

ŠOLSKI CENTER VELENJE
ELEKTRO IN RAČUNALNIŠKA ŠOLA

MLADI RAZISKOVALCI ZA RAZVOJ ŠALEŠKE DOLINE

RAZISKOVALNA NALOGA

VPLIV ODKLONA NA MOČ FOTONAPETOSTNEGA MODULA

Tematsko področje: ELEKTROTEHNIKA, ELEKTRONIKA IN ROBOTIKA

Avtorji:

Peter Rotovnik, 2. letnik PTI

David Šega, 2. letnik PTI

Sergej Zahojnik, 2. letnik PTI

Mentor:

Matjaž Žerak, univ. dipl. inž.

Velenje, 2009

Raziskovalna naloga je bila opravljena na Šolskem centru Velenje - ELEKTRO IN
RAČUNALNIŠKA ŠOLA

Mentor: Matjaž Žerak, univ. dipl. inž.

Datum predavitve: 16. 4. 2009

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

- ŠD Elektro in računalniška šola Velenje/2009
- KG solarna energija/fotovoltaika/sončna elektrarna/UI karakteristika
- AV ROTOVNIK, Peter / ŠEGA, David / ZAHOJNIK, Sergej
- SA ŽERAK, Matjaž ment.
- KZ 3320 Velenje, SLO, Trg mladosti 3
- ZA Šolski center Velenje, Elektro in računalniška šola
- LI 2009
- IN VPLIV ODKLONA NA MOČ FOTONAPETOSTNEGA MODULA.
- TD RAZISKOVALNA NALOGA
- OP VII, 36 s., 4 tab., 10 graf., 12 skic, 6 ref.
- IJ SL
- JI sl/en
- AI Izkoristek pretvorbe sončnega sevanja v električno energijo je večji v primeru spreminjanja smeri modula tako, da je vpad sončnega sevanja pravokoten na površino FN modula. Z raziskavo so poskušali ugotoviti optimalen časovni interval korekcije smeri FN modula. Merili so maksimalno električno moč FN modula pri različnih kotih odklona. Najboljši izkoristek imajo FN moduli pri pravokotnem vpadu sončnega sevanja. Z večanjem vpadnega kota se izkoristek FN modula slabša. Raziskava je razkrila odvisnost moči FN modula od vpadnega kota. Ugotovili so, da je električna moč FN modula sorazmerna s pravokotno komponento gostote sončnega sevanja samo v primeru čistega direktnega sevanja. Pri realnih pogojih pa je vedno prisotno razpršeno sevanje, ki generira od smeri vpada neodvisno komponento električne moči. Difuzno sevanje zmanjša odvisnost moči FN modula od vpadnega kota tako, da pri velikih deležih razpršenega sevanja električna moč ni več odvisna od smeri odklona FN modula. Bistveno je povečanje izkoristka sledilnih FN modulov v sončnih dneh z zelo čisto atmosfero, ko je delež difuznega sevanja majhen. Nasprotno je izboljšanje izkoristka pretvorbe zaradi sledenja zelo majhno v oblačnih ali pol oblačnih dneh, ko je delež difuznega sevanja velik.

KEY WORD DOCUMENTATION

- ND Elektro in računalniška šola Velenje/2009
- CX solar energy/photovoltaics/solar plant/UI characteristics
- AU ROTOVNIK, Peter / ŠEGA, David / ZAHOJNIK, Sergej
- AA ŽERAK, Matjaž ment.
- PP 3320 Velenje, SLO, Trg mladosti 3
- PB Šolski center Velenje, Elektro in računalniška šola
- PY 2009
- TI VPLIV ODKLONA NA MOČ FOTONAPETOSTNEGA MODULA
- DT RESEARCH WORK
- NO VII, 36 p., 4 tab., 10 graf., 12 fig., 6 app.
- LA SL
- AL sl/en
- AB The advantage of transformation of solar radiation energy into electric power is greater when we change the direction of a module in order to cause the incursion of solar radiation rectangular on the surface of a photovoltaic module. Our main goal of this research project was to discover the optimal time interval correction of the photovoltaic module direction. The maximal electric power of photovoltaic module at different corner deviations was measured and the best results were gained at rectangular incursion of solar radiation. By changing the incursion corner the advantage of the photovoltaic module is worsened. The dependence between the direction of the photovoltaic module and the incursion corner was disclosed. The electric power of photovoltaic module is proportional to rectangular component of solar radiation density but only in case of pure direct radiation. But in everyday situation there is dispersed radiation, which generates a component of electric power independent of the incursion direction. Diffuse radiation reduces the dependence of photovoltaic module from the incursion corner. When the proportion of dispersed radiation is bigger the electric power is no longer dependent on the photovoltaic module incursion. Essential is the increase of advantage of photovoltaic modules during sunny days with clear atmosphere when there is smaller proportion of diffuse radiation. On the contrary the advantage of transformation due to the direction of solar radiation during cloudy days is smaller because of greater diffuse radiation.

KAZALO

Ključna dokumentacijska informacija	II
Key word documentation	III
Kazalo	IV
Kazalo preglednic	V
Kazalo slik	V
Kazalo grafov	VI
Kazalo prilog	VI
Seznam okrajšav	VII
1 UVOD	1
2 PREGLED OBJAV	2
2.1 Fotonapetostne celice	2
2.2 Vrste FN celic	3
2.3 Fotonapetostni modul	3
2.3.1 Zgradba	3
2.3.2 Električne lastnosti FN modula	4
2.4 Solarna elektrarna	9
2.4.1 Avtonomno obratovanje	9
2.4.2 Omrežno obratovanje	9
3 MATERIALI IN METODE	10
3.1 Vplivne veličine	10
3.2 Usmerjanje fotonapetostnega modula	11
3.2.1 Merjenje vpadnega kota	11
3.2.2 Merjenje smeri vpada	12
3.3 Merjenje IU karakteristike	13
3.4 Določanje maksimalne moči	14
3.5 Izvajanje meritev	14
3.6 Uporaba DAQ vmesnika	14
3.6.1 Merjenje napetosti	15

3.6.2	Merjenje toka	16
3.7	Potek meritve	16
3.8	Analiza rezultatov	17
4	REZULTATI	18
4.1	Potrjevanje 1. hipoteze	18
4.2	Potrjevanje 2. hipoteze	19
4.3	Potrjevanje 3. hipoteze	22
4.3.1	Vpliv razpršenega sevanja	23
5	RAZPRAVA	27
6	ZAKLJUČEK	29
7	POVZETEK	29
8	ZAHVALA	30
9	PRILOGE	31
10	VIRI IN LITERATURA	36

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Delež razpršenega sevanja	7
Preglednica 2: Odvisnost faktorja zračne mase AM od višine sonca nad obzorjem	8
Preglednica 3: Rezultati meritev odvisnosti električne moči od smeri odklona FN modula	19
Preglednica 4: Izmerjene maksimalne moči FN modula pri različnih vpadnih kotih	21

KAZALO SLIK

Slika 1: Zgradba FN celice	4
Slika 2: Faktor zračne mase AM	7
Slika 3: Vpadni kot	11
Slika 4: Izračun vpadnega kota	11
Slika 5: Merjenje vpadnega kota z normalo in krožnicami	12
Slika 6: Merjenje smeri vpada	13
Slika 7: Napetost prostega teka	13
Slika 8: Meritve pri različnih obremenitvah	13

Slika 9: Kratkostični tok	13
Slika 10: DAQ vmesnik NI 6008	15
Slika 11: Vezni načrt za merjenje UI karakteristike	17
Slika 12: Razdelitev direktnega sevanja na pravokotno in vzporedno komponento	25

KAZALO GRAFOV

Graf 1: IU karakteristika in karakteristika moči fotonapetostnega modula	5
Graf 2: Valovna odvisnost spektralne gostote	6
Graf 3: IU karakteristike FN modula pri smereh vpada med 0° in 90°	18
Graf 4: Karakteristika moči FN modula pri smereh vpada med 0° in 90°	18
Graf 5: IU karakteristike pri različnih vpadnih kotih FN modula	20
Graf 6: Odvisnost moči FN modula od obremenitve pri različnih vpadnih kotih β	21
Graf 7: Odvisnost moči FN modula od obremenitve pri različnih vpadnih kotih β	22
Graf 8: Odvisnost maksimalne moči FN modula od vpadnega kota	23
Graf 9: Odvisnost direktne in razpršene moči FN modula od vpadnega kota	24
Graf 10: Primerjava odvisnosti moči zaradi direktnega sevanja	26

KAZALO PRILOG

Priloga 1	31
Priloga 2	33
Priloga 3	34
Priloga 4	35

SEZNAM OKRAJŠAV

Seznam okrajšav v tekstu

FN	Fotonapetostni (modul)
AM	Faktor zračne mase (air mass)
DAQ	Zajemanje podatkov (data acquisition)
STC	Standardni testni pogoji (standard test conditions)

Seznam simbolov

β	Vpadni kot
φ	Smer vpada
η	Izkoristek FN modula
h	Višina normale
x	Dolžina sence
c	Dolžina poti sončnega sevanja čez atmosfero
α	Višina sonca
P	Električna moč
U	Električna napetost
I	Električni tok
P_{mpp}	Nazivna moč FN modula
I_{mpp}	Nazivni tok FN modula
U_{mpp}	Nazivna napetost FN modula
U_{oc}	Napetost prostega teka FN modula pri STC
I_{sc}	Tok kratkega stika FN modula pri STC
P_m	Maksimalna izmerjena moč za dano usmeritev FN modula
U_0	Napetost prostega teka
I_K	Kratkostični tok
P_D	Električna moč FN modula zaradi direktnega sevanja
P_R	Električna moč FN modula zaradi razpršenega sevanja
P_{mD}	Maksimalna električna moč zaradi direktnega sevanja pri vpadnem kotu β
P_{mR}	Maksimalna električna moč zaradi razpršenega sevanja izmerjena pri vpadnem kotu 90° .
G	Gostota moči sončnega sevanja
G_D	Direktni delež gostote moči sončnega sevanja
G_P	Pravokotna komponenta gostote moči direktnega sončnega sevanja
G_V	Vzporedna komponenta gostote moči direktnega sončnega sevanja
P_{miD}	Izračunana električna moč zaradi direktnega sevanja pri vpadnem kotu β
P_{m0}	Električna moč zaradi direktnega sevanja pri vpadnem kotu 0°

1 UVOD

Energetska kriza narekuje vse večjo potrebo po proizvodnji čiste energije iz obnovljivih energetskih virov.

Sončna energija je trajen vir energije in jo narava tako rekoč izkorišča od samega začetka. Količina sončne energije, ki letno pade na zemljo, presega osemtisočkratnik letne svetovne porabe primarne energije. Do pretvorbe sončne energije v električno pride pri vpadu sončnega sevanja na sprejemnik.

Fotonapetostni (FN) moduli so med novimi oziroma alternativnimi viri tisti, ki veliko obetajo. Opravljajo direktno pretvorbo energije sončnega sevanja v električno energijo. Njihova največja slabost so majhni izkoristki pretvorbe. Večina FN modulov je nameščena fiksno in usmerjena pod optimalnimi koti za lokacijo, kjer so nameščeni. Zaradi fiksne postavitve FN moduli ne delujejo z optimalnim izkoristkom preko celega dneva oziroma celotno koledarsko leto. Sonce se preko dneva navidezno premika od vzhoda proti zahodu in le v kratkem delu celotnega dneva, ko pada sončno sevanje pravokotno na površino FN modula, je delovanje optimalno. Z FN moduli, ki preko dneva sledijo gibanju sonca, lahko dosežemo mnogo večjo proizvodnjo električne energije kot s fiksnimi moduli.

Cilj raziskave je določiti odvisnost moči FN modulov od vpadnega kota, ki nastane zaradi navideznega pomikanja sonca. S poznavanjem odvisnosti lahko določimo velikost vpadnega kota sončnega sevanja, ko je zmanjšanje električne moči FN modula še dopustno. S tem bomo ugotovili, s kolikšno časovno periodo je preko dneva potrebno popravljati usmeritev FN modulov, da je izguba energije zaradi spreminjanja smeri sončnega sevanja čim manjša.

Z raziskavo bomo poskušali tudi ugotoviti, kako vpliva smer odklona na moč FN modula. Med navideznim premikanjem sonca zaradi vrtenja zemlje okoli svoje osi in zaradi letnega kroženja okoli sonca se smer vpada sončnega sevanja spreminja. Vpad lahko ima katerokoli smer med smerjo daljše in smerjo krajše stranice FN modula.

Z namenom, da bi prišli do uporabnih rezultatov raziskave, smo postavili tri hipoteze.

- FN moduli so izotropni. Učinkovitost FN modulov ni odvisna od smeri odklona.
- Kot pod katerim vpada sončno sevanje na površino FN modulov, vpliva na učinkovitost pretvorbe sončnega sevanja.
- Moč FN modula je obratno sorazmerna s kotom odklona. Odvisnost med kotom odklona in vpadnim kotom je linearna.

Zanima nas tudi, kako z enostavno meritvijo določiti trenutno moč sončnega sevanja. Tu se ponujata dve možnosti. Prva je napetost prostega teka, ki jo enostavno izmerimo z voltmetrom v neobremenjenem stanju. Druga možnost je kratkostični tok, ki ga izmerimo z ampermetrom, ko je FN modul v kratkem stiku.

Za potrjevanje hipotez smo izbrali eksperimentalno metodo merjenja obremenilnih karakteristik FN modula.

2 PREGLED OBJAV

Zgodovina fotonapetostnih celic se je začela leta 1839. Pojav, kako svetlobo pretvoriti v električno energijo, je leta 1839 odkril francoski eksperimentalni fizik Alexandre Edmond Becquerel. Slednji je namreč med eksperimentom z dvema elektrodama potopljenima v elektrolit odkril, da prevodnost narašča z osvetljenostjo. Prvi, ki je natančno opisal sončne celice, je bil Charles Fritts leta 1883. Leta 1887 je Heinrichu Hertzu uspelo odkriti, da ultravijolično sevanje spreminja prag napetosti, ki povzroča preskok iskre med dvema kovinskima elektrodama. V letih od 1900 do 1949 je sledila teoretična razlaga fotovoltaičnega pojava in prve silicijeve sončne celice. Vsekakor je najbolj zaslužen za razlago fotonapetostnega pojava Albert Einstein, ki je pojav teoretično opisal leta 1904, za svoje delo pa je leta 1921 dobil Nobelovo nagrado. Einsteinova teoretična predvidevanja je leta 1916 praktično dokazal Robert Milikan. Leta 1918 je poljski znanstvenik Czohralski razvil metodo za pridobivanje monokristalnega silicija. To je omogočilo izdelavo prvih silicijevih monokristalnih sončnih celic. Prva silicijeva sončna celica je bila izdelana leta 1941. V letu 1932 so fotonapetostni pojav opazili tudi v kadmijevem selenidu, ki danes poleg silicija sodi med pomembnejše polprevodniške materiale pri izdelavi sončnih celic. Leta 1951 so izdelali prve germanijeve monokristalne sončne celice. Dr. Dan Trivich, iz univerze "Wayne State University", je leta 1953 izpeljal prve teoretične izračune učinkovitosti posameznih materialov za izdelavo sončnih celic, za valovne dolžine sončnega spektra. V Bellovih laboratorijih pa so objavili rezultate delovanja sončne celice s 4,5 % izkoristkom. Izkoristek so že čez nekaj mesecev povečali na 6 %. Leta 1955 so se začele priprave na oskrbo satelitov z energijo s pomočjo sončnih celic. Leta 1958 je podjetje Hoffman Electronics predstavilo sončno celico z učinkovitostjo 9 %. Istega leta je bila izdelana prva silicijeva sončna celica, za uporabo v vesoljski tehniki, ki je bila bolj odporna na sevanje. Istega leta je bil izstreljen satelit Vanguard I, ki je bil prvi satelit, ki so ga z energijo oskrbovale sončne celice. <http://www.pvresources.com/si/zgodovina.php>

2.1 Fotonapetostne celice

Pri fotovoltaičnem pojavu oziroma fotonapetostni pretvorbi energije pride do neposredne pretvorbe sončne energije v električno. Do pretvorbe sončne energije pride v tako imenovanih sončnih celicah. Sončne celice so v osnovi zgrajene iz polprevodniških diod velikih površin, ki so zgrajene iz dveh različnih tipov polprevodniške plasti. Eno izmed teh dveh plasti imenujemo polprevodnik tipa p, ki mu primanjkuje elektronov in ima presežek vrzeli. Druga plast, ki jo imenujemo plast tipa n, ima presežek elektronov. Ko dva različna tipa polprevodnikov staknemo skupaj, pride do pojava difuzije nabojev preko stične površine. Elektroni v polprevodniku tipa n začnejo prodirati v polprevodnik tipa p, medtem ko vrzeli iz polprevodnika tipa p prodirajo v polprevodnik tipa n. Ob robu spoja tipa n nastane pozitivni prostorski naboj, ob robu spoja tipa p pa negativni prostorski naboj. Pri tem nastali električni naboj povzroči električno polje, ki zavira nadaljnjo difuzijo delcev. Če bi bili nosilci brez naboja, ne bi nastalo električno polje in bi tako delci prodirali tako dolgo, dokler ne bi prišlo do enakomerne porazdelitve po celotnem prostoru polprevodnika. Območje, kjer se poruši električna nevtralnost, imenujemo prehodno (osiromašeno) področje ali področje prostorskega naboja. Če priključimo zunanjo napetost na tako zgrajeno celico, se zaviralno električno polje v prehodnem območju spreminja in skozi diodo lahko teče električni tok v le eni smeri. V osvetljeni sončni celici se tako generirajo pari elektroni – vrzeli. Električno polje nato loči in povleče elektrone iz prehodnega območja v polprevodnik tipa p in vrzeli v polprevodnik tipa

p. Elektroni in vrzeli se nato v nevtralnem delu polprevodnika s pomočjo difuzije premikajo proti kontaktom. Ločitev elektronov in vrzeli povzroči napetostno razliko na kontaktih, ki ob priključitvi porabnika požene električni tok.

http://lpvo.fe.uni-lj.si/El_iz_sonca/el_iz_sonca.htm

2.2 Vrste FN celic

Kristalne sončne celice:

Kristalne silicijeve sončne celice so najpogosteje uporabljane sončne celice v fotonapetostnih sistemih. Učinkovitost sončnih celic je omejena s številnimi dejavniki. Energija fotonov z večanjem valovne dolžine svetlobe pada, največja valovna dolžina, pri kateri imajo fotoni še dovolj veliko energijo za silicij, znaša 1,15 μm . Sevanje z večjo valovno dolžino povzroča le segrevanje sončnih celic. Foton lahko povzroči nastanek le enega para elektro-vrzel, zato se tudi pri manjših valovnih dolžinah od mejne pojavlja višek fotonov, ki prav tako le segrevajo celico. Zgornja meja pretvorbe vpadne svetlobne energije na sončno celico je približno 23 % (velja za silicijeve eksperimentalne sončne celice). Pri uporabi drugih materialov je izkoristek lahko večji (eksperimentalno do 30 %), zaradi širšega spektra svetlobe, katere vpadno sevanje celica še lahko pretvori v elektriko. Lastne izgube sončne celice nastopajo zaradi kontaktne mreže (lastna zastrtost), notranje upornosti celice in zaradi odboja sončnega sevanja na površini celice. Kristalne sončne celice so največkrat v obliki rezin, debeline 0,3 mm, rezanih iz silicijevega ingota premera 10 do 15 cm, in generirajo okrog 35mA toka na cm^2 (skupaj do 2 A/celico) površine pri napetosti približno 550 mV pri polni osvetlitvi. Laboratorijske izvedbe tovrstnih celic imajo učinkovitost do 18 %, klasične do 15 %.
<http://www.pvresources.com/si/tehnologije.php>

Amorfne sončne celice:

Amorfne celice imajo precej slabši izkoristek, ki se giblje med 6 in 8 %. Amorfne celice se tudi hitreje starajo. Gostota toka znaša do 15 mA/cm^2 , napetosti neobremenjenih celic pa so do 0,8 V, kar je več kot pri kristalnih celicah. Spektralna občutljivost pri amorfni celicah je pomaknjena bolj proti modri svetlobi, tako da je idealen izvor svetlobe za amorfne celice fluorescenčna žarnica.

2.3 Fotonapetostni modul

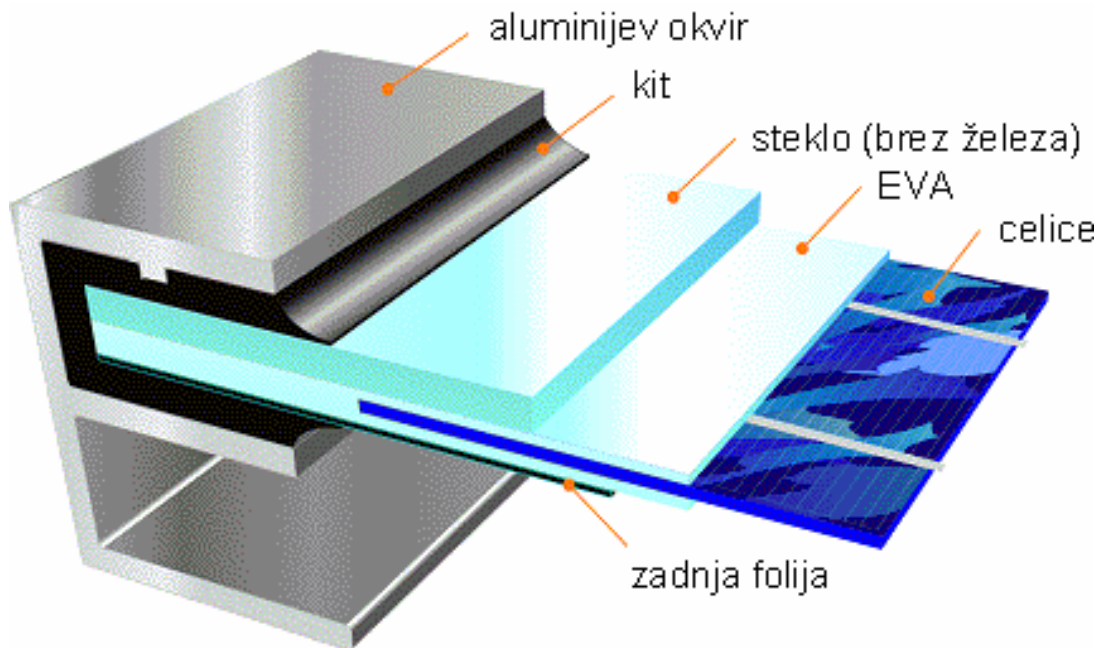
Modul je najmanjši element izdelan za proizvodnjo električne energije, ki je lahko trajno izpostavljen vremenskim pogojem. So tih in neizčrpen vir energije, ki ne onesnažuje okolja ter omogoča uporabo električnih naprav tudi tam, kjer ni električnega omrežja. Za višjo napetost so celice v modulu med seboj povezane v zaporedne nize.

2.3.1 Zgradba

Fotonapetostni modul je osnovni še zamenljiv element fotonapetostnega sistema. Sestavljen je iz večjega števila med seboj povezanih sončnih celic. Glede na tehnologijo sončnih celic ločimo monokristalne, polikristalne in amorfne module. Več sončnih celic medsebojno povežemo in hermetično zapremo v modul. Danes imajo moduli, ki so namenjeni predvsem sončnim elektrarnam, poleg standardnih nazivnih napetosti (12 V, 24 V, 48 V) še različne druge nazivne napetosti. http://lpvo.fe.uni-lj.si/El_iz_sonca/el_iz_sonca.htm

Celice lahko v modul povežemo zaporedno ali vzporedno, s čimer povečujemo napetost

oziroma tok modula. Celice so med seboj vezane tako, da je zgornji kontakt ene celice povezan s spodnjim kontaktom druge celice. Med seboj povezane celice nato laminiramo med vrhnjim steklom in steklom ali plastiko na zadnji strani. Takšen laminat je nato običajno uokvirjen z aluminijem.



Vir: <http://pv.fe.uni-lj.si/Welcome.aspx?action=PV&ID=0>

Slika 1: Zgradba FN celice

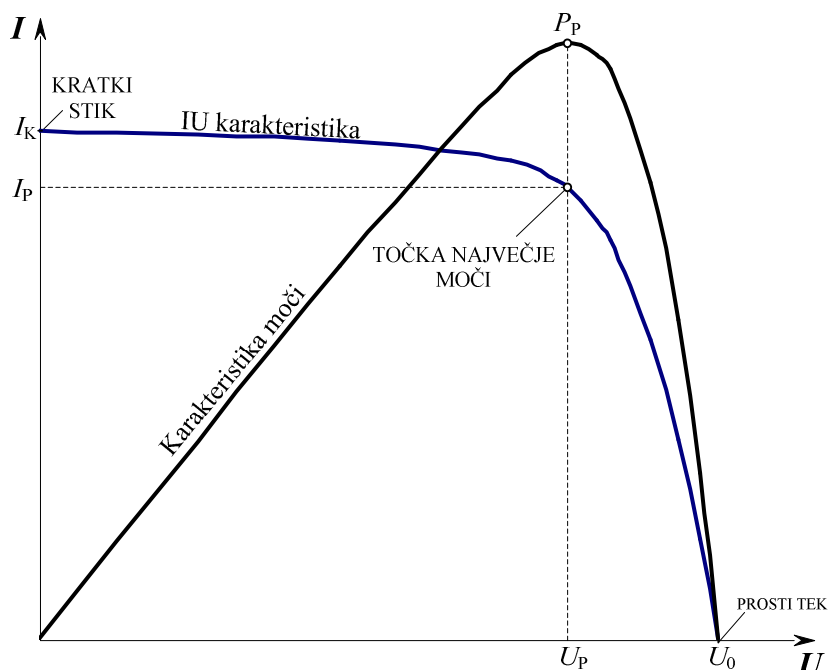
2.3.2 Električne lastnosti FN modula

Obremenilna karakteristika ali IU karakteristika FN modula je odvisna od gostote moči sončnega sevanja, ki vpada na površino modula. Če je gostota moči sončnega sevanja konstantna, lahko opazimo naslednje lastnosti:

V prostem teku, ko na priključne sponke FN modula ni priključenih električnih porabnikov, je električni tok nič. Napetost odprtih sponk U_0 je največja za dano gostoto moči sevanja.

Pri večanju toka obremenitve FN modula, napetost sprva počasi pada. Pri določenem toku začne napetost hitro padati kljub majhnemu povečanju toka. Temu delu karakteristike bomo rekli koleno. Z majhnim povečanjem toka pridemo na karakteristiki v točko kratkega stika, ko je napetost FN modula enaka nič in teče kratkostični tok I_K .

Graf 1: IU karakteristika in karakteristika moči fotonapetostnega modula



Karakteristika moči podaja odvisnost električne moči FN modula od napetosti. V prostem teku je električna moč enaka nič. Z večanjem toka obremenitve električna moč sprva narašča in doseže maksimum pri toku maksimalne moči I_p v kolenu karakteristike moči. FN modul generira maksimalno električno moč pri točno določeni obremenitvi za dano gostoto moči sončnega sevanja. Če je FN modul obremenjen z manjšo ali večjo močjo od maksimalne moči P_p , bo proizvedena električna moč manjša od maksimalne. Pri spreminjajoči se gostoti moči sončnega sevanja se tudi točka maksimalne moči, ki je določena z tokom I_p in napetostjo U_p , spremeni. Za učinkovito delovanje FN modula je pogoj delovanje v točki maksimalne moči. Pri spreminjanju gostote moči sončnega sevanja moramo prilagajati obremenitev FN modula tako, da obratuje z maksimalno močjo P_p . Pri obremenitvi z maksimalno električno močjo deluje FN modul z največjim izkoristkom pri danih pogojih sončnega obsevanja.

Izkoristek FN modula je razmerje med prejeto močjo sončnega sevanja in oddano električno močjo. Izkoristek FN modula merimo pri standardnih testnih pogojih (Standard Test Conditions). Standardne testne pogoje določa:

- gostota sončnega sevanja 1000 W/m^2 ,
- AM1,5 – višina sonca nad obzorjem,
- referenčno sončno sevanje,
- temperatura 25°C ,
- pravokotni vpad sončnega sevanja.

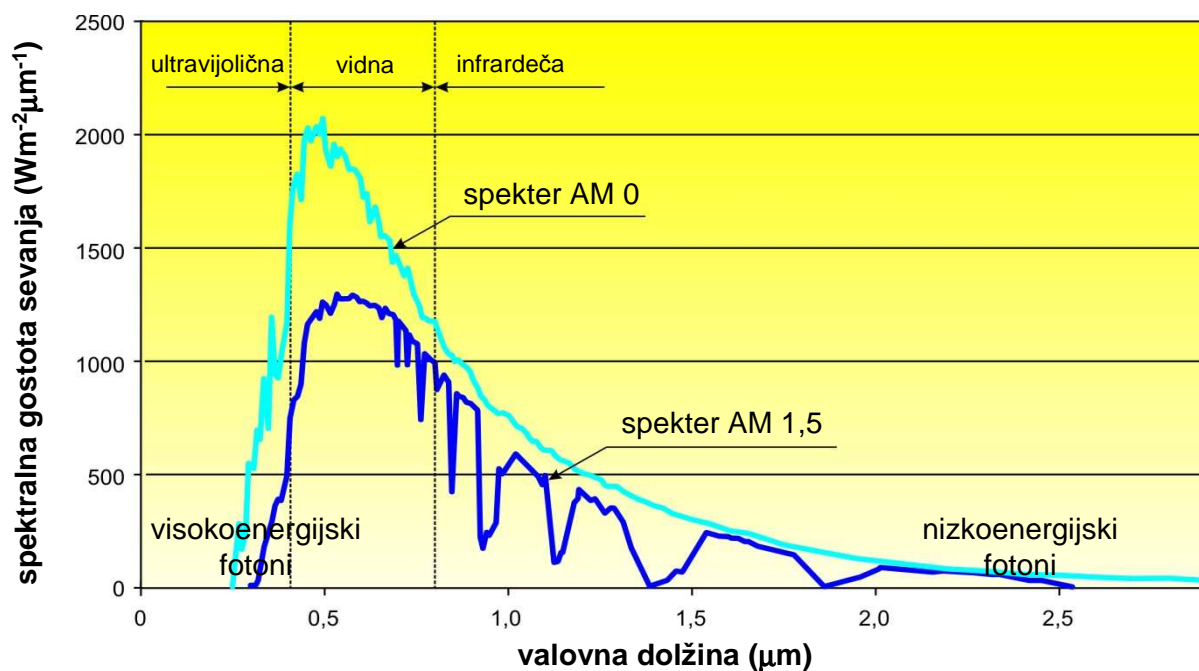
Gostota moči sončnega sevanja

Pri praktični izrabi sončne energije je potrebno poznavanje količine in tipa vpadnega

sončnega sevanja na zemeljsko površino. Gostota moči sevanja se stalno spreminja glede na čas dneva, vremenske razmere in letni čas. Gostoto moči sevanja merimo v vatih na kvadratni meter (Wm^{-2}). Energijo sevanja, to je integrirano moč preko določene časovne periode, imenujemo obsevanje in jo podajamo v vatnih urah na kvadratni meter (Whm^{-2}). Gostota moči sončnega sevanja nad zemeljsko atmosfero je med 1,325 in 1,420 vati na kvadratni meter. Povprečje tega zunaj zemeljskega sevanja je približno 1,367 vati na kvadratni meter. Največja moč sončne celice je označena s W_p (peak Watt), izmerjena pa je pri standardizirani vrednosti sončnega sevanja (1000 W/m^2), temperaturi okolice 25°C in $AM = 1,5$ (air mass). Sončni celica ima v tej obratovalni točki tudi največji izkoristek.

Graf 2: Valovna odvisnost spektralne gostote

Vir: http://lpvo.fe.unilj.si/El_iz_sonca/el_iz_sonca.htm

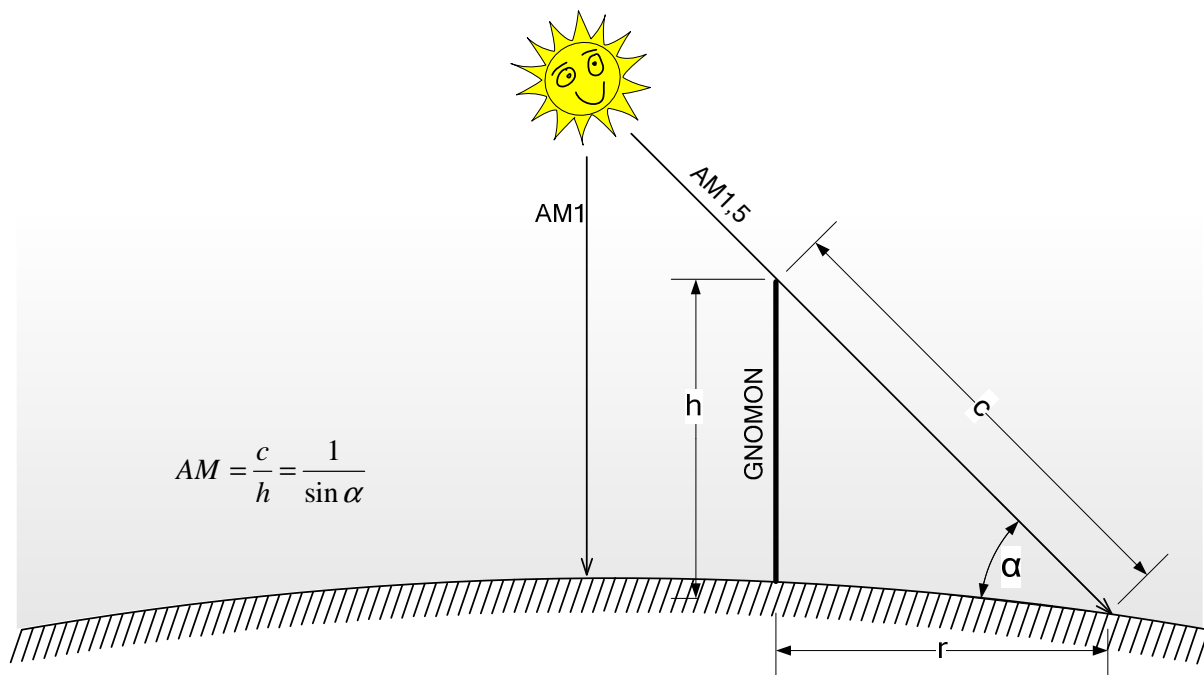


Spektralna gostota povprečnega zunajzemlskega sončnega sevanja je prikazana na sliki 1 kot spekter AM0. Odboj, sipanje in absorpcija v atmosferi zmanjšajo to vrednost za približno 30 odstotkov, tako da ob jasnem vremenu in zenitni legi sonca (AM1) vpada na zemeljsko površino okrog tisoč vati na kvadratni meter. Spektralna gostota standardiziranega sevanja na zemeljski površini je prikazana na sliki 1 kot spekter AM 1,5. Globalno sevanje na zemeljski površini je sestavljeno iz dveh komponent: direktnega in razpršenega sevanja. Direktno sevanje prihaja neposredno od sonca, medtem ko razpršeno sevanje vpada z vseh strani neba. Ko je nebo povsem oblačno, prispe do zemeljske površine le razpršeno sevanje.

Preglednica 1: Delež razpršenega sevanja

Vreme	Jasno	Megleno/oblačno (sonce slabo vidno)	Oblačno (sonce ni vidno)
Celotna gostota moči sončnega sevanja (W/m^2)	600-1000	200-400	50-150
Difuzni delež (%)	10-20	20-80	80-100

Tudi v primeru jasnega neba se maksimalna gostota moči sevanja čez dan spreminja. Faktor zračne mase AM (air mass) je merilo višine sonca nad obzorjem. Faktor AM1 pomeni višino sonca 90° , torej je sonce v zenitu. Pot sončnega sevanja čez atmosfero je najkrajša, zato sta odboj in absorpcija najmanjša, gostota moči sevanja na zemlji pa največja. V zenitno lego pride sonce samo v bližini ekvatorja do $\pm 23^\circ$ zemljepisne širine. Z nižanjem višine sonca na obzorju se faktor zračne mase AM večja, dolžina poti sončnega sevanja čez atmosfero se daljša, gostota moči sončnega sevanja na zemlji pa je vedno manjša. Standardizirani so preizkusi FN modulov pri faktorju zračne mase AM1,5, ko je sonce $41,8^\circ$ nad obzorjem.



Slika 2: Faktor zračne mase AM

Preglednica 2: Odvisnost faktorja zračne mase AM od višine sonca nad obzorjem

AM	1	1,5	2
α	90°	41,8°	30°

Temperatura

Izkoristek sončne celice se zmanjšuje z naraščanjem njene temperature, saj se v tem primeru zmanjšuje napetost odprtih sponk. Meritve so potrdile, da je pri temperaturi sončne celice 60°C izkoristek nižji za 20 % glede na nazivno vrednost. Na solarne dobitke pa poleg naklona, orientacije in senčenja vpliva še umazanija. Raziskave so pokazale, da lahko prah in umazanija zmanjšata solarne dobitke za neke 8 procentov. http://lpvo.fe.uni-lj.si/El_iz_sonca/el_iz_sonca.htm

Vpadni kot sočnega sevanja na površino modula

Vpliv vpadnega kota sončnega sevanja na površino FN modula je tema naše raziskave. Moč in izkoristek FN modula sta odvisna od kota, pod katerim vpada sončno sevanje na površino FN modula.

Senčenje

Če je le možno, se je senčenju smiselno popolnoma izogniti. Problem senčenja, predvsem delnega senčenja zaradi okoliških objektov, je mnogokrat podcenjen. Najslabše je delno senčenje zaradi drogov ali dimnikov v neposredni bližini FN generatorja. Sončna celica z najmanjšim tokom določa količino elektrike, ki lahko teče skozi množico zaporedno vezanih celic. To pomeni, da se izhodna moč zmanjša enako, če je delno senčena ena sama celica oziroma celotna vrsta zaporedno vezanih celic ali celo modulov. Senčenje, ki ga povzročijo drevesa in sosednje zgradbe kot tudi držala za ventilatorje, dimniki in podobno, omejuje in v najslabšem primeru celo ustavi proizvodnjo celotne verige zaporedno vezanih modulov.

Legi FN modula

Najugodnejši kot naklona pri postavitvi sončnega generatorja je odvisen od določenih pogojev, pod katerimi sistem deluje. Pri tem je potrebno razlikovati med samostojnimi in omrežnimi FN sistemi. Izvedbe omrežnih FN sistemov so običajno izvedene za največji letni donos. V srednji Evropi dosežemo največji letni izkoristek sončnega modula s 30° kotom in pri azimutu -5°. http://lpvo.fe.uni-lj.si/El_iz_sonca/el_iz_sonca.htm

Navpične površine, ki so usmerjene proti jugu (južne fasade), omogočajo izkoristke do 70 % optimalne vrednosti. Takšna porazdelitev je značilna za celotno srednjo Evropo. Optimalen kot naklona v Sloveniji znaša okoli 32° in je manjši kot je povprečni sončni zenit (enakovreden 90° - zemljepisna širina), ker največji delež sončnega sevanja v srednjeevropskem podnebju vpada med toplejšimi šestimi meseci. http://lpvo.fe.uni-lj.si/El_iz_sonca/el_iz_sonca.htm

FN generatorje lahko postavimo na samostojne konstrukcije na tleh ali jih vgradimo v stavbe.

Sledilni sistem

Povečanje donosa sončne elektrarne lahko dosežemo s sledenjem. Poznamo dva tipa sledenja: enoosno in dvoosno sledenje. Pri enoosnem – dnevnem – sledenju se moduli obračajo od vzhoda proti zahodu, njihov naklon pa ostaja enak. Pri dvoosnem sistemu moduli dnevno sledijo soncu, istočasno pa se spreminja tudi njihov naklon, tako da je sprejemna površina modulov vedno pravokotna na vpadni sončni žarek. Glede na izvedbo sledilnika ločimo

pasivne in aktivne sledilnike. Pasivni sledilniki imajo vnaprej določeno pot sledenja, medtem ko aktivni sledilniki sledijo soncu s pomočjo senzorjev. Boljši sledilniki imajo kombiniran način delovanja. Upravičenost uporabe sledilnikov pri klasičnih fotonapetostnih modulih je odvisna od višine investicije, ki je potrebna za mehansko konstrukcijo sledilnika, dodatne elektronike in vzdrževanja sistema ter od lokalnih klimatskih pogojev. Pri enoosnem sledenju lahko proizvedemo okoli 15–20 % več energije kot s statičnim sistemom, z dvoosnim sledilnikom pa pridobimo okoli 30–35 % več energije.

<http://pv.fe.uni-lj.si/Welcome.aspx?action=PV&ID=0>

2.4 Sončna elektrarna

Je namenjena pretvorbi sončnega sevanja v električno energijo. Sestavljena je iz večjega števila medsebojno povezanih FN modulov in ustrezne regulacijske opreme.

2.4.1 Avtonomno obratovanje

Avtonomni FN sistemi oskrbujejo porabnike znotraj lokalnega električnega omrežja. Delimo jih na:

- FN sisteme brez akumulatorja ali z njim,
- FN sisteme za enosmerne ali izmenične porabnike,
- čiste ali hibridne FN sisteme v kombinaciji z drugimi generatorji električne energije.

Avtonomni oziroma samostojni fotonapetostni sistemi za napajanje naprav in porabnikov so v splošnem sestavljeni iz fotonapetostnega generatorja, polnilnega generatorja, akumulatorja in regulatorja napetosti. S tem sistemom lahko oskrbujemo enosmerno breme. Fotonapetostni generator sestavljajo medsebojno povezani fotonapetostni moduli. Poznamo izvedbe malih FN modulov za napajanje specifičnih izdelkov (na primer v kalkulatorju) za majhne moči ter izvedbe standardnih FN modulov za vršne moči od nekaj vatov do nekaj sto vatov.

2.4.2 Omrežno obratovanje

Omrežni FN sistemi oddajajo električno energijo v električno omrežje, zato jih imenujemo sončne elektrarne. Med njimi ločimo:

- razpršene sisteme,
- centralne sisteme (velike sončne elektrarne z močjo nad 100 kWp).

Poznamo mnogo izvedb omrežnih FN sistemov, vse pa je značilno, da poleg FN generatorja potrebujejo razsmernik. Med omrežnimi FN sistemi so najbolj razpršeni in perspektivni sistemi, ki zahtevajo le FN generator, razsmernik, dodatni števec električne energije in zaščitne komponente.

3 MATERIALI IN METODE

V uvodu postavljene hipoteze smo potrjevali z meritvami električne moči fotonapetostnega modula izpostavljenega sončnemu sevanju pod različnimi vpadnimi koti β in pri različnih smereh vpada φ sončnega sevanja. Usmerjenost FN modula glede na vpadni kot in smer vpada sončnega sevanja bomo v nadaljevanju imenovali usmeritev FN modula.

Rezultati naših meritev niso bili odvisni samo od usmerjenosti FN modula temveč tudi od vplivnih veličin.

3.1 Vplivne veličine

Vplivna veličina ni merjena veličina, vendar vpliva na rezultat merjenja. http://evrokorpus.gov.si/svez_slovar4.php?beseda=veli%C4%8Dina&drugi=E&jezik=angl

Vplivne veličine predstavljajo neželeni vpliv na rezultat meritve. Na rezultate meritev vplivajo naslednje vplivne veličine:

- temperatura FN modula,
- zaprašenost stekla,
- senčenje,
- jakost sončnega sevanja: njena trenutna vrednost je odvisna od višine sonca (air mass) in stanja atmosfere (oblačnost, prosojnost ozračja).

Naš cilj je bil določiti vpliv usmeritve FN modula na maksimalno električno moč, pri tem pa odpraviti učinek vplivnih veličin.

Prva možnost je izvajanje meritev pri kontroliranih vrednostih vplivnih veličin. To zahteva merjenje in s tem nadzor njihovih vrednosti. Tega nam dosegljiva merilna tehnologija ni omogočala. Z enostavnimi merilnimi metodami in drugimi ukrepi lahko merimo temperaturo in kontroliramo senčenje in zaprašenost. Nismo imeli merilne metode za merjenje gostote moči sončnega sevanja.

Zato smo se odločili za drugo možnost, pri kateri lahko zaradi nespremenjenih vplivnih veličin pri vseh meritvah potrjevanja posamezne hipoteze zanemarimo njihov učinek na primerjavo rezultatov meritev.

To smo dosegli s hitrostjo opravljanja meritev. Vse meritve za potrditev posamezne hipoteze smo poskusili opraviti v čim krajšem času tako, da se vrednosti vplivnih veličin v času meritev niso bistveno spremenile. Tako so bile vse meritve za potrjevanje posamezne hipoteze izvedene pri enakih vrednostih vplivnih veličin in pri različnih usmeritvah FN modulov. Vpliv vplivnih veličin na rezultate meritev smo tako izenačili pri vseh usmeritvah FN modula in dosegli pogoj za primerjavo rezultatov pri različnih usmeritvah FN modula. S tem smo sprejeli dejstvo, da izmerjene vrednosti niso absolutne, temveč relativne glede na trenutne vrednosti vplivnih veličin.

Za merjenje smo izbrali dan s stabilno atmosfero brez oblačnosti in fazo dneva, ko sonce le malo spreminja svojo višino nad obzorjem. Bili smo pozorni na morebitno senčenje FN modula, njegovo površino smo pred merjenjem očistili. Modul smo izpostavili vplivom vremena, sončnega sevanja in temperature okoliškega zraka eno uro pred meritvami zaradi stabilizacije temperature. Tako smo dosegli enake pogoje oziroma vrednosti vplivnih veličin za vse usmeritve FN modula.

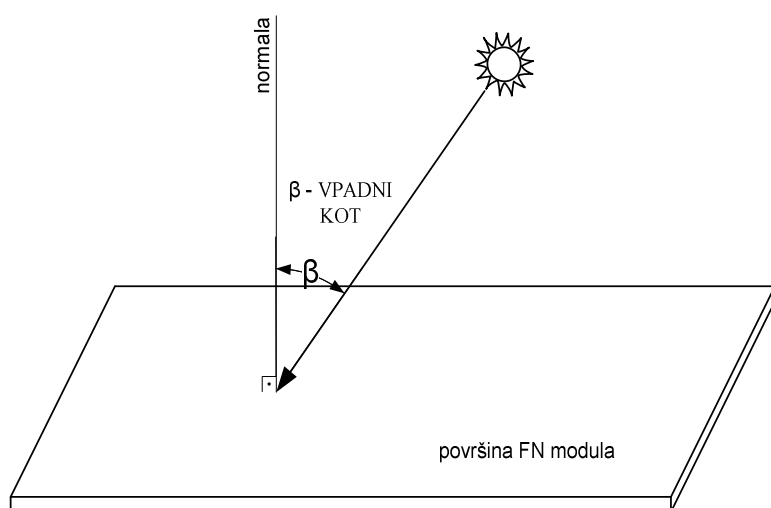
3.2 Usmerjanje fotonapetostnega modula

Modul smo fiksirali na stojalo iz aluminijastih profilov. Smer modula smo lahko spreminjali dvoosno. S pomočjo zglobov smo spreminjali naklon modula po vertikali od vodoravne do navpične lege. Horizontalno smer (azimut) modula smo spreminjali preprosto s premikom celotnega stojala. Tako smo dosegli katerokoli usmeritev modula glede na smer sončnega sevanja.

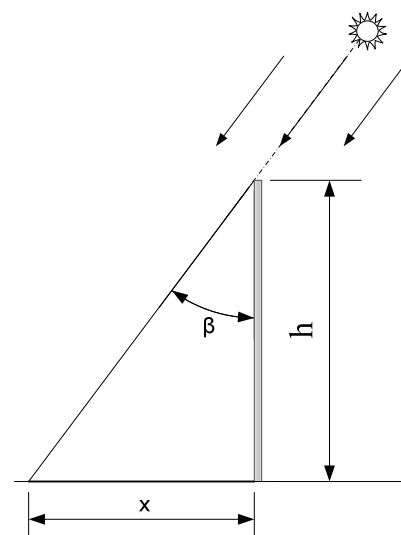
Pri usmerjanju FN modula smo merili dva kota, ki sta točno določila smer površine modula glede na smer sončnega sevanja.

3.2.1 Merjenje vpadnega kota

Kot med normalo na površino FN modula in smerjo sončnega sevanja je vpadni kot. Ko padajo sončni žarki pravokotno na površino FN modula oziroma vzporedno z normalo na površino, je vpadni kot enak 0° . Z nagibanjem modula večamo vpadni kot od 0° do 90° . Ko so sončni žarki vzporedni s čelno površino FN modula, je vpadni kot enak 90° .



Slika 3: Vpadni kot



Slika 4: Izračun vpadnega kota

Vpadni kot smo merili posredno preko meritve dolžine sence fizično izdelane normale (gnomon) na površino FN modula. Tangens vpadnega kota je enak razmerju med dolžino sence x in višino normale h .

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{x}{h}$$

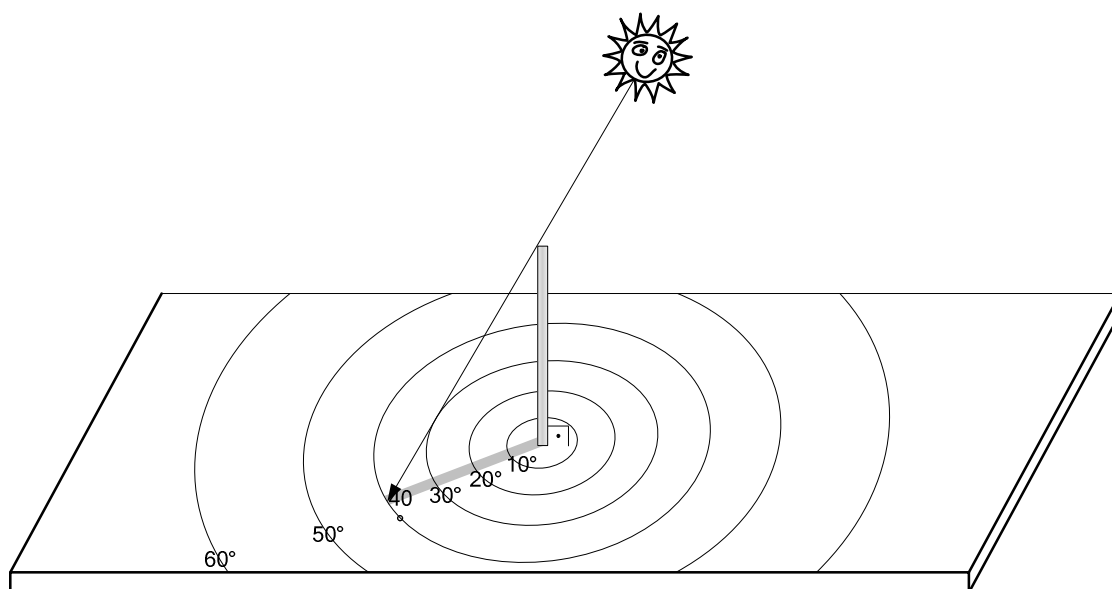
Vpadni kot β izračunamo s kotnimi funkcijami:

$$\beta = \operatorname{arctg}\beta$$

Na hrbtno stran modula smo pritrdili ravno merilno ploščo, ki je segala preko roba FN modula

tako, da je bila ravnina merilne plošče vzporedna z ravnino čelne strani FN modula. (Priloga 2)

Pravokotno na površino merilne plošče smo pritrdili ravno palico, ki je predstavljala merilno normalo (gnomon) s točno znano dolžino. Za vpadne kote manjše od 90° smo izmerili dolžino sence, ki jo je palica povzročila na merilni plošči in izračunali vrednost vpadnega kota. Za hitrejše nastavljanje vpadnih kotov smo na ploščo narisali krožnice s središčem v palici, ki so označevale dolžino sence za ustrezen vpadni kot sončnega sevanja.

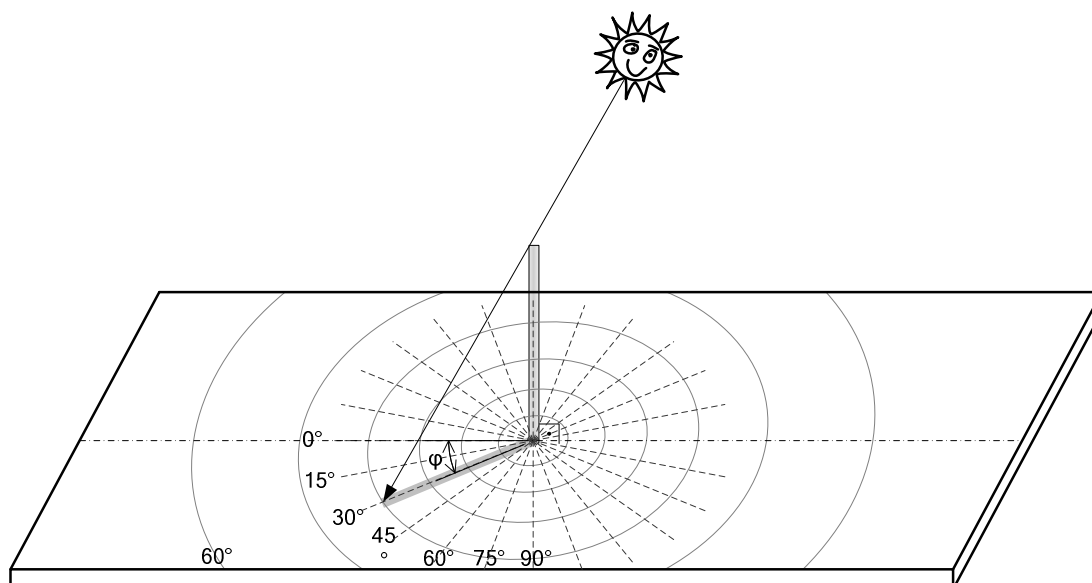


Slika 5: Merjenje vpadnega kota z normalo in krožnicami

3.2.2 Merjenje smeri vpada

Smer vpada sončnega sevanja je geometrijski kot med smerjo daljše stranice FN modula in smerjo projekcije sončnega sevanja na površino FN modula. Smeri vpada ni možno določiti samo v primeru, ko pada sončno sevanje pravokotno na površino modula in je vpadni kot enak 0° . Ko je vpadni kot večji od 0° , je smer vpada določljiva, ker se je smer površine modula glede na smer sončnega sevanja morala odkloniti v določeni smeri. Če pada sončno žarčenje pod vpadnim kotom v smeri daljše stranice modula, je smer odklona enaka 0° . Z vrtenjem modula lahko pri enakem vpadnem kotu dosežemo smeri vpada od 0° do 360° .

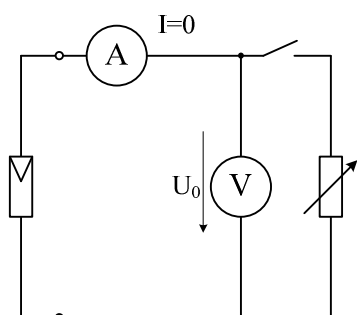
Smer vpada sončnega sevanja smo merili s pomočjo iste na površino modula pravokotno nameščene palice, kot je služila za merjenje vpadnega kota. Na površino plošče smo z namenom merjenja smeri vpada narisali smerne črte po koraku 15° . Smer vpada sončnega sevanja je bila določena, ko je senca palice pokrila ustrezno smerno črto na površini plošče. Tako smo s pomočjo plošče vzporedne z modulom, pravokotno pritrjeno palico in narisanimi krožnicami ter smernimi črtami dobili enostavno napravo za usmerjanje modula glede na vpadni kot in smer vpada. (Priloga 2)



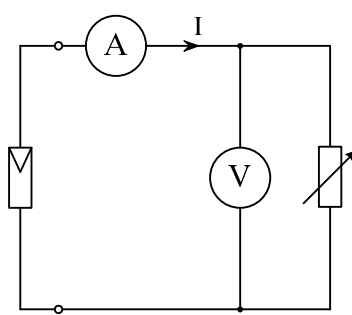
Slika 6: Merjenje smeri vpada

3.3 Merjenje IU karakteristike

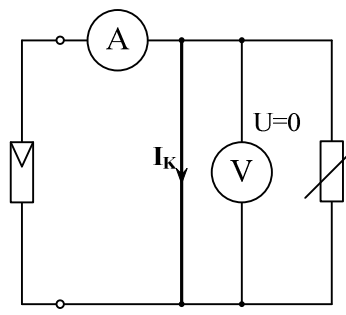
Po UI metodi izmerimo tok in napetost pri različnih obremenitvah FN modula. Pri meritvi morajo biti vse vplivne veličine konstantne. Merjenje IU karakteristike začnemo z meritvijo napetosti odprtih sponk (Slika 7). Potem FN modul obremenimo s spremenljivim uporom (Slika 8) in izmerimo tokove in napetosti pri vedno večjem toku. Obremenitev večamo z manjšanjem upornosti spremenljivega ohmskega upora tako, da teče iz FN modula vedno večji tok. Zaradi nelinearnosti IU karakteristike je pomembno, da omejimo korak napetosti in korak toka med dvema zaporednima obremenitvama. Tako bo karakteristika natančno izmerjena tudi v področju hitrega padanja napetosti pri velikih obremenitvah. Meritev končamo z meritvijo kratkostičnega toka (Slika 9) pri kratko sklenjenih priključnih sponkah modula.



Slika 7: Napetost prostega teka



Slika 8: Meritve pri različnih obremenitvah



Slika 9: Kratkostični tok

3.4 Določanje maksimalne moči

Električna moč FN modula je produkt toka in napetosti pri danem sončnem sevanju in obremenitvi.

$$P = U \cdot I \quad \dots \quad \text{enačba 1}$$

Generirana električna moč FN modula je odvisna od trenutne gostote sončnega sevanja, vpadnega kota, temperature FN modula in njegove obremenitve. Pri konstantnih vplivnih veličinah je moč modula odvisna samo od njegove obremenitve. To pomeni, da se moč modula spreminja z obremenitvijo. Pri točno določeni obremenitvi je električna moč modula maksimalna.

Maksimalno moč FN modula določimo tako, da po enačbi 1 izračunamo električno moč za vsako izmerjeno obremenitev. Največja izračunana moč pri različnih obremenitvah je maksimalna električna moč FN modula pri danih pogojih sončnega obsevanja. Za natančno določitev maksimalne moči je pomembno dovolj veliko število izmerjenih obremenitev med prostim tekom in kratkim stikom oziroma natančno določanje obremenilnih točk pri meritvah v kolenu IU karakteristike FN modula.

3.5 Izvajanje meritev

Uporabili smo polikristalni silicijev FN modul proizvajalca Phaseun solar modules z nazivnimi podatki

Model: UPE050 M501PSP

TYPE: 50W/12V

P_{mpp} : 50 Wp

P_{min} : 46,60Wp

I_{mpp} : 2,92A

U_{mpp} : 17,1V

U_{oc} : 21,0V

I_{sc} : 3,31A

Data are measured at STC

(@ 1000W/m², cell temperature 25°C, AM 1,5)

Dimenzije: 980 x 435 x 35 mm.

Modul smo usmerjali glede na smer sončnega sevanja, kot je opisano v poglavju 3.2. Vsaki usmeritvi modula glede na smer sončnega sevanja smo izmerili IU karakteristiko. Za vse izmerjene obremenitve FN modula smo izračunali električno moč.

3.6 Uporaba DAQ vmesnika

Zaradi zahteve po čimbolj hitro izvedenih meritvah (poglavje 3.2) smo se odločili za uporabo DAQ vmesnika NI 6008 povezanega z računalnikom, ki nam izmerjene podatke shrani in omogoča analizo.

NI 6008 je zelo enostavna naprava za merjenje signalov visoke merilne kakovosti. Vmesnik povežemo z računalnikom preko USB vodila. Za hranjenje izmerjenih vrednosti tokov in napetosti smo uporabili program LabView Signal express. NI USB DAQ vmesnik ima 8 kanalov in 12-bitni analogni vhod, dva analogna izhoda in 12 digitalnih izhodov. Opravi lahko do 10 000 meritev v sekundi, kar presega potrebe meritev naše raziskave. Inštrument je

napajan z USB vodilom in ima merilno območje ± 10 V.

Merjene napetosti FN modula, ki lahko dosežejo vrednosti 21 V smo morali prilagoditi merilnemu dosegu vmesnika ± 10 V. Prav tako smo merjene toke FN modula pretvorili v napetost znotraj merilnega dosega vmesnika.



Slika 10: DAQ vmesnik NI 6008

3.6.1 Merjenje napetosti

Napetost FN modula smo merili s prvim kanalom DAQ vmesnika. Izhodno napetost FN modula smo zmanjšali z delilnikom napetosti na vrednosti znotraj merilnega dosega analognih vhodov vmesnika. Nazivna napetost odprtih sponk U_{oc} je najvišja napetost, ki jo lahko FN modul doseže. Z uporovnim delilnikom z razmerjem upornosti 1:2 smo izhodno napetost FN modula zmanjšali približno trikrat tako, da smo dosegli na vhodu DAQ vmesnika največ 7 V napetosti pri maksimalni napetosti FN modula, kar je znotraj merilnega dosega analognih vhodov vmesnika. Ohmsko upornost delilnika smo prilagodili napetosti prostega teka in moči uporov tako smo preprečili segrevanje uporov in neželeno spremembo ohmske upornosti. Ustrezen delilnik smo naredili iz dveh uporov moči 0,25 W in upornosti 3,3 k Ω in 6,6 k Ω .

Pred meritvijo smo delilnik umerili z digitalnim voltmetrom Finest 707, ki je meril dejansko napetost FN modula. Umerili smo ga tako, da smo v program Signal expres vnesli faktor s katerim je bila pomnožena vsaka izmerjena napetost prvega kanala. Vnesen faktor je bil pravilen in meritev napetosti umerjena, ko se vrednosti, izmerjeni z vmesnikom in digitalnim instrumentom, nista razlikovali.

3.6.2 Merjenje toka

Tok smo merili z drugim kanalom DAQ vmesnika. Merjeni tok FN modula smo z ohmskim uporom pretvorili v napetost znotraj merilnega dosega analognih vhodov DAQ vmesnika. Ohmski upor R_S za merjenje toka smo povezali zaporedno v električni krog FN modula. Največji pričakovani tok 3,31 A doseže FN modul v kratkem stiku. Z ohmsko upornostjo 1Ω smo pri kratkostičnem toku dosegli padec napetosti 3,31 V, kar ustreza merilnemu dosegu analognih vhodov DAQ vmesnika.

Ker ohmska upornost zaradi kontaktov ni bila točno 1Ω , smo drugi kanal DAQ vmesnika umerili z digitalnim ampermetrom Finest 707, ki je meril dejanski tok. V program Signal expres smo vnesli faktor, s katerim je bila pomnožena vsaka izmerjena napetost drugega kanala. Vnesen faktor je bil pravilen in meritev toka umerjena, ko se vrednosti toka izmerjeni z DAQ vmesnikom in digitalnim ampermetrom nista razlikovali.

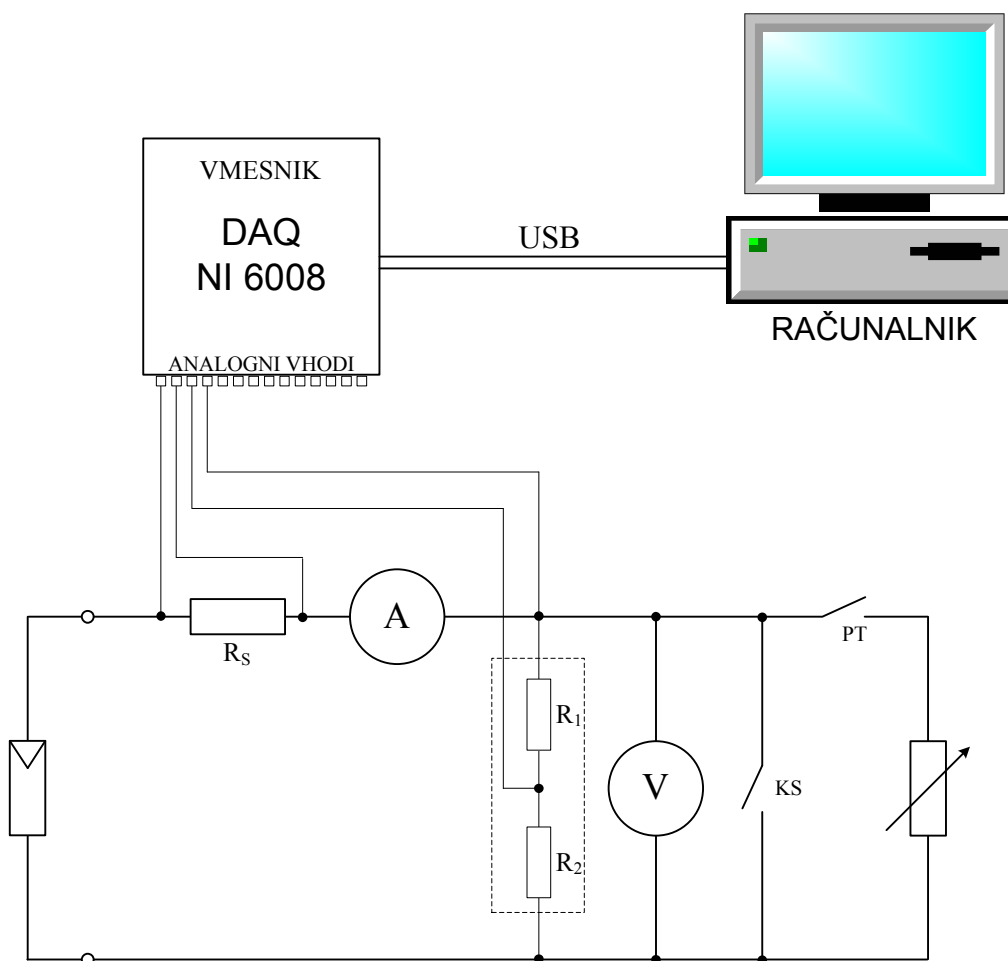
3.7 Potek meritve

Po umerjanju DAQ vmesnika in usmeritvi FN modula smo začeli s snemanjem rezultatov meritev. Frekvenco meritev smo nastavili na 5 Hz tako, da naredi vmesnik v vsaki sekundi 5 meritev oziroma meritve s periodo 0,2 sekunde.

Meritve smo začeli s prostim tokom, ko sta bili stikali PT in KS razklenjeni (slika 11). Bremensko upornost smo nastavili na največjo vrednost in vklopili stikalo PT. Z manjšanjem upornosti bremena smo večali tok FN modula. Obremenitev smo večali s takšno hitrostjo, da se v času 0,2 sekunde med dvema zaporednima meritvama napetost ali tok nista skokovito spremenila. Pazljivi smo bili pri velikih obremenitvah v kolenu UI karakteristike, ko napetost skokovito pade že pri malih povečanjih toka obremenitve. Bremenski upor smo sestavili iz dveh zaporedno vezanih uporov. Prvega z upornostjo 100Ω smo uporabili za grobo spreminjanje toka, drugega z upornostjo 10Ω pa za fino spreminjanje toka. Merilec je opazoval napetost na digitalnem voltmetru in spreminjal upornost bremena tako hitro, da je preprečil skokovito spremembo napetosti, oziroma držal največjo spremembo napetosti približno 1V med dvema zaporednima meritvama. Tako smo dosegli enakomerno pokritost IU karakteristike FN modula z meritvami in s tem povečali zanesljivost rezultatov.

Ko smo zmanjšali upornost bremena na najmanjšo vrednost, smo vklopili še stikalo KS in končno izmerili kratkostični tok FN modula ter zaustavili snemanje rezultatov meritve.

Čas meritev za posamezno usmeritev FN modula je bil v povprečju 30 sekund. Med meritvami smo preusmerjali FN modul, kar je zahtevalo daljši čas kot sama meritev. Za 10 različnih usmeritev FN modula smo s pomočjo merilne metode z DAQ vmesnikom potrebovali pol ure.



Slika 11: Vezni načrt za merjenje IU karakteristike

3.8 Analiza rezultatov

Izmerjene vrednosti tokov in napetosti smo iz programa LabVIEW Signal Express izvozili v Microsoft Excel in jih hranili v pomnilnik računalnika. Za vsako usmeritev FN modula smo zabeležili datum in čas meritve, temperaturo okoliškega zraka in stanje atmosfere.

Podatke smo analizirali v programskem okolju Microsoft Excel. Za vsako obremenitev smo po enačbi 1 izračunali električno moč FN modula. Iz izmerjenih in izračunanih podatkov smo za vsako usmeritev FN modula narisali IU karakteristiko in odvisnost moči od obremenitve FN modula. Na karakteristiki moči in v tabeli izračunanih moči smo označili maksimalno moč modula. Maksimalne moči modula pri različnih usmeritvah smo primerjali med sabo in tako prišli do uporabnih rezultatov raziskave.

Primer rezultatov celotne meritve za usmeritev modula z vpadnim kotom 0° glede na smer sončnega sevanja je v prilogi 1.

4 REZULTATI

K meritvam smo pristopili postopno, tako da smo hipoteze potrjevali po vrsti. Najprej smo izvedli meritve za potrditev prve hipoteze:

4.1 Potrjevanje 1. hipoteze

FN moduli so izotropni. Učinkovitost FN modulov ni odvisna od smeri odklona.

Trditev lahko ovržemo v primeru, ko bi bila maksimalna izmerjena moč ali pa potek IU karakteristike modula različna v dveh različnih smereh odklona. FN modul smo izpostavili sončnemu sevanju in pri enakem vpadnem kotu izmerili maksimalno moč za različne smeri vpada sončnih žarkov. Smeri vpada smo določili glede na smer daljše stranice FN modula. Modul smo vrteli – spreminjali smer vpada sončnega sevanja – in izmerili IU karakteristiko pri 15-stopinjskih spremembah smeri vpada. Začetni kot 0° smo določili za vpad sevanja v smeri daljše stranice modula tako, da je omarica s priključnimi sponkami na vrhu modula. Modul smo vrteli v smeri urinega kazalca s korakom 15° do pravokotne smeri vpada sevanja na smer daljše stranice FN modula. Vpadni kot je bil pri vseh nastavljenih smereh vpada sončnega sevanja enak 45° . Za vpadni kot 45° smo se odločili zaradi zadostnega zmanjšanja maksimalne moči glede na pravokotno usmeritev modula, ko smeri vpada ni mogoče določiti.

Pogoji meritve:

Datum: 9. 12. 2008

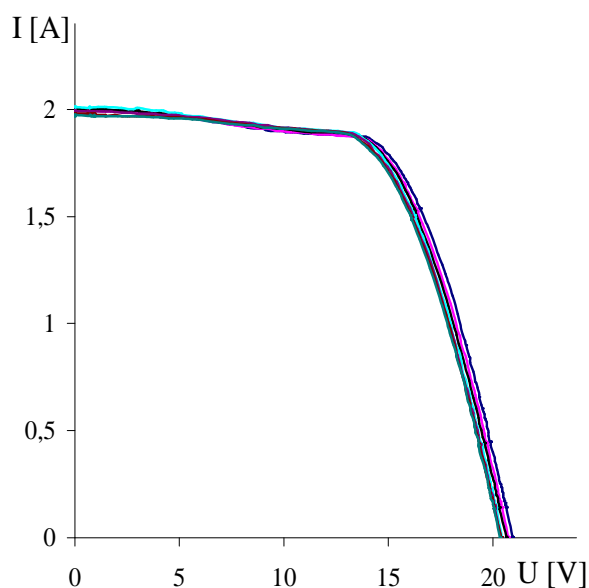
Ura: 12.50 do 13.10

Temperatura: 5°C

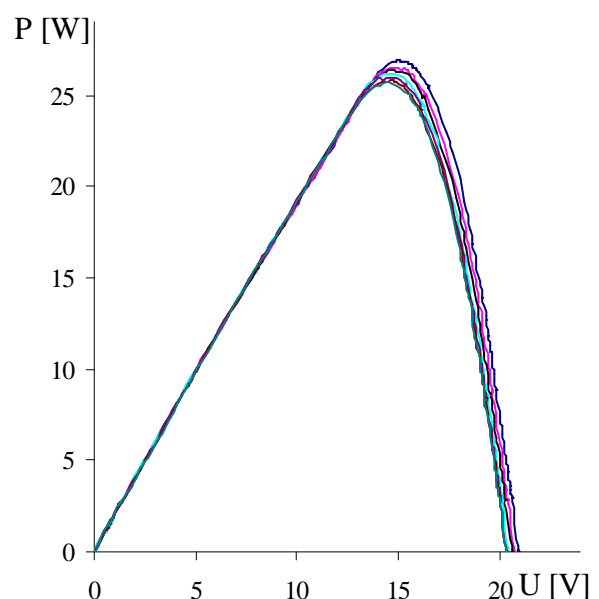
Stanje atmosfere: stabilno sončno brez oblakov

Vpadni kot $\beta=45^\circ$

Graf 3: IU karakteristike FN modula pri smereh vpada med 0° in 90°



Graf 4: Karakteristika moči FN modula pri smereh vpada med 0° in 90°



V grafih 3 in 4 je prikazanih po sedem karakteristik. Vsaka pripada svoji smeri vpada sončnega sevanja: 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° in 90° pri vpadnem kotu $\beta=45^\circ$. V grafu 3 so prikazane IU karakteristike. Vse karakteristike se dobro prekrivajo. Napetost prostega teka med obema skrajnima smerema vpada se razlikuje za manj od 3 %, kratkostična toka pa manj od 2 %.

Graf 4 prikazuje karakteristike moči za vseh sedem smeri vpada. Izmerjeni rezultati kažejo neodvisno učinkovitost FN modulov od smeri vpada pri konstantnem vpadnem kotu. Natančnejša analiza rezultatov (preglednica 3) kaže na razliko med smerjo vpada 0° in 90° za največ 5 %. Razlika je majhna vendar zaradi linearnega padanja maksimalne moči FN modulov s smerjo vpada so rezultati meritev potrebni natančnejše analize.

Preglednica 3: Rezultati meritev odvisnosti električne moči od smeri odklona FN modula

smer vpada	P_m [W]	P_m [%]	U_0 [W]	U_0 [%]	I_k [A]	I_k [%]
0	26,8	100	20,9	100	2,006	100
15	26,5	98,7	20,7	99,0	2,001	99,7
30	26,3	98,2	20,6	98,6	2,001	99,7
45	26,2	97,5	20,5	97,9	2,012	100,3
60	25,9	96,5	20,4	97,4	1,990	99,2
75	25,8	96,1	20,4	97,4	1,980	98,6
90	25,7	95,6	20,3	97,1	1,975	98,4

Za zanesljivo potrditev prve hipoteze smo poskušali poiskati razlog za odstopanja v rezultatih. Odstopanja v izmerjenih rezultatih bomo poskušali pojasniti s spreminjanjem vplivnih veličin v teku meritve. Primerljivost naših merenj temelji na predpostavki nespremenljivih vplivnih veličin. Meritve smo izvedli v času 30 minut pri zelo nizkem zimskem soncu. Obstaja realna možnost, da se je v času merenj spremenilo obsevanje zaradi premika sonca ali zaradi spremembe drugih pogojev (atmosfera, razpršeno sevanje), ki vplivajo na električno moč FN modula. Male razlike med električno močjo modula pri različnih smereh vpada lahko torej pripišemo preslabi točnosti naših meritev oziroma slabi kontroli pogojev meritve.

Zaradi male razlike med pričakovanimi in izmerjenimi rezultati lahko zaključimo, da moč FN modulov ni odvisna od smeri vpada sončnega sevanja.

Potrdili smo 1. hipotezo: FN moduli so izotropni. Učinkovitost FN modulov ni odvisna od smeri odklona.

4.2 Potrjevanje 2. hipoteze

Kot, pod katerim vpada sončno žarčenje na površino FN modulov, vpliva na učinkovitost pretvorbe sončnega sevanja.

FN modul smo izpostavili sončnemu sevanju pri čimbolj nespremenljivih vplivnih veličinah. Kljub temu, da smo prvo hipotezo potrdili, smo FN modul usmerjali tako, da je bila smer

odklona pri vseh meritvah enaka 0° - smer vpada sončnega sevanja vzporedna z daljšo stranico FN modula. Odvisnost maksimalne električne moči smo izmerili pri vpadnih kotih med 0° , ko je smer sončnega sevanja pravokotna na površino modula, in 90° , ko so sončni žarki vzporedni s površino FN modula. Vpadni kot smo spreminjali v koraku 10° .

Pogoji meritve:

Datum: 9. 12. 2008

Ura: 12.00 do 12.30

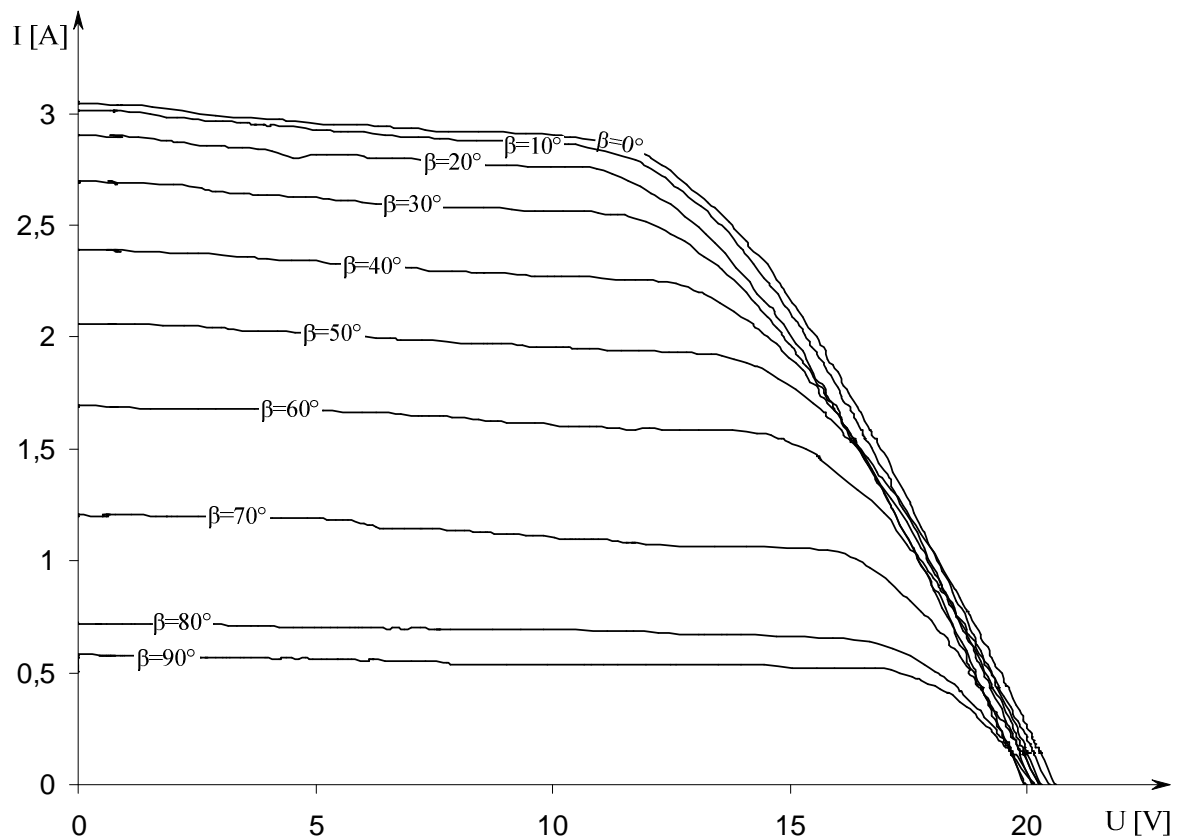
Temperatura: 5°C

Stanje atmosfere: stabilno sončno brez oblakov

Smer odklona $\varphi=0^\circ$

Rezultati meritve:

Graf 5: IU karakteristike pri različnih vpadnih kotih FN modula

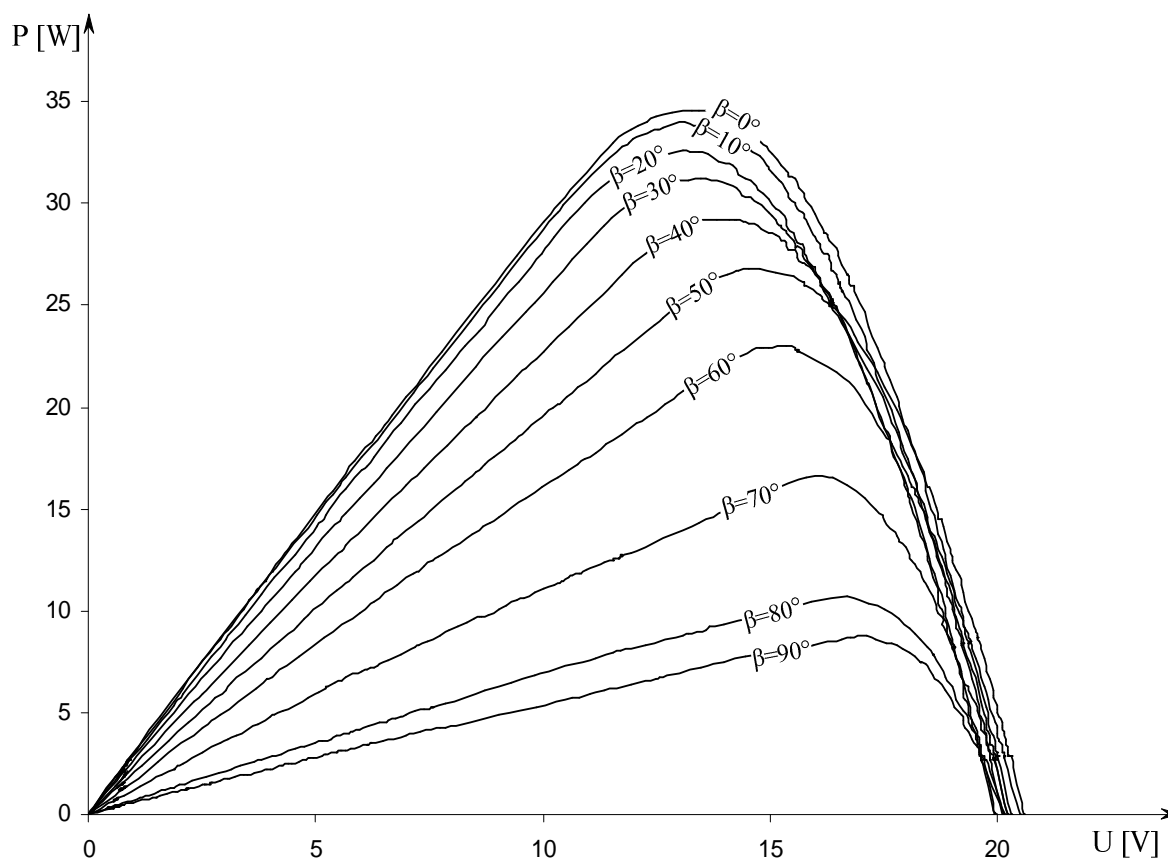


IU karakteristike FN modula izmerjene pri različnih vpadnih kotih so različne. Vpadni kot ima zanemarljiv vpliv na napetost prostega teka ter močan vpliv na kratkostični tok. Pri pravokotnem vpadu sončnega sevanja $\beta=0^\circ$ je kratkostični tok največji, pri vzporednem vpadu sončnega sevanja $\beta=90^\circ$ pa je bil kratkostični tok najmanjši.

Primerjava izmerjenih maksimalnih moči FN modula pri različnih vpadnih kotih pokaže podobne rezultate kot primerjava kratkostičnega toka. Maksimalna moč je močno odvisna od vpadnega kota. Pri pravokotnem vpadu je pri danih pogojih FN modul dosegel 69 % svoje

nazivne moči. Z večanjem vpadnega kota se je maksimalna izmerjena moč manjšala tako, da je modul pri vzporednem vpadu sončnega sevanja in pri enakih vrednostih vplivnih veličin dosegel samo še dobrih 17 % nazivne moči.

Graf 6: Odvisnost moči FN modula od obremenitve pri različnih vpadnih kotih β



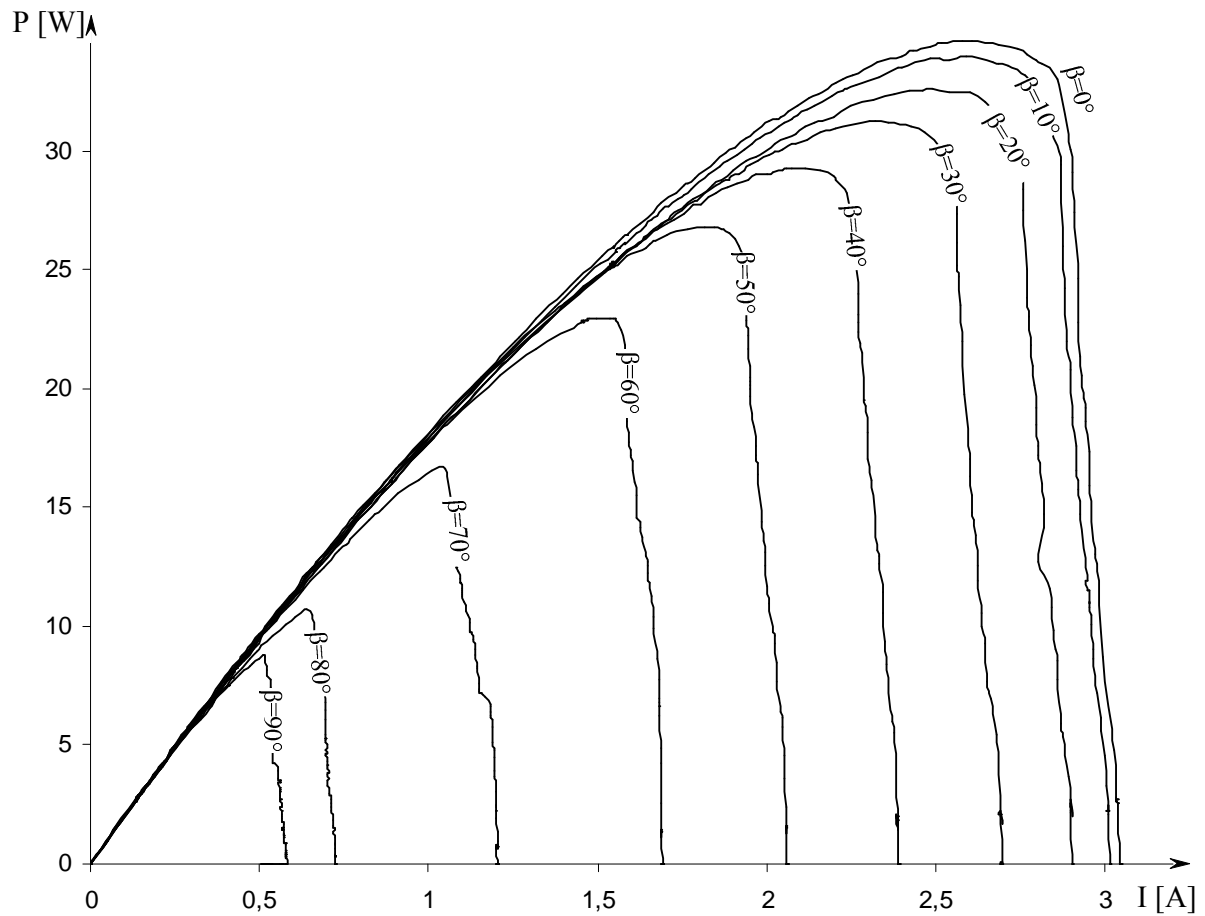
Preglednica 4: Izmerjene maksimalne moči FN modula pri različnih vpadnih kotih

β [°]	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
P_m [W]	34,60	33,97	32,58	31,26	29,24	26,78	22,95	16,58	10,70	8,77
P_m [%]	69,19	67,95	65,16	62,51	58,49	53,57	45,9	33,17	21,4	17,55

Karakteristike moči dosegajo z večanjem odklona vedno manjšo maksimalno vrednost, ki se pomika v levo k vedno manjšim obremenitvam. To se ujema z vedno manjšim kratkostičnim tokom pri večanju odklona.

Potrdili smo drugo hipotezo. Kot, pod katerim vpada sončno žarčenje na površino FN modulov, vpliva na učinkovitost pretvorbe sončnega sevanja.

Graf 7: Odvisnost moči FN modula od obremenitve pri različnih vpadnih kotih β

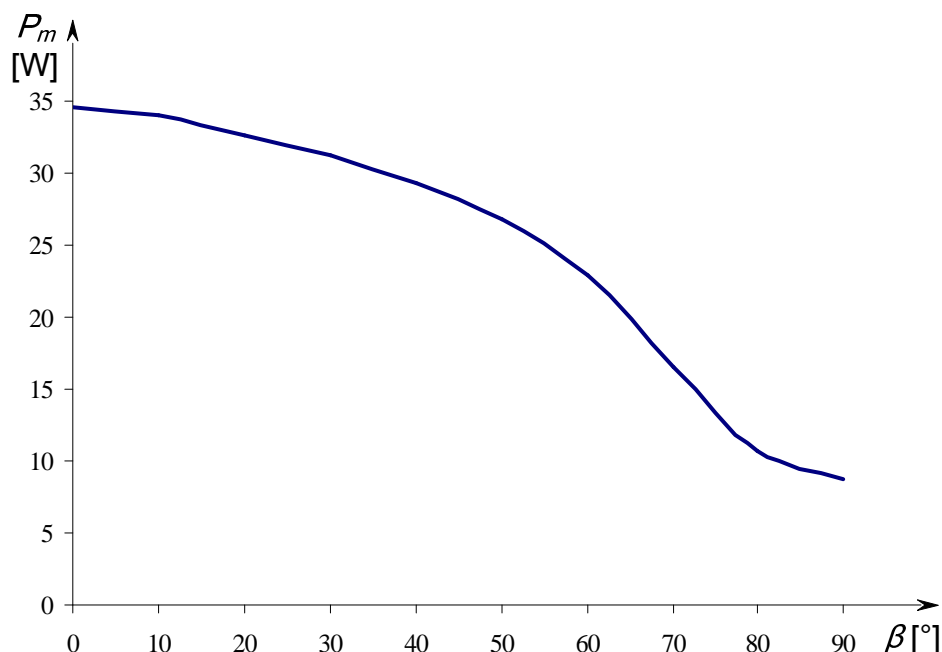


4.3 Potrjevanje 3. hipoteze

Moč FN modula je obratno sorazmerna s kotom odklona. Odvisnost med kotom odklona in vpadnim kotom je linearna.

Odvisnost maksimalnih moči od vpadnega kota smo prikazali v grafu 8. Primerjava spreminjanja električne moči FN modula z vpadnim kotom potrди obratno spreminjanje vrednosti vpadnega kota in vrednosti električne moči. Pri malem vpadnem kotu je električna moč največja in obratno. Karakteristika odvisnosti maksimalnih moči FN modula pri različnih vpadnih kotih pa ne kaže linearne odvisnosti (Graf 8).

Graf 8: Odvisnost maksimalne moči FN modula od vpadnega kota



Tretjo hipotezo lahko potrdimo samo delno. Moč FN modula je obratna z vpadnim kotom. Moč FN modula ni obratno sorazmerna oziroma linearno odvisna od vpadnega kota. Drugi del tretje hipoteze z rezultati meritve zavračamo. Po linearni hipotezi bi namreč moč FN modula pri vpadnem kotu 90° morala biti nič. Tega rezultati meritve ne potrjujejo.

4.3.1 Vpliv razpršenega sevanja

Meritev je pokazala, da je tudi pri vpadnem kotu 90° , ko padajo žarki direktnega sevanja vzporedno s površino, električna moč modula večja od nič. Razlog smo poiskali v svetlobi, ki ne vпада iz smeri sonca, temveč iz vseh možnih smeri. Temu sevanju pravimo difuzno ali razpršeno sevanje. Zaradi difuzne svetlobe generirajo FN moduli pri vpadnem kotu 90° moč večjo od nič. Celotno gostoto sevanja razdelimo na dva dela. Na direktno sevanje, ki prihaja iz smeri sonca, in na razpršeno sevanje, ki pada na površino FN modula iz vseh možnih smeri. Prav tako razdelimo električno moč FN modula na dva dela. Na električno moč, ki je sorazmerna z direktnim sevanjem, in na električno moč sorazmerno z difuznim sevanjem.

$$P = P_D + P_R \quad \dots \text{ (enačba 2)}$$

Kjer je P ... električna moč FN modula,

P_D ... električna moč zaradi direktnega sevanja in

P_R ... električna moč zaradi razpršenega (difuznega) sevanja.

Pri vpadnem kotu 90° , ko na površino FN modula ne pada direktno sevanje, je vsa električna moč posledica razpršenega sevanja. Če predpostavimo, da je gostota moči razpršene svetlobe v vseh smereh enaka, je tudi električna moč zaradi razpršenega sevanja pri vseh usmeritvah

FN modula enaka. Zato lahko maksimalno električno moč zaradi razpršenega sevanja P_{mR} izmerjeno pri vpadnem kotu 90° , odštejemo od maksimalnih moči izmerjenih pri različnih vpadnih kotih in dobimo za vsak kot odklona maksimalno moč, ki je posledica direktnega sevanja sonca P_{mD} .

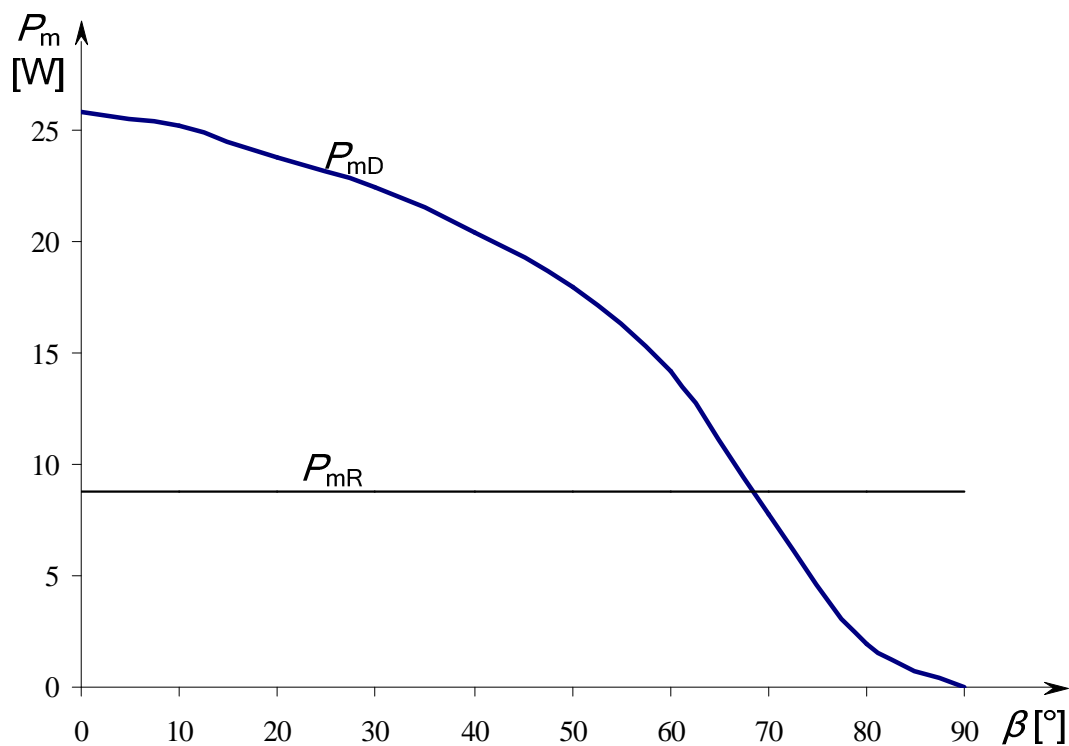
$$P_{mD} = P_m - P_{mR} \quad \dots \quad (\text{enačba 3})$$

Kjer je P_{mD} ... maksimalna električna moč zaradi direktnega sevanja pri vpadnem kotu β ,

P_m ... maksimalna izmerjena električna moč pri vpadnem kotu β in

P_{mR} ... maksimalna električna moč zaradi razpršenega sevanja izmerjena pri vpadnem kotu 90° .

Graf 9: Odvisnost direktne in razpršene moči FN modula od vpadnega kota

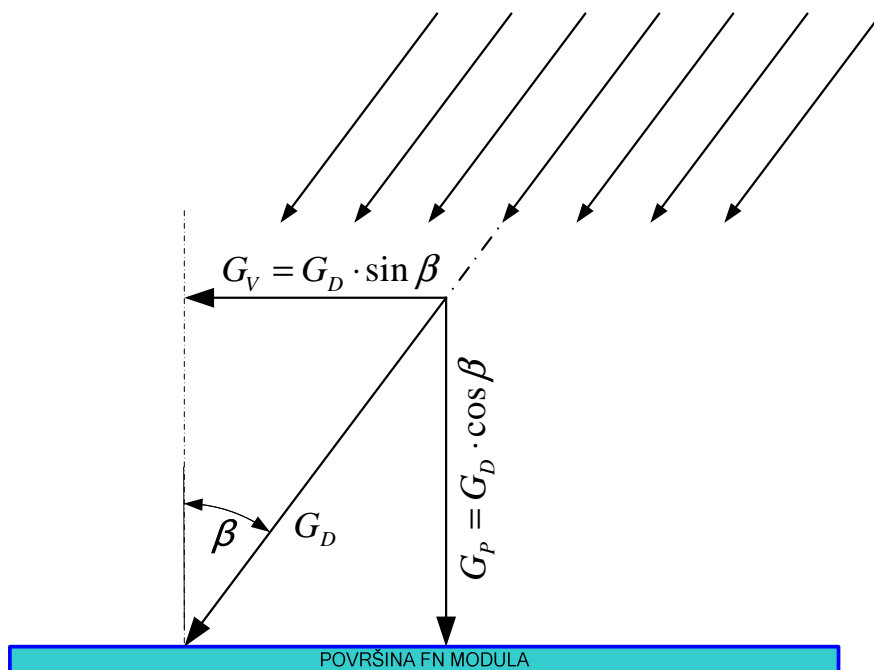


V grafu 9 sta prikazani odvisnosti električne moči direktnega in razpršenega sevanja od vpadnega kota. Ker želimo odgovoriti na vprašanje, kakšna je odvisnost električne moči direktnega sevanja od vpadnega kota, bomo odvisnost direktne moči podrobneje analizirali. Delež direktnega sevanja lahko razdelimo na dve komponenti. Prva je pravokotna na površino FN modula in povzroča direktni delež električne moči, druga komponenta je vzporedna s površino FN modula in ne povzroča električne moči.

$$G_D = G_P + G_V \quad \dots \text{ (enačba 3)}$$

Kjer je

- G_D ... direktni delež gostote moči sončnega sevanja,
- G_P ... pravokotna komponenta gostote moči direktnega sončnega sevanja in
- G_V ... vzporedna komponenta gostote moči direktnega sončnega sevanja.



Slika 12: Razdelitev direktnega sevanja na pravokotno in vzporedno komponento

Vzporedna komponenta direktnega sončnega sevanja G_V ne vpada na površino FN modula in ne generira električne moči. Pravokotna komponenta direktnega sončnega sevanja je sorazmerna s kosinusom vpadnega kota (enačba 4) in generira direktni delež električne moči P_{miD} . Če privzamemo, da je pravokotna komponenta direktnega sevanja sorazmerna z direktnim deležem električne moči, lahko ugotovimo sorazmernost direktne komponente električne moči s kosinusom vpadnega kota.

Iz enačbe

$$G_P = G_D \cdot \cos \beta \text{ sledi } \dots \text{ (enačba 4)}$$

$$P_{miD} = P_{m0} \cdot \cos \beta \quad \dots \text{ (enačba 5)}$$

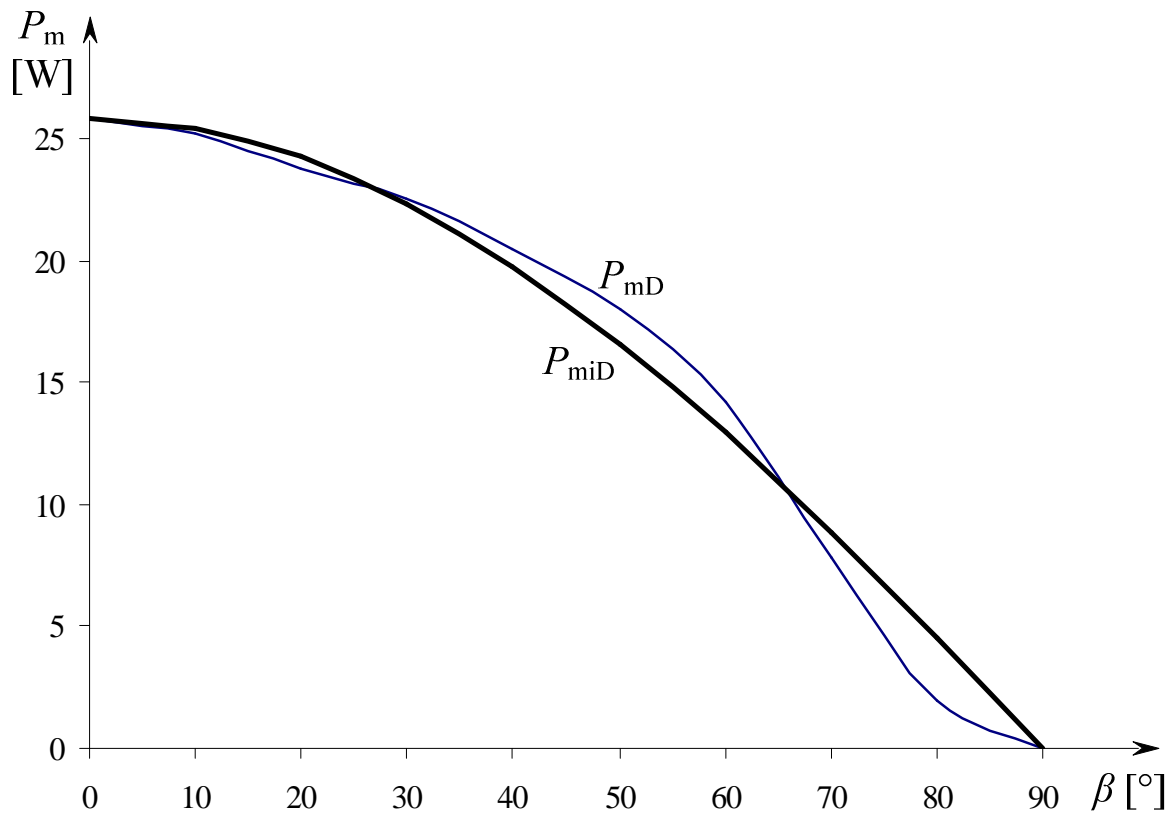
Kjer je

P_{miD} izračunana električna moč zaradi direktnega sevanja pri vpadnem kotu β in

P_{m0} maksimalna električna moč zaradi direktnega sevanja pri vpadnem kotu 0° .

Primerjava izračunane električne moči zaradi direktnega sevanja in izmerjene električne moči zaradi direktnega sevanja je prikazana v Grafu 10.

Graf 10: Primerjava odvisnosti moči zaradi direktnega sevanja



Karakteristiko izračunane električne moči FN modula zaradi direktnega sevanja smo izračunali iz kosinusa vpadnega kota in maksimalne moči pri vpadnem kotu 0° . Karakteristika izmerjene električne moči FN modula zaradi direktnega sevanja predstavlja izmerjene maksimalne moči, zmanjšane za delež difuznega sevanja.

Iz Grafa 10 je razvidno zelo dobro ujemanje obeh karakteristik maksimalnih električnih moči zaradi direktnega sevanja. Na podlagi rezultata izkazanega v Grafu 10 lahko dokončno ovržemo drugi del tretje hipoteze. Odvisnost med vpadnim kotom in električno močjo ni linearna. Hkrati lahko postavimo novo trditev o odvisnosti električne moči od vpadnega kota. Če zanemarimo razpršeno sevanje, je električna moč FN modula sorazmerna s pravokotno komponento direktnega sončnega sevanja.

5 RAZPRAVA

Uporabljena merilna metoda z uporabo DAQ vmesnika se je pri potrebi po čim hitrejšem opravljanju množice meritev izkazala za zelo dobro. Posledica hitrega izvajanja meritev so zanesljivi in relativno dobro ponovljivi rezultati v primeru enakih vplivnih veličin.

Vplivne veličine in slaba kontrola pogojev meritve so pri potrjevanju prve hipoteze pustili odprta vprašanja. Sprememba električne moči modula med smerjo vpada 0° in 90° je res manj kot 5 %, vendar je linearnost padanja moči pustila sence dvoma. Odvisnost električne moči FN modula od smeri vpada je potrebno bolje raziskati. Predvsem je potrebno narediti meritve za smeri modula med 0° in 360° in pri različnih vpadnih kotih. V naši raziskavi smo odvisnost izmerili pri samo enem vpadnem kotu 45° in pri smereh odklona med 0° in 90° .

Uporabnost potrjene 1. hipoteze je v prosti izbiri postavitve FN modulov na ravne površine. Kljub temu morajo biti FN moduli orientirani na jug pod naklonom 32° , vendar jih lahko pri montaži postavimo pokončno, ležeče ali celo diagonalno na ravno površino (streha). Potrditev 1. hipoteze dopušča zelo različne oblikovne možnosti montaže FN modulov. Pri vseh različnih montažnih oblikah je izkoristek enak.

Potrditev druge hipoteze je osrednji del naše raziskave. Vendar so nekatera spoznanja, do katerih smo prišli ob potrjevanju hipoteze, bolj pomembna.

Vpliv razpršene svetlobe je pri delovanju FN modulov zelo pomemben. Z večanjem deleža razpršene svetlobe se manjša gostota moči sončnega sevanja in proizvedena električna moč FN modula. Prav tako je z večanjem deleža razpršene svetlobe odvisnost moči od vpadnega kota sončnega sevanja vedno manjša. Spoznanji lahko strnemo v ugotovitev, da se natančno sledenje smeri direktnega sončnega sevanja izplača v jasnih dneh s čisto atmosfero in majhnim deležem razpršenega sevanja. Za povečanje izkoristka fotonapetostne pretvorbe je pomembno sledenje soncu predvsem v dneh s čisto atmosfero. Z večanjem deleža razpršene svetlobe se natančno sledenje smeri direktne svetlobe vedno manj izplača. Najbolj natančno sledenje je potrebno v primeru čiste atmosfere. Kolikšna kotna natančnostjo je zahtevana pri sledenju smeri sončnega sevanja? Odgovor nam dajejo rezultati meritev v preglednici 4, kjer vidimo da je pri vpadnem kotu 10° zmanjšanje električne moči FN modula približno 1 %. Ker naredi sonce pri dnevnem gibanju po nebu približno 15 kotnih stopinj v eni uri, je napotek enostaven. Pri sledenju FN modula smeri sončnega sevanja bo izguba energije manjša od 1 %, če bo korekcija smeri FN modula narejena vsake pol ure.

Isto ugotovitev lahko uporabimo tudi drugače. V primeru, ko popravljamo smer FN modula s senzorjem, je potrebna minimalna natančnost senzorja $\pm 10^\circ$, če poteka korekcija smeri v realnem času. Zdi se, da je takšna ugotovitev še bolj uporabna. Če imamo sledilni sistem, naj deluje neprestano, senzor za določanje smeri sonca pa lahko ima kotni pogrešek $\pm 10^\circ$.

Graf 5 kaže na tesno korelacijo moči FN modula s kratkostičnim tokom in na zanemarljivo odvisnost napetosti prostega teka od moči FN modula. Napetost prostega teka ni merilo električne moči FN modula, ker je sprememba napetosti prostega teka zanemarljivo majhna pri spremembi odklona FN modula. Kratkostični tok približno sledi električni moči FN modula, vendar bi bilo potrebno to odvisnost natančneje raziskati.

Tretje hipoteze nismo potrdili v celoti, temveč samo njen prvi del. Graf 10 prikazuje zelo dobro ujemanje izračunane direktne električne moči FN modula in izmerjene direktne električne moči FN modula pri različnih vpadnih kotih. V grafu 10 sta obe moči zmanjšani za delež difuznega sevanja. Manjše odstopanje med primerjanima močema je pri kotu odklona 50° , ko je izmerjena direktna moč večja in pri odklonu 80° , ko je večja izračunana moč. Odstopanja lahko pojasnimo na več načinov.

Vpliv meritve je možen v primeru nenadne spremembe vplivnih veličin, kot je gostota sončnega sevanja, ki je odvisna predvsem od stabilnosti atmosfere.

Sprememba moči difuznega sevanja pri različnih usmeritvah FN modula.

Spremembo vpadnega kota smo dosegli tako, da smo spreminjali smer FN modula. Pri izračunu moči zaradi direktnega sevanja smo odšteli vedno vrednost difuznega sevanja izmerjeno pri 90° vpadnega kota. Pri tem smo predpostavili, da je razpršeno sevanje v vseh smereh enako. Če je bila gostota moči difuznega sevanja različna po smereh, je pri določeni usmeritvi FN modul generiral več ali manj električne moči zaradi difuznega sevanja, kar je možen izvor merilnega pogoška. Mi smo izvajali meritve ob južni fasadi stavbe MIC2, ki je svetle barve in je možen izvor odbite svetlobe, ki je usmerjena in nima lastnosti razpršenega sevanja.

Pri izvajanju meritev za raziskavo nas je razpršeno in odbito sevanje presenetilo. Izkazalo se je za bolj problematično kot kontrola merilnih pogojev, ki nam je s hitrostjo izvajanja meritev dobro uspela. Kljub navedenim slabostim kažejo rezultati meritev in analiza rezultatov zelo dobro ujemanje s teoretičnimi spoznanji.

Pri nadaljnjih meritvah je potrebno poiskati merilno mesto brez bližnjih objektov, ki bi lahko pomenili izvor odbite svetlobe. Potrebno bi bilo raziskati vpliv razpršenega sevanja na električno moč FN modula pri različnih deležih razpršenega sevanja. Možna so tudi izboljšanja merilne metode. Zaradi soupora smo kratek stik FN modula merili pri upornosti 1Ω , kar ni čisti kratek stik. Z uporabo DC tokovnih klešč bi to izboljšali. Metodo merjenja vpadnega kota je potrebno izboljšati predvsem pri velikih vpadnih kotih vendar so vsa izboljšanja predmet naslednjih raziskav.

6 ZAKLJUČEK

Smer vpada sončnega sevanja ne vpliva na moč FN modula. Vpadni kot sončnega sevanja močno vpliva na moč FN modulov v primeru jasnih dni, ko je delež razpršenega sevanja majhen. Z večanjem deleža razpršene svetlobe se odvisnost moči od vpadnega kota manjša. V oblačnem vremenu, ko je vsa svetloba razpršena, je moč FN modula neodvisna od vpadnega kota. Takrat je usmeritev FN modula nepomembna. Pri pretežno direktnem sevanju je moč sorazmerna s kosinusom vpadnega kota sončnega sevanja.

Pravi učinek sledenja je možno izmeriti samo z meritvijo proizvodnje energije dveh FN sistemov. Prvega fiksnega in drugega sledilnega. Potrebovali bi dve enaki FN elektrarni z enakimi FN moduli in enakim razsmernikom. Primerjali bi proizvodnjo električne energije v različnih časovnih obdobjih: dnevno, tedensko, mesečno in letno. Odpadli bi vplivi odklona, spreminjanja atmosfere, višine sonca, sezone na primerjavo, saj bi bili vplivi na oba sistema modulov (fiksnega in sledilnega) enaki.

7 POVZETEK

Energetska kriza narekuje za vse večjo potrebo po proizvodnji čiste energije iz obnovljivih energetskih virov. Fotonapetostni sistemi so med novimi oziroma alternativnimi viri tisti, ki veliko obetajo. Njihova največja slabost so majhni izkoristki pretvorbe sončnega sevanja v električno energijo. Izkoristki, podani s strani proizvajalcev fotonapetostnih modulov, so laboratorijsko izmerjeni pri standardnih testnih pogojih. Pri teh pogojih moduli dosežejo mnogo večje izkoristke, katere podajo kot nazivne podatke, ki so dejanski pri realnem obratovanju FN modula.

V sončnih dneh s čisto atmosfero je smiselna korekcija smeri FN modula vsaj enkrat na uro. V eni uri se smer direktnega sončnega sevanja spremeni za približno 15° . Z raziskavo smo ugotovili, da je pri 15° odklona od pravokotnega vpada zmanjšanje električne moči FN modula manj kot 5 %, kar je sprejemljivo.

Na izkoristek FN sistema vpliva več faktorjev. Med bolj pomembnimi je kot, pod katerim vpada sončno sevanje na površino FN modula. Najboljši izkoristek imajo FN moduli pri pravokotnem vpadu sončnega sevanja. Z večanjem vpadnega kota se izkoristek FN modula slabša. Raziskava je razkrila odvisnost moči FN modula od vpadnega kota. Ugotovili smo, da je električna moč FN modula sorazmerna s pravokotno komponento gostote sončnega sevanja samo v primeru čistega direktnega sevanja. Pri realnih pogojih pa je vedno prisotno razpršeno ali difuzno sevanje, ki generira od smeri vpada neodvisno komponento električne moči. Difuzno sevanje zmanjša odvisnost moči FN modula od vpadnega kota tako, da pri velikih deležih razpršenega sevanja električna moč ni več odvisna od lege FN modula.

S sledilnim sistemom lahko dosežemo stalen ali občasen pravokotni vpad sevanja na površino FN modula. Iz rezultatov raziskave lahko sklepamo o bistvenem povečanju izkoristka sledilnih FN modulov v sončnih dneh z zelo čisto atmosfero, ko je delež difuznega sevanja majhen. Nasprotno je izboljšanje izkoristka pretvorbe zaradi sledenja zelo majhno v oblačnih ali poloblačnih dneh, ko je delež difuznega sevanja velik.

8 ZAHVALA

Zahvaljujemo se mentorju gospodu Matjažu Žeraku za trud in podporo pri izdelovanju ter pisanju raziskovalne naloge. Zahvaljujemo se tudi gospe Bojani Urbanc za angleški prevod izvlečka, gospe Sonji Lubej za lektoriranje dokumentacije ter vsem strojnikom, ki so pripomogli k enostavni tehnični postavitvi modulov. Hvala Stričku Googlu in Teti Wikipediji za hitre in zanimive informacije o izdelku ter zgodovini. Hvala tudi razrednikoma gospodu Kaisersbergerju in gospodu Mlinareviču za mnoge opravičene izostanke od pouka ter Elektro in računalniški šoli za velik zalogaj na instrumentih in merilnih postopkih, preko katerih nam je bil omogočen lažji način dela in vsem, ki so pripomogli k nastanku te naloge.

9 PRILOGE

Priloga 1

Primer izmerjenih in izračunanih vrednosti za usmerjenost FN modula pod vpadnim kotom 0°

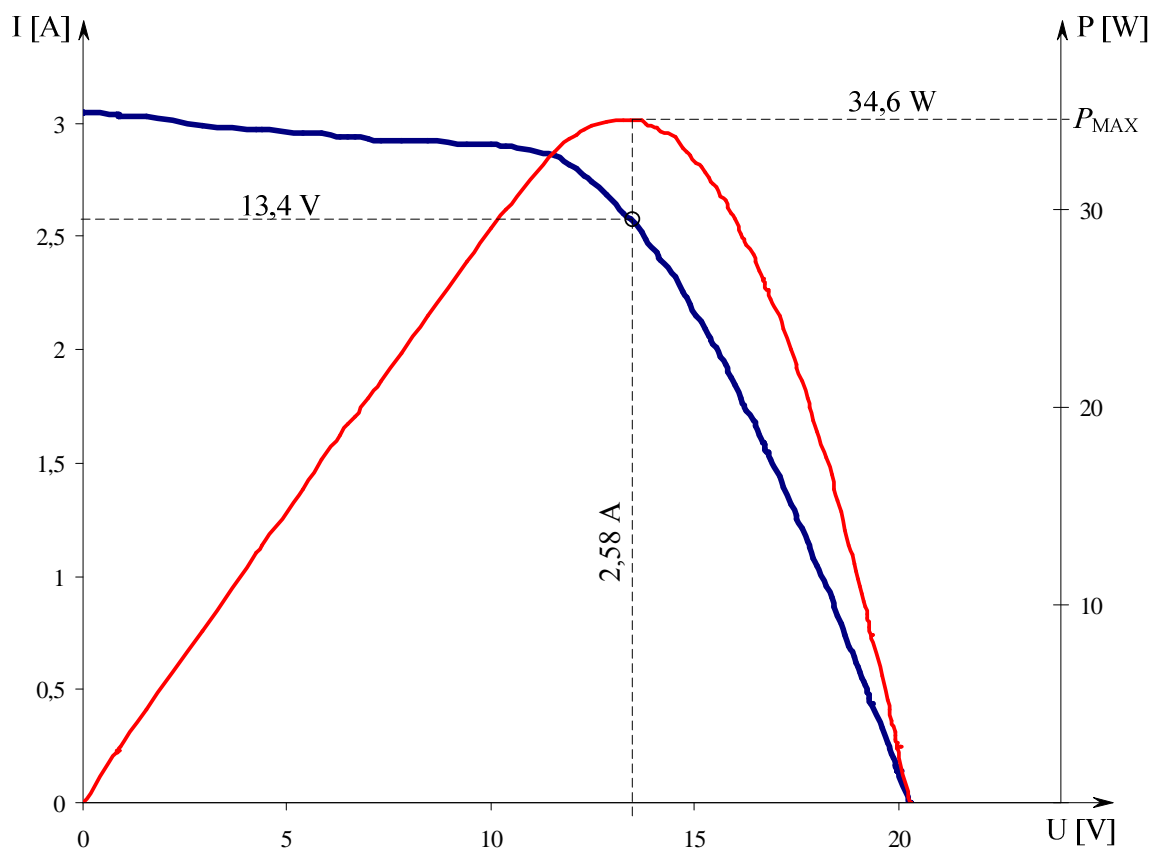
Datum: 8. 12. 2008

Ura 12.11

Temperatura okoliškega zraka 5°C

Število meritev: 140

a) Grafični prikaz karakteristike prostega teka in odvisnosti moči od toka z označeno točko maksimalne moči



b) Tabela izmerjenih in izračunanih vrednosti. Meritev pri obremenitvi z maksimalno močjo FN modula je označena.

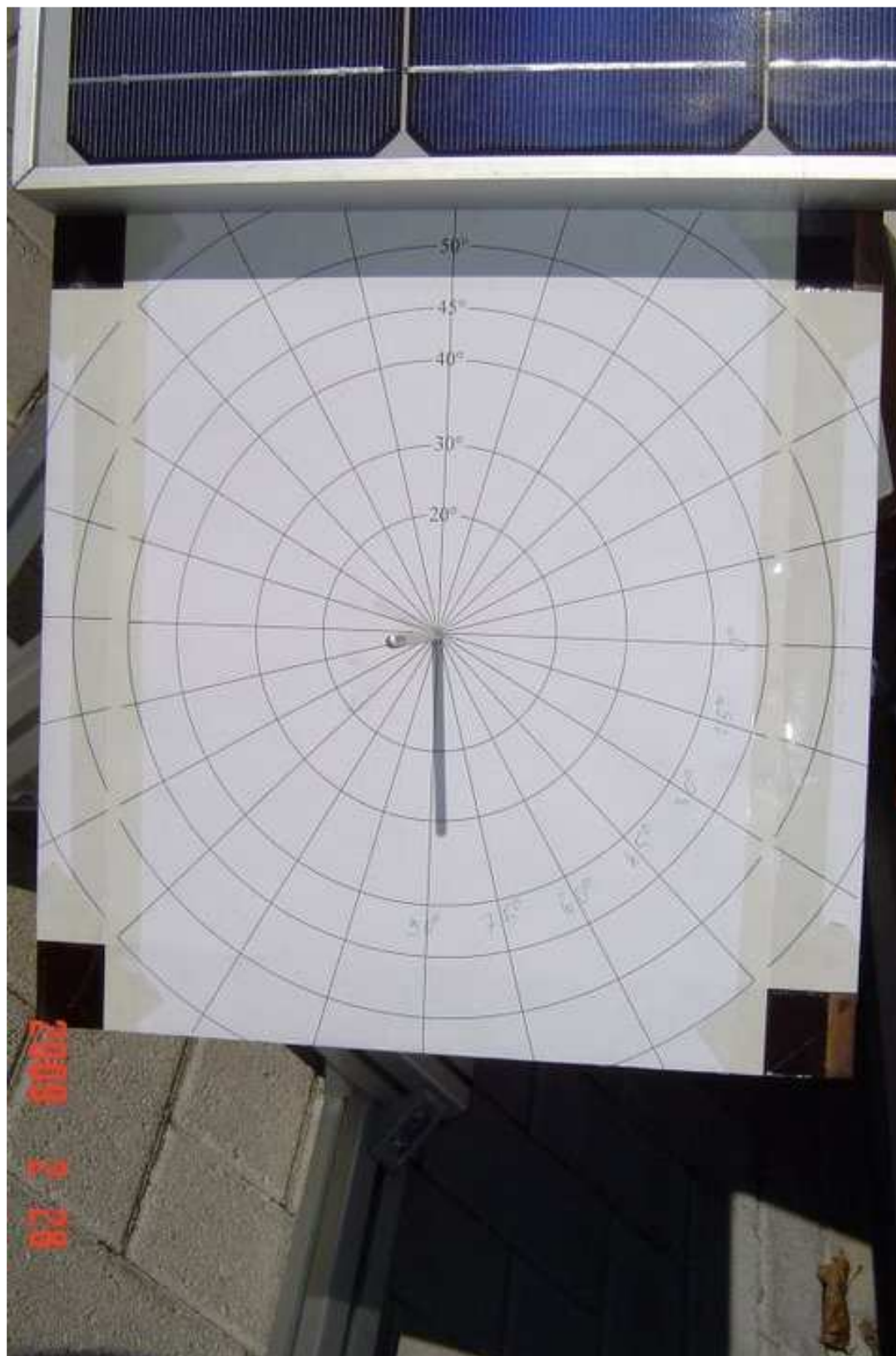
t (s)	U (V)	I (A)	P (W)
0,00	20,29	0,00	0,03
0,20	20,29	0,00	0,03
0,40	20,29	0,00	0,03
0,60	20,29	0,00	0,03
0,80	20,29	0,00	0,03
1,00	20,29	0,00	0,03
1,20	20,00	0,14	2,82
1,40	20,00	0,14	2,82
1,60	20,00	0,14	2,82
1,80	20,00	0,14	2,72
2,00	20,00	0,14	2,82
2,20	20,05	0,14	2,83
2,40	20,05	0,14	2,83
2,60	20,00	0,14	2,82
2,80	20,00	0,14	2,82
3,00	20,00	0,15	2,93
3,20	20,00	0,15	3,04
3,40	20,00	0,15	3,04
3,60	19,95	0,16	3,25
3,80	19,95	0,17	3,35
4,00	19,95	0,18	3,57
4,20	19,90	0,19	3,88
4,40	19,85	0,21	4,19
4,60	19,80	0,24	4,71
4,80	19,75	0,26	5,23
5,00	19,60	0,33	6,46
5,20	19,35	0,44	8,46
5,40	19,35	0,44	8,46
5,60	19,35	0,44	8,46
5,80	19,40	0,44	8,48
6,00	19,35	0,44	8,46
6,20	19,31	0,46	8,85
6,40	19,31	0,47	9,16
6,60	19,26	0,49	9,34
6,80	19,26	0,50	9,55
7,00	19,21	0,52	9,94
7,20	19,16	0,53	10,22
7,40	19,11	0,56	10,61
7,60	19,06	0,58	10,99
7,80	19,01	0,60	11,37
8,00	18,96	0,62	11,75
8,20	18,91	0,64	12,12
8,40	18,86	0,67	12,60
8,60	18,81	0,69	13,07
8,80	18,71	0,74	13,81
9,00	18,61	0,79	14,74
9,20	18,52	0,82	15,26

t (s)	U (V)	I (A)	P (W)
9,40	18,42	0,86	15,87
9,60	18,37	0,90	16,61
9,80	18,22	0,96	17,46
10,00	18,02	1,04	18,82
10,20	17,92	1,08	19,39
10,40	17,82	1,12	20,05
10,60	17,77	1,15	20,47
10,80	17,63	1,21	21,35
11,00	17,53	1,25	21,98
11,20	17,53	1,26	22,17
11,40	17,38	1,32	22,91
11,60	17,18	1,39	23,95
11,80	17,08	1,44	24,64
12,00	16,89	1,51	25,53
12,20	16,84	1,54	25,91
12,40	16,84	1,54	26,00
12,60	16,79	1,54	25,92
12,80	16,74	1,57	26,21
13,00	16,74	1,58	26,39
13,20	16,69	1,59	26,49
13,40	16,69	1,59	26,49
13,60	16,69	1,59	26,49
13,80	16,69	1,59	26,49
14,00	16,59	1,62	26,96
14,20	16,49	1,66	27,42
14,40	16,44	1,69	27,78
14,60	16,29	1,73	28,23
14,80	16,24	1,75	28,49
15,00	16,19	1,76	28,58
15,20	16,14	1,79	28,84
15,40	16,00	1,85	29,52
15,60	15,90	1,88	29,85
15,80	15,80	1,90	30,09
16,00	15,75	1,94	30,50
16,20	15,65	1,96	30,73
16,40	15,55	2,01	31,21
16,60	15,45	2,03	31,34
16,80	15,40	2,04	31,41
17,00	15,35	2,06	31,63
17,20	15,26	2,09	31,92
17,40	15,16	2,12	32,21
17,60	15,06	2,15	32,40
17,80	14,91	2,20	32,80
18,00	14,81	2,23	32,98
18,20	14,71	2,25	33,16
18,40	14,51	2,32	33,73
18,60	14,17	2,40	33,99

t (s)	U (V)	I (A)	P (W)
18,80	14,12	2,42	34,10
19,00	14,07	2,43	34,21
19,20	13,82	2,49	34,35
19,40	13,72	2,52	34,55
19,60	13,43	2,58	34,60
19,80	13,28	2,60	34,57
20,00	12,83	2,68	34,45
20,20	12,49	2,74	34,26
20,40	12,29	2,77	34,05
20,60	12,09	2,80	33,83
20,80	11,95	2,81	33,60
21,00	11,55	2,86	32,99
21,20	10,37	2,90	30,05
21,40	10,02	2,90	29,10
21,60	9,43	2,91	27,43
21,80	8,44	2,92	24,65
22,00	7,80	2,92	22,77
22,20	7,30	2,93	21,37
22,40	7,01	2,93	20,54
22,60	6,66	2,94	19,56
22,80	6,51	2,94	19,16
23,00	6,32	2,94	18,58
23,20	5,87	2,95	17,33
23,40	5,38	2,95	15,88
23,60	4,39	2,97	13,03
23,80	4,24	2,97	12,61
24,00	2,91	2,99	8,69
24,20	1,57	3,03	4,77
24,40	0,93	3,03	2,83
24,60	0,88	3,04	2,68
24,80	0,88	3,04	2,68
25,00	0,88	3,03	2,68
25,20	0,88	3,03	2,68
25,40	0,88	3,03	2,68
25,60	0,83	3,04	2,53
25,80	0,83	3,04	2,53
26,00	0,83	3,04	2,53
26,20	-0,01	3,04	-0,02
26,40	-0,01	3,04	-0,02
26,60	-0,01	3,05	-0,02
26,80	-0,01	3,05	-0,02
27,00	-0,01	3,04	-0,02
27,20	-0,01	3,04	-0,02
27,40	-0,01	3,04	-0,02
27,60	-0,01	3,04	-0,02
27,80	-0,01	3,05	-0,02

Priloga 2

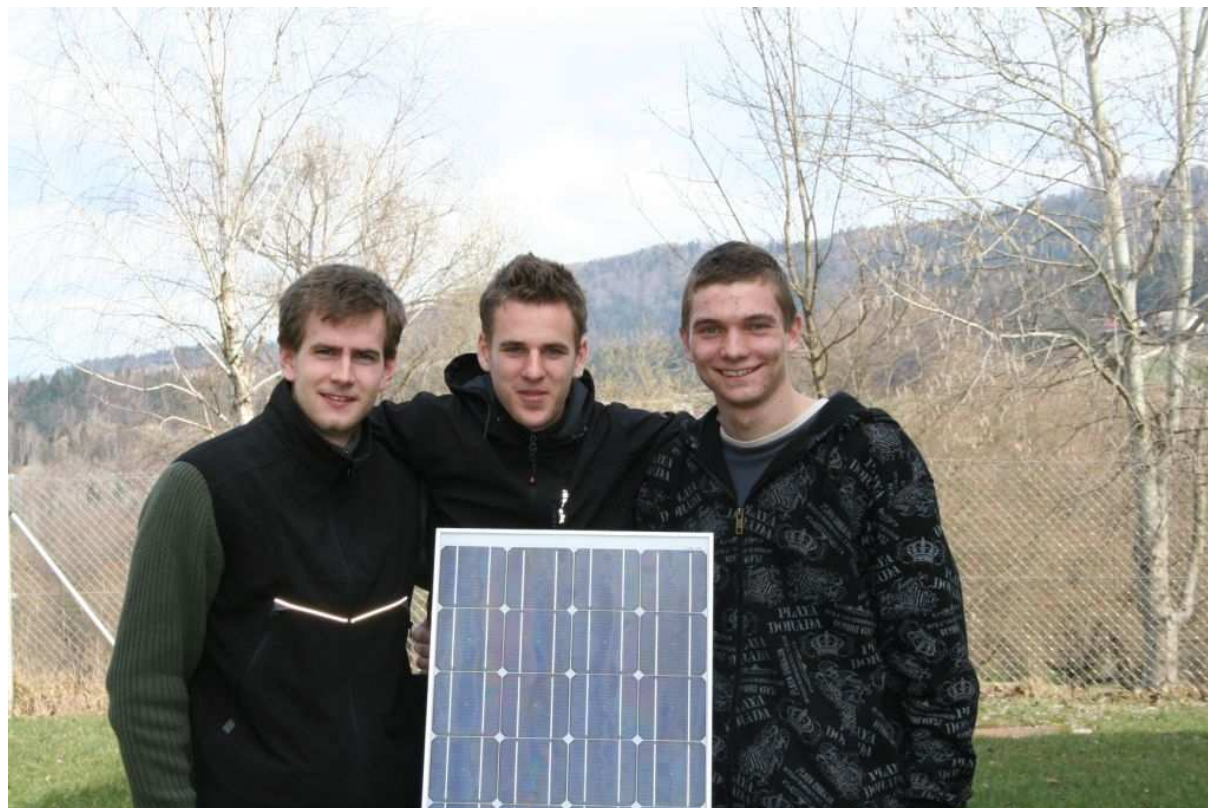
Fotografija naprave za merjenje vpadnega kota in kota smeri vpada sončnega sevanja.



Priloga 3
Fotografija postavitve merilne opreme in FN modula



Priloga 4
Fotografija raziskovalnega tima



10 VIRI IN LITERATURA

1. PAVŠEK, Z. / PETKOVŠEK, S. A. S. / POKORNY, B. / RIBARIČ LASNIK, C. / STEBLOVNIK, K. / ŠALEJ, M. / ŠTRBENK, E. / VRBIČ KUGONIČ, N. 2008. Osnove znanstveno raziskovalnega dela, 5. dopolnjena izdaja, Inštitut za ekološke raziskave ERICo Velenje d. o. o.
2. http://lpvo.fe.uni-lj.si/El_iz_sonca/el_iz_sonca.htm, 20. 3. 2009.
3. <http://www.pvresources.com/si/tehnologije.php>, 20. 3. 2009.
4. http://lpvo.fe.uni-lj.si/El_iz_sonca/el_iz_sonca.htm, 20. 3. 2009.
5. http://lpvo.fe.uni-lj.si/El_iz_sonca/el_iz_sonca.htm, 20. 3. 2009.
6. http://evrokorpus.gov.si/svez_slovar4.php?beseda=veli%C4%8Dina&drugi=E&jezik=angl, 20. 3. 2009.