční plochy třeba jen jednoho ze sériově propojených fotovoltaických článků jeho proudová průchodnost a tento článek se může začít chovat jako spotřebič elektrické energie.

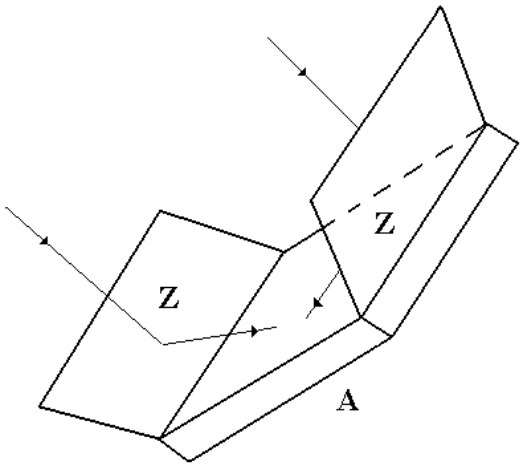
3 MOŽNOSTI ZVYŠOVANÍ EFEKTIVNOSTI VYUŽITÍ FOTOVOLTAICKÉHO GENERÁTORU

Efektivnost přeměny slunečního záření na elektrickou energii je možno zvyšovat několika různými způsoby nebo jejich vzájemnou kombinací. Vzhledem k dříve zmíněné skutečnosti, tedy tomu, že je fotovoltaický generátor, resp. jeho efektivnost přeměny závislá na jeho provozní teplotě, je jedním ze způsobu zvyšování efektivnosti právě jeho chlazení. Snižováním provozní teploty fotovoltaického generátoru dochází ke zlepšení provozní charakteristiky, což má za následek zvýšení účinnosti fotovoltaické konverze. Rozdíly jsou patrné zejména v letních měsících (červenec, srpen), kdy teplota povrchu fotovoltaického generátoru dosahuje až 70 °C. Pokud bychom se rozhodli takto vyzářené teplo využít, jeví se jako značný přínos při chlazení zisk nízkopotenciálního tepla.

Zvýšení efektivnosti využití slunečního záření může být také docíleno orientací aktivní plochy fotovoltaického generátoru dle pohybu Slunce. Podmínkou však je, aby přímá složka slunečního záření vždy dopadala na aktivní plochu fotovoltaického generátoru v kolmém směru.

Dalším možným způsobem, jak lze efektivně zvýšit využití dopadajícího slunečního záření je aplikace koncentrátorů slunečního záření, které soustřeďují (odrážejí) dopadající sluneční paprsky na aktivní plochu fotovoltaického generátoru. Koncentrátory slunečního záření mohou být různých tvarů a typů. Vzhledem k tomu, že vlastní fotovoltaický generátor představuje velkoplošný element, jsou jako koncentrátory vhodná rovinná zrcadla.

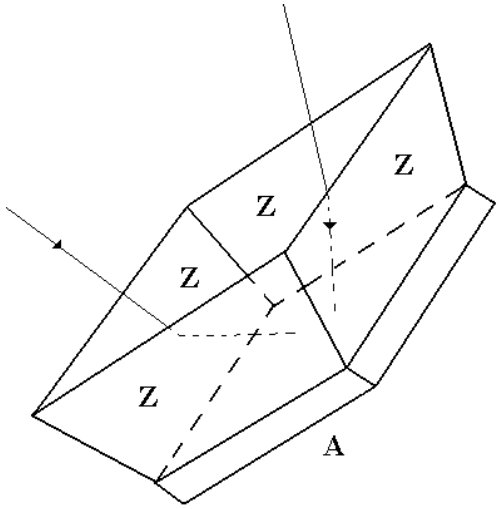
Jedním z možných způsobů, jak efektivně koncentrovat sluneční záření je tedy použití dvou rovinných zrcadel („obr. 3-1“ [2]), která jsou připevněna po obou stranách fotovoltaického generátoru pod úhlem 60° od normály. Takto nastavený úhel sklonu zrcadel se jeví jako optimální, protože při jiných úhlech se odráží větší množství dopadajícího slunečního záření od aktivního povrchu fotovoltaického generátoru než je tomu u úhlu 60°. Pokud zvolíme pro účely koncentrace slunečního záření systém dvou rovinných zrcadel dosáhneme stupně koncentrace $S = 2$.



Obr. 3-1 Koncentrace slunečního záření za použití dvou rovinných zrcadel [2]

Koncentrace slunečního záření může být uskutečněna také prostřednictvím pyramidových koncentrátorů („obr. 3-2“ [2]), které dosahují stupně koncentrace $S = 3$. Jejich čtvercový profil

však vyžaduje čtvercové rozměry fotovoltaických generátorů. Případná orientace fotovoltaického generátoru s pyramidovým koncentrátorem vyžaduje výkonné orientační zařízení. Přitom však není nutné orientovat celý fotovoltaický generátor i s pyramidovým koncentrátorem, plně postačuje použití trvale orientovaného fotovoltaického generátoru na jih se dvěma orientovanými rovinnými zrcadly. Použitím pyramidového koncentrátoru také dochází k většímu teplotnímu zatížení fotovoltaického generátoru, než je tomu u systému dvou rovinných zrcadel jako koncentrátoru slunečního záření.



Obr. 3-2 Koncentrace slunečního záření prostřednictvím pyramidového koncentrátoru [2]

S přihlédnutím k výše uvedeným poznatkům a skutečnosti, že v experimentální části této diplomové práce figuruje fotovoltaický generátor obdélníkových rozměrů jeví se jako výhodnější použití systému dvou rovinných zrcadel jako koncentrátoru slunečního záření.

U koncentrátorů slunečního záření můžeme určit stupeň koncentrace jako podíl plochy zrcadla ku ploše přijímače podle následujícího vztahu:

$$S = \frac{S_z}{S_p} \ (-;\mathrm{m}^2, \mathrm{m}^2) \tag{3.1}$$

Využitím koncentrátorů slunečního záření sice dochází ke zvýšení energetického zisku fotovoltaického generátoru, ale na druhou stranu tím také dochází ke značnému nárůstu teploty aktivní plochy generátoru, potažmo celého zařízení, což má za následek snížení konečné účinnosti fotovoltaické konverze. Jedna z možných variant, jak tento nežádoucí jev odstranit, spočívá v umístění chladícího zařízení na zadní stranu fotovoltaického generátoru. V úvahu přichází chlazení vzduchem nebo kapalinou. Přestože je kapalinové chlazení bezesporu účinnější, pro doplnění komerčního provedení použitého fotovoltaického generátoru se z hlediska technické náročnosti řešení jeví výhodnější použití aktivních ventilátorů, které nasávají vzduch z okolí a následně s ním ochlazují spodní stranu aktivní plochy fotovoltaického generátoru, čímž dojde ke snížení teploty fotovoltaického generátoru. Ventilátory jsou napájeny ze stejnosměrné akumulační baterie, do které fotovoltaický generátor dodává elektrickou energii. Nedostatečným chlazením fotovoltaického generátoru s koncentrátory slunečního záření, a to zejména v letních měsících, může dojít poměrně rychle k degradaci jeho provozních vlastností, při vyšších stupních

koncentrace může dojít až k jeho vlastní destrukci. S uvážením všech zmíněných možností vede řešení problému jednoznačně na intenzivně chlazený kogenerační měnič.

Veškeré zmíněné způsoby zvyšování efektivnosti využití sluneční energie můžeme libovolně kombinovat, avšak musíme mít na paměti, že čím bude daný systém složitější, bude i nákladnější, a to jak z pohledu ceny pořízení samotného zařízení, tak z pohledu celkové údržby systému a spotřeby elektrické energie.

4 POPIS EXPERIMENTÁLNÍHO ZAŘÍZENÍ

4.1 Cíle experimentální části diplomové práce

Experimentální část této diplomové práce pojednává o způsobu ověření efektivnosti jednotlivých variant provedení v reálných provozních podmínkách. Jednotlivé varianty provedení jsou pak simulovány na fotovoltaickém generátoru typu MSQ36-10 s nastavitelnými zrcadly, který umožňuje simulovat řadu uspořádání zrcadel včetně orientace ke Slunci (dále označovaném jako „víceúčelový“). Cíl této diplomové práce vzniknul jako adekvátní náprava nesrovnalostí, které vyvstaly na povrch při vyhodnocování naměřených výsledků bakalářské práce, na kterou tato diplomová práce volně navazuje.

V bakalářské práci byla ověřována efektivnost využití fotovoltaických generátorů pomocí koncentrátorů slunečního záření. Experimentální zařízení zde představovaly tři fotovoltaické generátory typu MSQ36-10 stejné výrobní řady umístěné na společné kovové konstrukci („obr. 4-1“ [2]). Jedním z nich byl fotovoltaický generátor trvale orientovaný směrem na jih, který zastával funkci porovnávacího fotovoltaického generátoru. Dalším článkem celého experimentálního zařízení byl orientovaný fotovoltaický generátor bez koncentrátorů slunečního záření. Trojici fotovoltaických generátorů uzavíral fotovoltaický generátor, který byl také trvale orientovaný směrem na jih, ale navíc byl vybaven dvěmi orientovanými zrcadly, která se natáčela podle pohybu Slunce po obloze. Při stejných provozních podmínkách však tyto generátory vykazovaly různé naměřené hodnoty napětí U_p a proudu I_p. Tato chyba byla odstraněna tak, že za výchozí hodnoty byly zvoleny hodnoty naměřené porovnávacím fotovoltaickým generátorem a naměřené hodnoty zbylých dvou fotovoltaických generátorů byly upraveny prostřednictvím jejich korekčních součinitelů, které se však měnily se změnou provozních podmínek. Zprůměrňované korekční součinitele pro jednotlivé fotovoltaické generátory byly proto stanoveny porovnáním nábojových zisků z jednodenního měření. Aby byly korekční součinitele stanoveny s dostatečnou přesností, muselo by měření při stejných provozních podmínkách probíhat delší časový úsek..

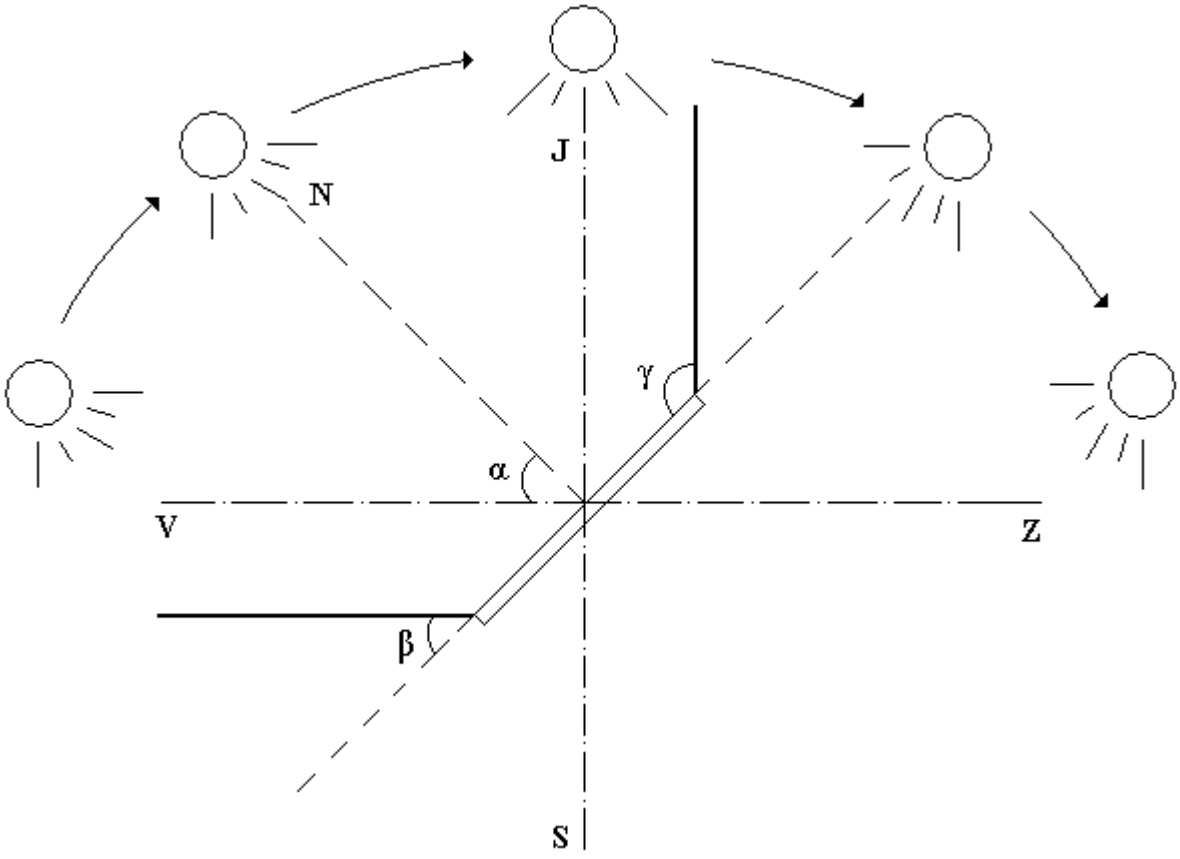
Obr. 4-1 Experimentální zařízení představované trojicí fotovoltaických generátorů [2]

Tento nedostatek je proto v této diplomové práci vyřešen právě vytvořením víceúčelového fotovoltaického generátoru, který při absolvování navrženého denního pohybového cyklu zastane v jednotlivých fázích (viz. **kapitola 4.2**) funkce všech tří fotovoltaických generátorů užitých v bakalářské práci.

V bakalářské práci jsme porovnávali efektivnost koncentrace slunečního záření při daných provozních podmínkách. V diplomové práci je tato skutečnost ještě rozšířena o porovnání s maximálním dosažitelným energetickým ziskem dosaženým prostřednictvím optimalizačního obvodu (viz. **kapitola 4.3**).

4.2 Pohybový cyklus víceúčelového fotovoltaického generátoru

Nastavování požadované polohy fotovoltaického generátoru a koncentrátorů slunečního záření, v našem případě rovinných zrcadel, je řešeno pomocí trojice krokových motorů pracujících nezávisle na sobě. Jedná se o samostatnou úlohu, která není nijak svázána s měřícím procesem. Začátek denního pohybového cyklu je nastaven na *6:00*, konec potom na *18:00*. Po skončení tohoto cyklu, tedy v *18:00*, dochází k automatickému návratu fotovoltaického generátoru zpět do polohy odpovídající začátku denního cyklu. Ve zbylých denních hodinách je úloha nefunkční (stejně jako úloha měření), jelikož intenzita slunečního záření *G* v tuto dobu téměř neovlivňuje výsledný energetický zisk.



Obr. 4-2 Orientace fotovoltaického generátoru a koncentrátorů slunečního záření

„Obr. 4-2“ zachycuje princip orientace fotovoltaického generátoru a zrcadel. Cílem je stanovit úhly natočení jednotlivých komponent experimentálního zařízení odpovídající aktuální poloze Slunce na obloze. Tyto úhly jsme schopni určit v případě umístění fotovoltaického

generátoru a jeho zrcadel do počátku směrových os (viz. „obr. 4-2“) a zavedením následujících pojmů:

N je normála fotovoltaického generátoru,

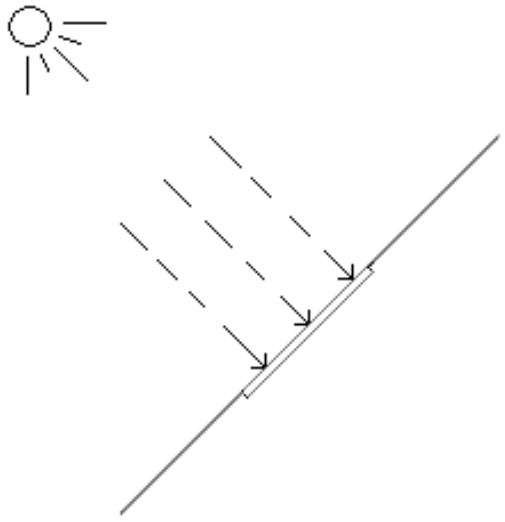
α je úhel, který svírá normála N a směrová osa *V – Z*,

β, resp. γ, vyjadřuje úhlovou vzdálenost levého, resp. pravého, zrcadla od roviny fotovoltaického generátoru.

Celkový denní cyklus obsahuje 29 jednotlivých pohybových cyklů. Jeden pohybový cyklus je složený z 5 po sobě následujících fází. Mezi každou z fází jednoho pohybového cyklu je 5 minutový interval. Během tohoto intervalu probíhá ustálení provozních podmínek fotovoltaického generátoru, a to v poloze, do které byl předtím nastaven příslušnými krokovými motory. Po uplynutí časového intervalu proběhne měřící cyklus (jako samostatná úloha). Po odměření všech sledovaných veličin probíhá druhé kolo měření, nyní však při zapnutém optimalizačním obvodu.

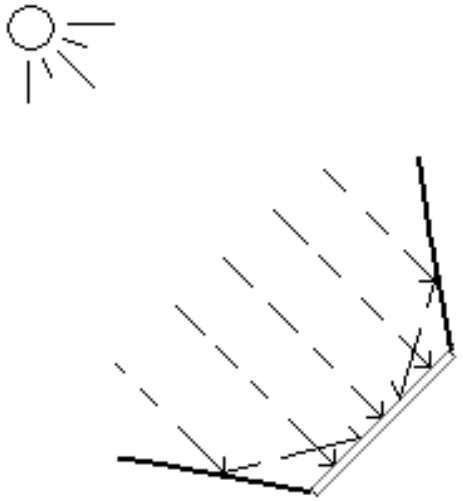
4.2.1 Jednotlivé fáze každého pohybového cyklu

Na začátku každého pohybového cyklu, tedy v 1. fázi (viz. „obr. 4.3“), je fotovoltaický generátor natočen o příslušný úhel (závisí na aktuálním pohybu Slunce po obloze) směrem na západ a zrcadla jsou plně otevřená, tedy úhel mezi každým ze zrcadel a rovinou fotovoltaického generátoru je nulový. Tato fáze simuluje orientovaný fotovoltaický generátor bez koncentrátorů slunečního záření.



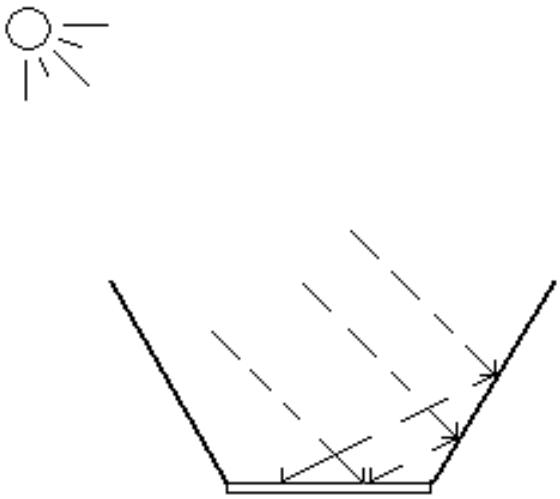
Obr. 4-3 1. fáze každého pohybového cyklu

Ve 2. fázi je fotovoltaický generátor orientován tak, aby aktivní plocha bylo vždy kolmá na směr dopadajících slunečních paprsků a koncentrátory slunečního záření, tedy zrcadla, byla nastavena na hodnotu úhlu sklonu 60° od roviny fotovoltaického generátoru. Tato fáze simuluje provoz průběžně orientovaného fotovoltaického generátoru s napevno fixovanými zrcadlovými koncentrátory – „obr. 4-4“.



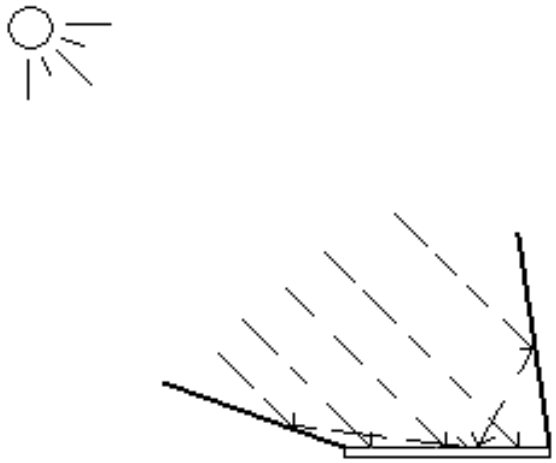
Obr. 4-4 2. fáze každého pohybového cyklu

Následující fáze cyklu (3. fáze) je charakteristická nastavením fotovoltaického generátoru směrem na jih a poloha koncentrátorů slunečního záření zůstane nezměněna, jak je tomu na „obr. 4-5“. Touto částí cyklu se snažíme nasimulovat provoz fotovoltaického generátoru s pevnými zrcadlovými koncentrátory trvale nasměrovaného k jihu.



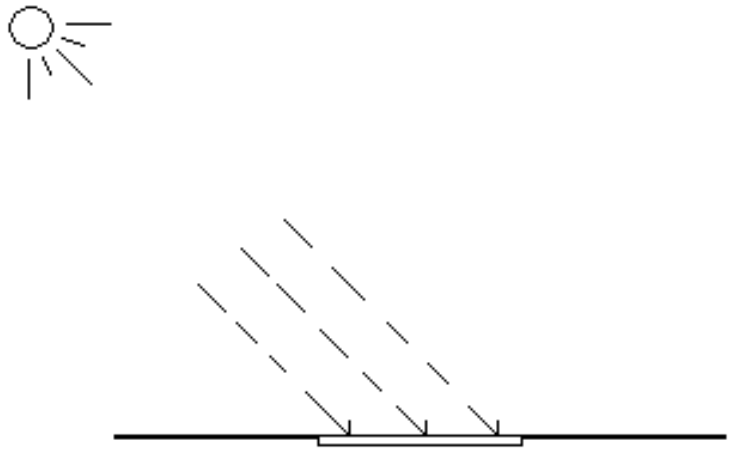
Obr. 4-5 3. fáze každého pohybového cyklu

Ve 4. fázi cyklu („obr. 4-6“) je simulován provoz fotovoltaického generátoru s aktivní plochou trvale orientovanou na jih opatřeného pohyblivými zrcadly nastavovanými do takové polohy, aby byla zaručena co možná největší koncentrace dopadajícího slunečního záření.



Obr. 4-6 4. fáze každého pohybového cyklu

Závěrečná fáze pohybového cyklu spočívá v rozevření zrcadel, kdy je simulován provoz neorientovaného fotovoltaického generátoru bez koncentrátorů slunečního záření, jak je patrné z „obr. 4-7“.



Obr. 4-7 5. fáze každého pohybového cyklu

Aby bylo možné přesně orientovat fotovoltaický generátor a zrcadla do požadovaných poloh, bylo nezbytné sestrojit algoritmus výpočtu, který řeší pro jednotlivé denní časy aktuální nastavení úhlů α, β a γ. V „tab. 4-1“ jsou uvedeny vybrané časy, k nim odpovídající úhly natočení, pořadí fáze v pohybovém cyklu, a který krokový motor je zrovna aktivní.

4.2.2 Výpočet odpovídajících úhlů natočení

Pokud celkovou dobu denního cyklu vyjádřenou v minutách označíme jako t_C a požadovaný časový interval mezi jednotlivými fázemi jednoho cyklu t_P, taktéž vyjádřený v minutách, můžeme pro odpovídající fáze jednoho cyklu určit jednotlivé úhly, a to podle následujících vztahů:

$$\alpha = 180° \cdot \frac{t_P}{t_C} \text{ (°;min, min)} \tag{4.1}$$

$$\beta = 180° \cdot \frac{t_P}{t_C} \text{ (°;min, min)} \tag{4.2}$$

$$\gamma = 60° + \beta \text{ (°;min, min)} \tag{4.3}$$

Aby bylo možné vypočítat jednotlivé úhly natočení, je nejprve nutné zvolit celkovou délku denního cyklu t_C jako:

$$t_C = (E_o - S_o) \cdot 60 \text{ (min;h, h)} \tag{4.4}$$

kde:

E_o je doba ukončení orientace fotovoltaického generátoru a zrcadel,

S_o je doba začátku orientace fotovoltaického generátoru a zrcadel.

Jak už bylo na začátku této kapitoly řečeno, orientování fotovoltaického generátoru a jeho zrcadel probíhá v době od 6:00 do 18:00, tedy dosazením do (4.4) dostaneme:

$$t_C = (18:00 - 6:00) \cdot 60 = 12 \cdot 60 = \underline{\underline{720\,\text{min}}}$$

Časový interval mezi dvěma po sobě následujícími fázemi jednoho pohybového cyklu t_P byl zvolen jako t_P = *5 minut* a pro výpočet úhlů natočení se přímo úměrně zvětšuje o stejnou hodnotu s narůstajícím denním časem.

Následnou aplikací obecných vztahů (4.1), (4.2) a (4.3) na požadované hodnoty t_C a t_P dostáváme pro jednotlivé fáze jednoho pohybového cyklu konkrétní hodnoty úhlů natočení (viz. „tab. 4-1“). Celá tabulka (nezkrácená) je potom umístněna v **PŘÍLOZE A**.

Tab. 4-1 Vypočtené úhly pro jednotlivé krokové motory v závislosti na čase

Čas	**Úhly natočení**			**Pořadí fáze v jednom cyklu**	**t_P**	**Motor v pohybu**
[hh:mm]	*α [°]*	*β [°]*	*γ [°]*	*[-]*	*[min]*	*[-]*
6:00	**0**	**0**	**180**	1.	0	-
6:05	**1,25**	**60**	**120**	2.	5	*A, B, C*
6:10	**90**	**60**	**120**	3.	10	*A*
6:15	**90**	**2,50**	**62,50**	4.	15	*B, C*
6:20	**90**	**0**	**120**	5.	20	*B, C*
6:25	**6,25**	**0**	**180**	1.	25	*A, C*
…	**…**	**…**	**…**	…	…	…
…	**…**	**…**	**…**	…	…	…

11:50	**87,5**	**0**	**180**	1.	350	*A, C*
11:55	**88,75**	**60**	**120**	2.	355	*A, B, C*
12:00	**90**	**60**	**120**	3.	360	*A*
12:05	**90**	**60,83**	**120,83**	4.	365	*B, C*
12:10	**90**	**0**	**120**	5.	370	*B, C*
12:15	**93,75**	**0**	**180**	1.	375	*A, C*
…	**…**	**…**	**…**	…	…	…
…	**…**	**…**	**…**	…	…	…
17:40	**175**	**0**	**180**	1.	700	*A, C*
17:45	**176,25**	**60**	**120**	2.	705	*A, B, C*
17:50	**90**	**60**	**120**	3.	710	*A*
17:55	**90**	**119,17**	**179,17**	4.	715	*B, C*
18:00	**90**	**0**	**120**	5.	720	*B, C*

Pozn.:

Kde ve sloupci **Motor v pohybu** značí:

- *A* – představuje krokový motor, který provádí orientaci fotovoltaického generátoru kolem své osy,
- *B* – je krokový motor orientující levé zrcadlo fotovoltaického generátoru,
- *C* – je krokový motor orientující pravé zrcadlo fotovoltaického generátoru.

Vypočítaná „tab. 4-1“ nám poskytuje dostatečné informace ohledně denních časů a k nim nastavení jednotlivých úhlů natočení. Také udává, který krokový motor se bude o jaký úhel natáčet. Písmenné a úhlové označení záměrně koresponduje, tedy motor *A* vykoná takový počet kroků, které odpovídají změnám úhlu α, atd… Data z této tabulky nám umožňují napsat program samostatně ovládající jednotlivé krokové motory dle potřeby.

4.3 Optimalizace zatěžování fotovoltaického generátoru

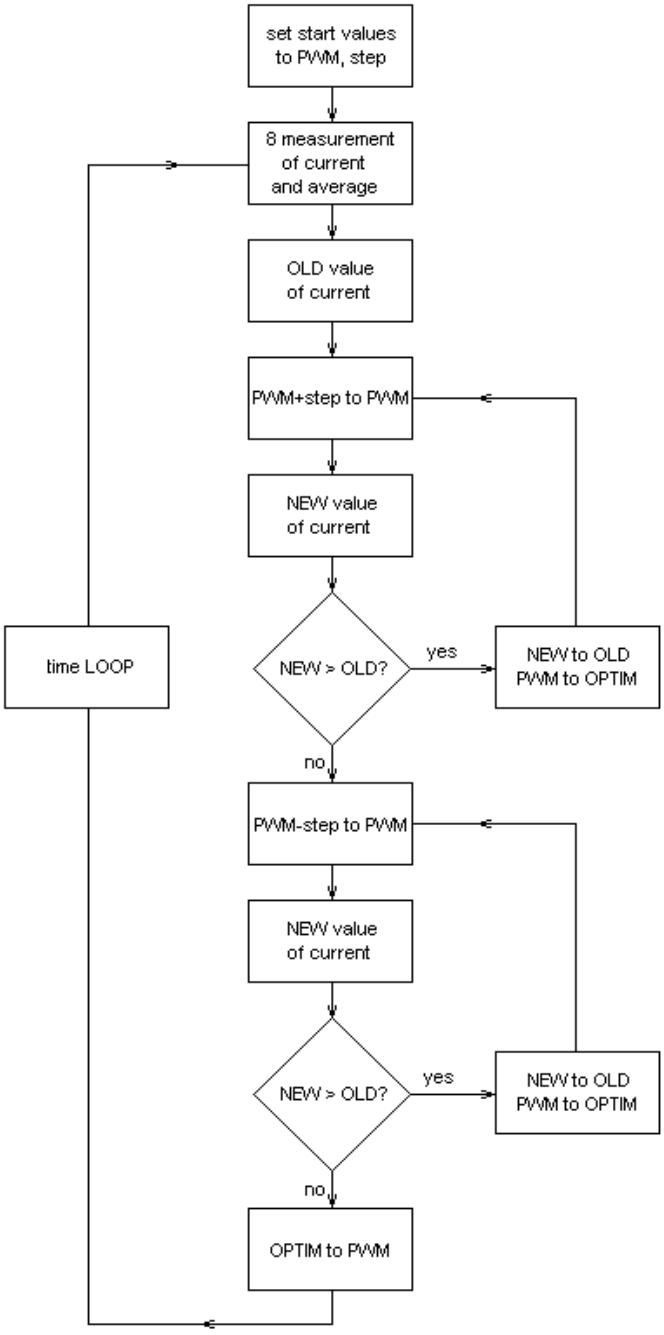
K zajištění optimálního využití fotovoltaického generátoru je nutné udržovat svorkové napětí generátoru po celou dobu provozu na hodnotě, která odpovídá maximu výkonové charakteristiky při daných okamžitých provozních podmínkách. Naproti tomu, je-li provozní napětí fotovoltaického generátoru determinováno např. jmenovitým napětím napájené soustavy nebo stupněm nabití akumulátorové baterie, dochází po většinu jeho provozní doby k nevyužívání dosažitelného výkonu, zejména při nižších hodnotách intenzity slunečního záření. Pro srovnávání efektu různých nastavení rovinných zrcadel i celkové orientace fotovoltaického generátoru, kdy se krok od kroku mění provozní podmínky fotovoltaického generátoru, je nastavování optimálního zatěžování nezbytné [5].

Řešením je oddělení fotovoltaického generátoru od libovolné zátěže, v našem případě akumulátorové baterie prostřednictvím DC-DC měniče, který umožňuje udržovat optimální hodnotu svorkového napětí fotovoltaického generátoru nezávisle na napětí spotřebiče. Zohlednění

všech provozních vlivů včetně stupně povrchového znečištění fotovoltaického generátoru zajišťuje jednoznačně optimalizace jeho zatížení regulátorem udržujícím maximální hodnotu proudu dodávaného do zátěže, tj. na výstupu DC-DC měniče [5].

Podstata řešení spočívá jednoznačně ve výkonové elektronické regulaci zatížení fotovoltaického generátoru vzhledem k jeho okamžitým provozním podmínkám, kterými jsou především intenzita osvětlení, provozní teplota a stupeň znečištění [5].

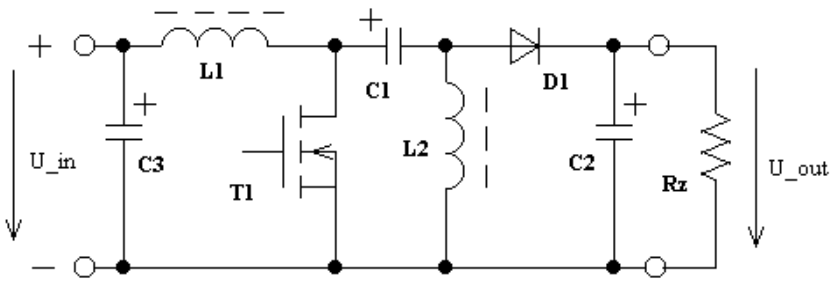
Optimalizace zatížení experimentálního zařízení, tedy fotovoltaického generátoru, je řešena prostřednictvím řízeného spínání DC-DC měniče mikrokontrolérem řady PIC 16F877 a je naznačena algoritmem (viz. „obr. 4-8“ [5]).



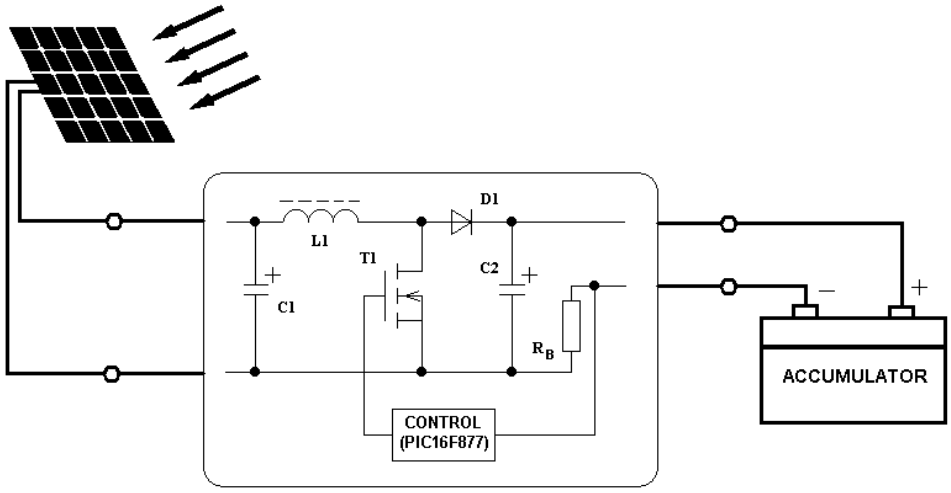
Obr. 4-8 Algoritmus pro řešení optimalizace zatížení [5]

Jeho princip spočívá ve vyhledávání optimálního stupně pulzní šířkové modulace (PWM), které odpovídá maximální hodnota proudu dodávaného do akumulačního prvku, v časové smyčce řádu 10 vteřin. Dojde-li po čekací době ke změně provozních podmínek, vyhledá se nová optimální hodnota PWM pro další časovou smyčku.

DC-DC měnič může být řešen buď jako zvyšující a snižující („obr. 4-9“ [5]) nebo jen jako zvyšující („obr. 4-10“ [5]), který je jednodušší, dosahuje vyšší účinnosti a umožňuje provoz různých typů fotovoltaických generátorů do společného akumulačního prvku s vyšším jmenovitým napětím [5].



Obr. 4-9 Náhradní schéma zvyšujícího a snižujícího DC-DC měniče [5]



Obr. 4-10 Náhradní schéma zvyšujícího DC-DC měniče [5]

V praktické části této diplomové práce je využito pouze zvyšující varianty zapojení DC-DC měniče, který je účelně spínán pomocí mikrokontroléru PIC 16F877. K jeho připojení dochází při každé fázi každého pohybového cyklu (viz. **kapitola 4-2**).

4.4 Popis konstrukce fotovoltaického generátoru

Fotovoltaický generátor je upevněn mezi dva otočné válcové čepy o průměru *d = 20 mm* a k němu jsou připevněna rovinná zrcadla jako koncentrátory slunečního záření. Rozměry jsou uvedeny v „tab. 4-2“ a vyobrazení celého experimentálního zařízení potom na „obr. 4-14“. Orientace fotovoltaického generátoru a rovinných zrcadel je zajištěna trojicí krokových motorů. Právě uchycení fotovoltaického generátoru do čepů umožňuje jeho orientaci v rozmezí úhlů 0°- 180°.

Experimentální zařízení je zasazeno do nosné konstrukce sestrojené z železných úhelníků a plechů viz. „obr. 4-14“. Vyložení experimentálního zařízení z nosné konstrukce umožňuje uskutečnění všech fází pohybového cyklu během denního měření. Orientační rozměry konstrukce jsou uvedeny v „tab. 4-2“. Manuální nastavení celého experimentálního zařízení ve směru J – S umožňuje dvojice umělohmotných kloubů upevňující nosnou konstrukci na zábradlí terasy solární laboratoře ÚEEN. Přičemž úhel sklonu ve směru J – S závisí na aktuálním ročním období.

Aktivní plocha fotovoltaického generátoru MSQ36-10 se skládá z 36 fotovoltaických článků, které jsou *50 mm* dlouhé a *50 mm* široké. Tyto články jsou navzájem propojeny sériově za účelem zvýšení provozního napětí na dostatečnou hodnotu, obvykle *12* nebo *24 V*, protože provozní napětí jednotlivého provozního elementu je méně než *0,5 V*.

Tab. 4-2 Rozměry experimentálního zařízení

Rozměry:	***Šířka [mm]***	***Délka [mm]***	***Výška [mm]***
nosné konstrukce	735	424	800
fotovoltaického generátoru	242	527	33
koncentrátoru (zrcadla)	234	538	3

Orientace samotného fotovoltaického generátoru je realizována krokovým motorem Superior Electric (SLO-SYN), jehož základní údaje jsou uvedeny v „tab. 4-3“, a který je znázorněn na „obr. 4-11“. Tento krokový motor musí mít dostatečný kroutící moment k orientaci fotovoltaického generátoru i s plně otevřenými zrcadly. Požadovaného točivého momentu nutného k orientaci je dosaženo správným převodem, který je patrný na „obr. 4-11“.

Tab. 4-3 Parametry krokového motoru Superior Electric (SLO-SYN)

Název:	Superior Electric (SLO-SYN)
Typ:	M061-FD-349B
Druh:	Krokový motor
Otáčky:	200 kroků / otáčka
Provozní napětí:	12 V DC
Odebíraný proud:	320 mA DC

Obr. 4-11 Detail krokového motoru Superior Electric (SLO-SYN)

Koncentrátory slunečního záření jsou orientovány pomocí dvou krokových motorů menších výkonů. Přičemž levý krokový motor typu Sankyo (viz. „obr. 4-12“) natáčí zrcadlo po levé straně fotovoltaického generátoru a pravý krokový motor stejného typu potom pravé zrcadlo. Parametry těchto motorů jsou uvedeny v „tab. 4-4“.

Tab. 4-4 Parametry krokových motorů Sankyo

Název:	Sankyo
Typ:	MSAF 200A91
Druh:	Krokový motor
Provozní napětí:	12 V DC

Orientace fotovoltaického generátoru a jeho zrcadel je řízena jako samostatná úloha, která probíhá automaticky pomocí řídícího systému, do kterého jsou přivedeny řídící kabely všech krokových motorů napájených odpovídajícím napájecím napětím.

U experimentálního zařízení jsou použity koncové spínače (viz. „obr. 4-12“), které definují počáteční podmínky pro polohu fotovoltaického generátoru a obou rovinných zrcadel v odpovídajících směrových osách. V případě obnovení přerušené dodávky elektrické energie krokovým motorům s následným ukončením orientace experimentálního zařízení dokáže řídící systém ve spolupráci s koncovými spínači nastavit polohu fotovoltaického generátoru i rovinných zrcadel dle aktuálního času.

Obr. 4-12 Detail krokových motorů Sankyo orientujících rovinná zrcadla

Chlazení aktivní plochy fotovoltaického generátoru obstarávají dva ventilátory typu SUNON (viz. „obr. 4-13“ [6]), které jsou umístěny na spodní straně fotovoltaického generátoru. Jejich parametry jsou shrnuty v „tab. 4-5“ [6].

Obr. 4-13 Ventilátor SUNON typu KD 1206 PTS1.GN [6]

Ventilátory mohou pracovat ve 3 provozních režimech. Poloviční chladící výkon zajišťuje paralelní zapojení ventilátorů. V sériovém zapojení pracují ventilátory s nominálním chladícím

výkonem. Posledním provozním režimem je mezipoloha, ve které jsou ventilátory nefunkční. Nastavení ventilátorů do příslušného provozního režimu se provádí manuálně.

Tab. 4-5 Parametry ventilátorů SUNON [6]

Název:	Sunon
Typ:	KD 1206 PTS1.GN
Rozměry (d x š x v):	60 x 60 x 25
Provozní napětí:	12 V DC
Odebíraný proud:	151 mA DC
Otáčky:	4500 otáček / min.

Pro možnost porovnání efektivnosti chlazení fotovoltaického generátoru jsou na specifických místech experimentálního zařízení rozmístěna teplotní čidla měřící aktuální teplotu. Přenos elektrické energie v obou směrech obstarávají silové kabely.

Realizace experimentálního zařízení je dokumentována na následujících snímcích, přičemž pro větší názornost jsou odstraněny krycí plechy krokových motorů provádějících orientaci fotovoltaického generátoru a rovinných zrcadel.

Obr. 4-14 Experimentální zařízení simulující provoz orientovaného fotovoltaického generátoru bez koncentrátorů slunečního záření

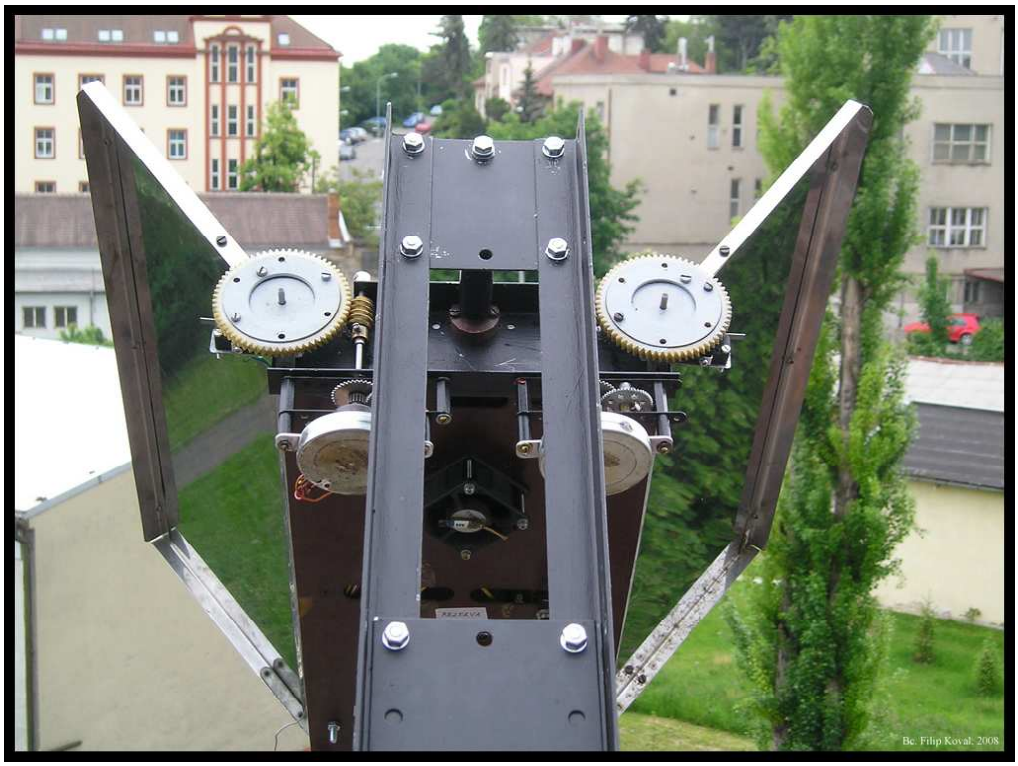
Experimentální zařízení představující orientovaný fotovoltaický generátor bez koncentrátorů slunečního záření definující 1. fázi pohybového cyklu je vyobrazeno na „obr. 4-14“. Zrcadla jsou takto nastavena do roviny fotovoltaického generátoru po celý pohybový cyklus, což je hlavní příčinou nápadného konstrukčního vyložení.

„Obr. 4-15“ znázorňuje víceúčelový fotovoltaický generátor ve 2. fázi pohybového cyklu, která se vyznačuje provozem průběžně orientovaného fotovoltaického generátoru s napevno fixovanými dvěma rovinnými zrcadly, a to pod úhlem 60° od roviny fotovoltaického generátoru.

Další fázi pohybového cyklu můžeme v reálu pozorovat na „obr. 4-16“, kde víceúčelový fotovoltaický generátor simuluje provoz trvale orientovaného fotovoltaického generátoru na jih s pevně fixovanými koncentrátory pod úhlem 60° od jeho roviny. Na tomto obrázku jsou také patrné krokové motory orientující přes převody obě rovinná zrcadla sloužící jako koncentrátory slunečního záření. Dále je vidět horní válcový čep přidržující víceúčelový fotovoltaický generátor.

Na snímku („obr. 4-17“) je možné spatřit experimentální zařízení simulující 4. fázi pohybového cyklu, tedy fázi ve které je fotovoltaický generátor trvale orientován směrem na jih a koncentrátory kopírují pohyb Slunce po obloze. Patrné je zde i vyvedení silových a datových kabelů víceúčelového fotovoltaického generátoru.

Obr. 4-15 Experimentální zařízení simulující provoz průběžně orientovaného fotovoltaického generátoru s napevno fixovanými zrcadlovými koncentrátory



Obr. 4-16 Experimentální zařízení simulující provoz trvale orientovaného fotovoltaického generátoru na jih s pevně fixovanými koncentrátory pod úhlem 60°

Obr. 4-17 Experimentální zařízení simulující fotovoltaický generátor s aktivní plochou trvale orientovanou na jih opatřený pohyblivými zrcadly

4.5 Měřící místa experimentální úlohy

Pro získání správných údajů musíme definovat měřící místa experimentálního zařízení. Ta jsou přehledně shrnuta v následující tab. „4-6“.

Tab. 4-6 Přehled měřících míst

Veličina	***Fyzikální jednotka***	***Typ snímače***	***Rozmezí výstupního napětí***	***Poznámka***
T_V	°C*	KTY81/210	1,0 – 3,0 V	Venkovní teplota (meteorologická budka)
T_{1in}	°C*	KTY81/210	1,0 – 3,0 V	Teplota na vstupu ventilátoru číslo 1
T_{1out}	°C*	KTY81/210	1,0 – 3,0 V	Teplota na výstupu ventilátoru číslo 1
T_{2in}	°C*	KTY81/210	1,0 – 3,0 V	Teplota na vstupu ventilátoru číslo 2
T_{2out}	°C*	KTY81/210	1,0 – 3,0 V	Teplota na výstupu ventilátoru číslo 2
T_{ph}	°C*	KTY81/210	1,0 – 3,0 V	Teplota aktivní (horní) plochy fotovoltaického generátoru
T_{pd}	°C*	KTY81/210	1,0 – 3,0 V	Teplota spodní strany fotovoltaického generátoru
U_p	V	Dělič	0 – 20 V	Napětí fotovoltaického generátoru
I_p	A	Bočník	0 – 10 mV	Proud fotovoltaického generátoru
U_V	V	Dělič	0 – 12 V	Napětí na ventilátorech
I_V	A	Bočník	0 – 0,5 V	Proud ventilátorů
U_{py}	W/m^2**	Pyranometr	0 – 10 V	Intenzita slunečního záření dopadající na fotovoltaický generátor
U_{aku}	V	Akumulátor	9 – 15 V	Napětí akumulátorové baterie
I_{aku}	A	Bočník	0 – 10 mV	Proud akumulátorové baterie

Pozn.:

* Odporový snímač měří hodnotu napětí *U* ve *V*, tato hodnota je potom převáděna na základě cejchovní křivky na teplotu θ udávanou ve *°C*,

** Pyranometr měří hodnotu napětí *U* ve *V*, tato hodnota je potom převáděna na základě cejchovní křivky na intenzitu slunečního záření *G* ve W / m^2.

Měření teploty na daných místech obstarává 7 teplotních čidel typu KTY81/210, která jsou rozmístěna na experimentálním zařízení dle „tab. 4-6“. Výstupním signálem je napětí v jednotkách mV, které je možno převést na fyzikální jednotku, tedy °C, a to prostřednictvím rovnic získaných individuálním cejchováním pro jednotlivé teplotní čidla. Cejchovní rovnice (viz. „tab. 4-7“) charakterizují pouze použitá teplotní čidla v této diplomové práci v konkrétním měřícím obvodu a tudíž se nedají použít obecně.

Tab. 4-7 Cejchovní rovnice teplotních čidel KTY81/210

Lokace teplotního čidla	***Cejchovní rovnice***	***Přesnost***
Teplota aktivní (horní) plochy fotovoltaického generátoru	$y = -5{,}6368 \cdot x^2 + 133{,}19 \cdot x - 205{,}23$	0,9985
Teplota spodní strany fotovoltaického generátoru	$y = -23{,}588 \cdot x^2 + 199{,}73 \cdot x - 266{,}39$	0,9978
Venkovní teplota (meteorologická budka)	$y = 6{,}6397 \cdot x^2 + 81{,}776 \cdot x - 152{,}7$	1,0000
Teplota na vstupu ventilátoru číslo 1	$y = -13{,}585 \cdot x^2 + 160{,}79 \cdot x - 228{,}83$	0,9986
Teplota na výstupu ventilátoru číslo 1	$y = -19{,}993 \cdot x^2 + 186{,}1 \cdot x - 252{,}47$	0,9967
Teplota na vstupu ventilátoru číslo 2	$y = -22{,}335 \cdot x^2 + 196{,}92 \cdot x - 265{,}79$	0,9978
Teplota na výstupu ventilátoru číslo 2	$y = 6{,}04525 \cdot x^2 + 82{,}603 \cdot x - 153{,}5$	1,0000

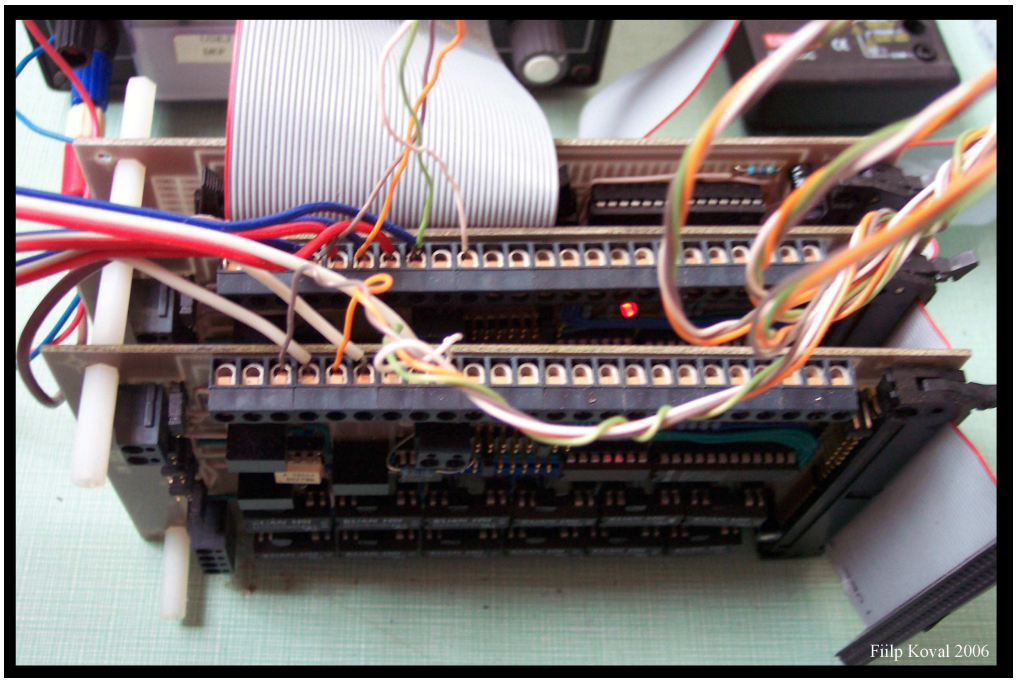
Zmíněný výčet měřících míst použitých pro kompletní sledování experimentálního zařízení se jeví jako zcela postačující. Samotné naměřené hodnoty budou vyhodnoceny a následně zpracovány v grafické podobě.

4.6 Popis měřícího systému

Naměřená data (viz. „tab. 4-6“) započnou svou cestu na zadní straně fotovoltaického generátoru, kde jsou umístněny všechny konektory, následně jsou přenášena datovými vodiči do multiplexerů, které předávají naměřené hodnoty měřící kartě NI 6025, která je umístěna v laboratorním PC. Vše je součástí standardního vybavení solární laboratoře ÚEEN FEKT VUT.

Každý multiplexer má na měřící kartě NI 6025 svůj vlastní komunikační kanál. MUX 0 zprostředkovává měření hodnot napětí a proudu na fotovoltaickém generátoru, akumulátorové baterii a ventilátorech, včetně měření hodnot napětí pyranometru. MUX 1 zprostředkovává měření hodnot napětí teplotních čidel. Oba multiplexery (viz. „obr. 4-18“), tedy MUX 0 a MUX 1, jsou navzájem propojeny. Každý multiplexer má několik datových kanálů.

Z předchozího vyplývá, že se jedná o digitalizovaný systém sběru dat prostřednictvím PC. Naměřená data zpracovává a následně ukládá měřící program Windaq 4.0 [9], bez něhož by bylo časově velmi náročné měření téměř nereálné.



Obr. 4-18 Zapojení multiplexerů (uprostřed MUX 0, blíže MUX 1)

4.6.1 Organizace vlastního měření

Komplexnost měřícího programu Windaq 4.0 spočívá kromě zpracování a následného uložení naměřených dat, také ve schopnosti řídit celý měřící proces. Použitím časovače automaticky ovládá každodenní start měřícího programu v 6:00, a s udržováním 5 minutového intervalu nutného pro ustálení provozních podmínek víceúčelového fotovoltaického generátoru v každé fázi pohybového cyklu provede zmíněné dvojí měření (bez optimalizačního obvodu, s optimalizačním obvodem). Každé měřící místo (viz. „tab. 4-6“) měří Windaq 4.0 celkem 8x a výsledný průměr z těchto hodnot ukládá.

V 18:00 ukončí povel vyslaný programem Windaq 4.0 měřící proces a následně vyšle pokyn orientačnímu systému pro nastavení fotovoltaického generátoru do výchozí polohy, jako přípravu pro další denní měření. Bezprostředně po ukončení měřícího cyklu také proběhne automatická archivace naměřených dat, a to na laboratorní server. Tyto data je potom možno libovolně zpracovávat, protože výsledný archivovaný soubor je textového formátu (rrrrmmddhhmmss.txt). Tímto je umožněno následné relativně jednoduché zpracování v programu Excel, nebo jiném tabulkovém editoru.

Výhodnost měřícího programu Windaq 4.0 spočívá hlavně v kontinuálnosti a bezobslužnosti měření. To má za následek eliminaci často nepříjemných manuálních činností, jako je například neustálé odečítání hodnot z připojených multimetrů nebo kontinuální zapisování naměřených dat na papír.

5 NAMĚŘENÉ HODNOTY

Vzhledem k tomu, že ke dni odevzdání elektronické verze této diplomové práce se pro neočekávaně velký rozsah realizačních prací nepodařilo oživit měřicí systém v plném rozsahu, nebylo možno splnit 4. bod zadání. Vzhledem ke stávajícímu stupni rozpracovanosti lze předpokládat, že do termínu obhajoby této diplomové práce budou příslušná data k dispozici včetně požadovaného rozsahu vyhodnocení.

6 ZÁVĚR

Dle teoretických předpokladů lze očekávat při porovnání s pevným fotovoltaickým generátorem bez koncentrátorů slunečního záření jako standardem největší energetický zisk u varianty experimentálního zařízení, kterou představuje orientovaný fotovoltaický generátor s pevně fixovanými rovinnými zrcadly, a to pod úhlem 60°. Značnou nevýhodou této varianty je požadavek robustnosti příslušného orientačního zařízení. Specifické natáčení systému včetně zrcadel klade zvýšený odpor při větru, což vyžaduje dostatečný kroutící moment pohonu orientujícího fotovoltaický generátor.

Další varianty provedení, reprezentující jednotlivé fáze každého pohybového cyklu, nedosahují takových energetických zisků jako dříve jmenovaná.

Jako přijatelný kompromis velikosti energetického zisku a technické náročnosti se jeví varianta představovaná 4. fází pohybového cyklu, tedy trvale orientovaným fotovoltaickým generátorem směrem na jih a s orientovanými koncentrátory slunečního záření podle pohybu Slunce po obloze. Výhoda této varianty spočívá v orientaci pouze dvou lehkých rovinných zrcadel oproti orientaci celé mohutné konstrukce zařízení.

Příslušné experimentální zařízení bylo navrženo, sestrojeno a uvedeno do provozu, ale vzhledem k tomu, že ke dni odevzdání elektronické verze této diplomové práce se pro neočekávaně velký rozsah realizačních prací nepodařilo oživit měřicí systém v plném rozsahu, nebylo možno splnit 4. bod zadání. Vzhledem ke stávajícímu stupni rozpracovanosti lze předpokládat, že do termínu obhajoby této diplomové práce budou příslušná data k dispozici včetně požadovaného rozsahu vyhodnocení.

Průkazná věrohodnost naměřených dat a jejich vyhodnocení však spočívá až v kontinuálním měření o délce trvání půl až jednoho roku kdy se v konečném efektu projeví dlouhodobé působení proměnlivosti provozních podmínek.

Tato diplomová práce představuje dílčí část řešení výzkumného záměru MŠMT č. MSM0021630516 - „Zdroje, akumulace a optimalizace využití energie v podmínkách trvale udržitelného rozvoje“.

POUŽITÁ LITERATURA

[1] DOC. RNDR. JOSIP KLECZEK, DRSC.. *Sluneční energie – úvod do helioenergetiky*. Polytechnická knižnice, 117. svazek, 1. řady, Technický výběr, Praha 1981, 189 stran.

[2] BC. FILIP KOVAL, bakalářská práce: *Efektivnost intenzifikace využití fotovoltaických měničů pomocí koncentrátorů slunečního záření*, Brno 2006, 52 stran.

[3] ANDREAS HENZE, WERNER HILLEBRAND. *Elektrický proud ze Slunce.* Nakladatelství HEL, 1. české vydání, Ostrava 2000, 128 stran, ISBN 80-86167-12-7.

[4] MURTINGER, BERANOVSKÝ, TOMEŠ, *Fotovoltaika – elektřina ze Slunce.* Nakladatelství Era, 1. české vydání, 92 stran, ISBN 978-80-7366-100-7.

[5] ING. JAN GREGOR, CSC., výtah z díla: *Vliv provozních podmínek na efektivnost fotovoltaické konverze, optimalizace zatížení*, 2006, 4 strany.

[6] IT-HELP.CZ, poslední změna 2007 [cit. 2008-22-5]. http://shop.it-help.cz/?c=popis-produktu&idItem=20701464.

[7] STANĚK, K. *Fotovoltaika*. 2005. http://fotovoltaika.fsv.cvut.cz/main.php?modul=uvod.

[8] ENERG, spol. s r. o., 2001 - 2007. http://www.energ.cz/index.phtml?page=/uspory/solar.html&polozka=0.

[9] ING. KOUKAL. WINDAQ [počítačový program]. Ver. 4.0. Brno 2008.

Příloha A

Tab. 4-1 Vypočtené úhly pro jednotlivé krokové motory v závislosti na čase

Čas	**Úhly natočení**			**Pořadí fáze v jednom cyklu**	**t_P**	**Motor v pohybu**
[hh:mm]	*α [°]*	*β [°]*	*γ [°]*	*[-]*	*[min]*	*[-]*
6:00	0	0	180	1.	0	-
6:05	1,25	60	120	2.	5	*A, B, C*
6:10	90	60	120	3.	10	*A*
6:15	90	2,50	62,50	4.	15	*B, C*
6:20	90	0	120	5.	20	*B, C*
6:25	6,25	0	180	1.	25	*A, C*
6:30	7,5	60	120	2.	30	*A, B, C*
6:35	90	60	120	3.	35	*A*
6:40	90	6,67	66,67	4.	40	*B, C*
6:45	90	0	120	5.	45	*B, C*
6:50	12,5	0	180	1.	50	*A, C*
6:55	13,75	60	120	2.	55	*A, B, C*
7:00	90	60	120	3.	60	*A*
7:05	90	10,83	70,83	4.	65	*B, C*
7:10	90	0	120	5.	70	*B, C*
7:15	18,75	0	180	1.	75	*A, C*
7:20	20	60	120	2.	80	*A, B, C*
7:25	90	60	120	3.	85	*A*
7:30	90	15,00	75,00	4.	90	*B, C*
7:35	90	0	120	5.	95	*B, C*
7:40	25	0	180	1.	100	*A, C*
7:45	26,25	60	120	2.	105	*A, B, C*
7:50	90	60	120	3.	110	*A*
7:55	90	19,17	79,17	4.	115	*B, C*
8:00	90	0	120	5.	120	*B, C*
8:05	31,25	0	180	1.	125	*A, C*
8:10	32,5	60	120	2.	130	*A, B, C*

8:15	90	60	120	3.	135	*A*
8:20	90	23,33	83,33	4.	140	*B, C*
8:25	90	0	120	5.	145	*B, C*
8:30	37,5	0	180	1.	150	*A, C*
8:35	38,75	60	120	2.	155	*A, B, C*
8:40	90	60	120	3.	160	*A*
8:45	90	27,50	87,50	4.	165	*B, C*
8:50	90	0	120	5.	170	*B, C*
8:55	43,75	0	180	1.	175	*A, C*
9:00	45	60	120	2.	180	*A, B, C*
9:05	90	60	120	3.	185	*A*
9:10	90	31,67	91,67	4.	190	*B, C*
9:15	90	0	120	5.	195	*B, C*
9:20	50	0	180	1.	200	*A, C*
9:25	51,25	60	120	2.	205	*A, B, C*
9:30	90	60	120	3.	210	*A*
9:35	90	35,83	95,83	4.	215	*B, C*
9:40	90	0	120	5.	220	*B, C*
9:45	56,25	0	180	1.	225	*A, C*
9:50	57,5	60	120	2.	230	*A, B, C*
9:55	90	60	120	3.	235	*A*
10:00	90	40,00	100,00	4.	240	*B, C*
10:05	90	0	120	5.	245	*B, C*
10:10	62,5	0	180	1.	250	*A, C*
10:15	63,75	60	120	2.	255	*A, B, C*
10:20	90	60	120	3.	260	*A*
10:25	90	44,17	104,17	4.	265	*B, C*
10:30	90	0	120	5.	270	*B, C*
10:35	68,75	0	180	1.	275	*A, C*
10:40	70	60	120	2.	280	*A, B, C*
10:45	90	60	120	3.	285	*A*
10:50	90	48,33	108,33	4.	290	*B, C*

10:55	90	0	120	5.	295	*B, C*
11:00	75	0	180	1.	300	*A, C*
11:05	76,25	60	120	2.	305	*A, B, C*
11:10	90	60	120	3.	310	*A*
11:15	90	52,50	112,50	4.	315	*B, C*
11:20	90	0	120	5.	320	*B, C*
11:25	81,25	0	180	1.	325	*A, C*
11:30	82,5	60	120	2.	330	*A, B, C*
11:35	90	60	120	3.	335	*A*
11:40	90	56,67	116,67	4.	340	*B, C*
11:45	90	0	120	5.	345	*B, C*
11:50	87,5	0	180	1.	350	*A, C*
11:55	88,75	60	120	2.	355	*A, B, C*
12:00	90	60	120	3.	360	*A*
12:05	90	60,83	120,83	4.	365	*B, C*
12:10	90	0	120	5.	370	*B, C*
12:15	93,75	0	180	1.	375	*A, C*
12:20	95	60	120	2.	380	*A, B, C*
12:25	90	60	120	3.	385	*A*
12:30	90	65,00	125,00	4.	390	*B, C*
12:35	90	0	120	5.	395	*B, C*
12:40	100	0	180	1.	400	*A, C*
12:45	101,25	60	120	2.	405	*A, B, C*
12:50	90	60	120	3.	410	*A*
12:55	90	69,17	129,17	4.	415	*B, C*
13:00	90	0	120	5.	420	*B, C*
13:05	106,25	0	180	1.	425	*A, C*
13:10	107,5	60	120	2.	430	*A, B, C*
13:15	90	60	120	3.	435	*A*
13:20	90	73,33	133,33	4.	440	*B, C*
13:25	90	0	120	5.	445	*B, C*
13:30	112,5	0	180	1.	450	*A, C*

13:35	113,75	60	120	2.	455	*A, B, C*
13:40	90	60	120	3.	460	*A*
13:45	90	77,50	137,50	4.	465	*B, C*
13:50	90	0	120	5.	470	*B, C*
13:55	118,75	0	180	1.	475	*A, C*
14:00	120	60	120	2.	480	*A, B, C*
14:05	90	60	120	3.	485	*A*
14:10	90	81,67	141,67	4.	490	*B, C*
14:15	90	0	120	5.	495	*B, C*
14:20	125	0	180	1.	500	*A, C*
14:25	126,25	60	120	2.	505	*A, B, C*
14:30	90	60	120	3.	510	*A*
14:35	90	85,83	145,83	4.	515	*B, C*
14:40	90	0	120	5.	520	*B, C*
14:45	131,25	0	180	1.	525	*A, C*
14:50	132,5	60	120	2.	530	*A, B, C*
14:55	90	60	120	3.	535	*A*
15:00	90	90,00	150,00	4.	540	*B, C*
15:05	90	0	120	5.	545	*B, C*
15:10	137,5	0	180	1.	550	*A, C*
15:15	138,75	60	120	2.	555	*A, B, C*
15:20	90	60	120	3.	560	*A*
15:25	90	94,17	154,17	4.	565	*B, C*
15:30	90	0	120	5.	570	*B, C*
15:35	143,75	0	180	1.	575	*A, C*
15:40	145	60	120	2.	580	*A, B, C*
15:45	90	60	120	3.	585	*A*
15:50	90	98,33	158,33	4.	590	*B, C*
15:55	90	0	120	5.	595	*B, C*
16:00	150	0	180	1.	600	*A, C*
16:05	151,25	60	120	2.	605	*A, B, C*
16:10	90	60	120	3.	610	*A*

16:15	90	102,50	162,50	4.	615	*B, C*
16:20	90	0	120	5.	620	*B, C*
16:25	156,25	0	180	1.	625	*A, C*
16:30	157,5	60	120	2.	630	*A, B, C*
16:35	90	60	120	3.	635	*A*
16:40	90	106,67	166,67	4.	640	*B, C*
16:45	90	0	120	5.	645	*B, C*
16:50	162,5	0	180	1.	650	*A, C*
16:55	163,75	60	120	2.	655	*A, B, C*
17:00	90	60	120	3.	660	*A*
17:05	90	110,83	170,83	4.	665	*B, C*
17:10	90	0	120	5.	670	*B, C*
17:15	168,75	0	180	1.	675	*A, C*
17:20	170	60	120	2.	680	*A, B, C*
17:25	90	60	120	3.	685	*A*
17:30	90	115,00	175,00	4.	690	*B, C*
17:35	90	0	120	5.	695	*B, C*
17:40	175	0	180	1.	700	*A, C*
17:45	176,25	60	120	2.	705	*A, B, C*
17:50	90	60	120	3.	710	*A*
17:55	90	119,17	179,17	4.	715	*B, C*
18:00	90	0	120	5.	720	*B, C*