

Demonstracija koncepta proizvodnje el. energije iz fotonaponskih ćelija s pomoću didaktičke opreme

Hmelina, Alen

Master's thesis / Diplomski rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:367093>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-22**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

Sveučilišni studij

**Demonstracija koncepta proizvodnje el. energije iz
fotonaponskih ćelija s pomoću didaktičke opreme**

Diplomski rad

Alen Hmelina

Osijek, 2018.

SADRŽAJ

1. UVOD	3
2. FOTONAPONSKE ČELIJE I MODULI	4
2.1. Povijest sunčevih ćelija	4
2.2. Načelo rada sunčevih ćelija	4
2.3. Fotonaponski efekt	6
2.4. Vrste fotonaponskih sustava	7
2.4.1. Samostalni FN sustavi	8
2.4.2. FN sustavi priključeni na javnu elektroenergetsku mrežu	9
3. DIDAKTIČKA OPREMA	11
3.1. Fotonaponska ploča	11
3.2. Predloženi pokusi	12
3.2.1. Strujne karakteristike FN- ćelija s obzirom na položaj u odnosu na izvor svjetlosti	12
3.2.2. Analiza osjetljivosti napona praznog hoda o temperaturi	16
3.2.3. Pokus korisnosti i faktor ispunje	21
3.2.4. Opterećenje FN modula s različitim trošilima	23
4. IZVOĐENJE POKUSA I MJERENJA	25
4.1. Proizvodnja električne energije u ovisnosti o utjecajnim parametrima	25
4.2. Međusobno spajanja modula- serijski spoj	28
4.3. Međusobno spajanja modula – paralelni spoj	31
5. ZAKLJUČAK	34
LITERATURA	35
SAŽETAK	37
ABSTRACT	38
ŽIVOTOPIS	39

1. UVOD

Proizvodnja električne energije iz FN sustava kao obnovljivih izvora (OIE) energije u stalnom je porastu [1-2]. Najveći uzrok sve veće proizvodnje električne energije iz OIE je globalna energetska kriza te klimatske promjene s kojima se konvencionalni izvori na fosilna goriva sve teže nose [3-5]. Kao rezultat ovoga trenda, sve je veća svjesnost i interes među studentima tehničkih struka za učenjem o OIE, poglavito o FN sustavima. Osim teorijskog poznavanja pretvorbe energije Sunca u električnu energiju preko FN sustava, za kvalitetniju izobrazbu budućih inženjera, nužan je i praktični dio koji sadrži snimanje stvarnih $u-i$ karakteristika, načini međusobnog spajanja FN modula u nizove itd. Međutim, laboratoriji za praktično učenje o FN sustavima relativno su skupi i nepraktični primarno zbog dimenzija panela i prateće opreme, kao i kompleksnosti korištenja ovakvih sustava zbog ovisnosti o vanjskim vremenskim utjecajima. Kao alternativa, nameću se skalirani prijenosni didaktički sustavi za praktično učenje [6-7].

U radu će pomoću didaktičkog sustava za učenje biti prikazane $u-i$ karakteristike s obzirom na različite utjecajne parametre: osvjetljenost i kut upada Sunčevih zraka. Na osnovu provedenih pokusa, te provedenih analiza osjetljivosti mogu se razumjeti načini konfiguriranja nizova kao i razlozi izbora mjesta za postavljanje kao i nagiba pod kojim se postavljaju FN moduli. Također, dobivene su jasne spoznaje o različitim vrstama FN sustava koji nisu fiksno postavljeni već mijenjaju svoj položaj s obzirom na kretanje Sunca, tzv. suncokreti [8].

Kroz predložene pokuse biti će prikazane strujne karakteristike, napon praznog hoda zatim pokusi korisnosti te faktora ispunje kroz koje će biti prikazano u kojoj mjeri skalirani sustav prati komercijalne fotonaponske sustave te opterećenje FN modula s različitim trošilima. Također zbog boljeg shvaćanja te učenja o fotonaponu prikazani su pokusi kao proizvodnja električne energije koja ovisi o parametrima te međusobno spajanje modula u seriju te paralelu.

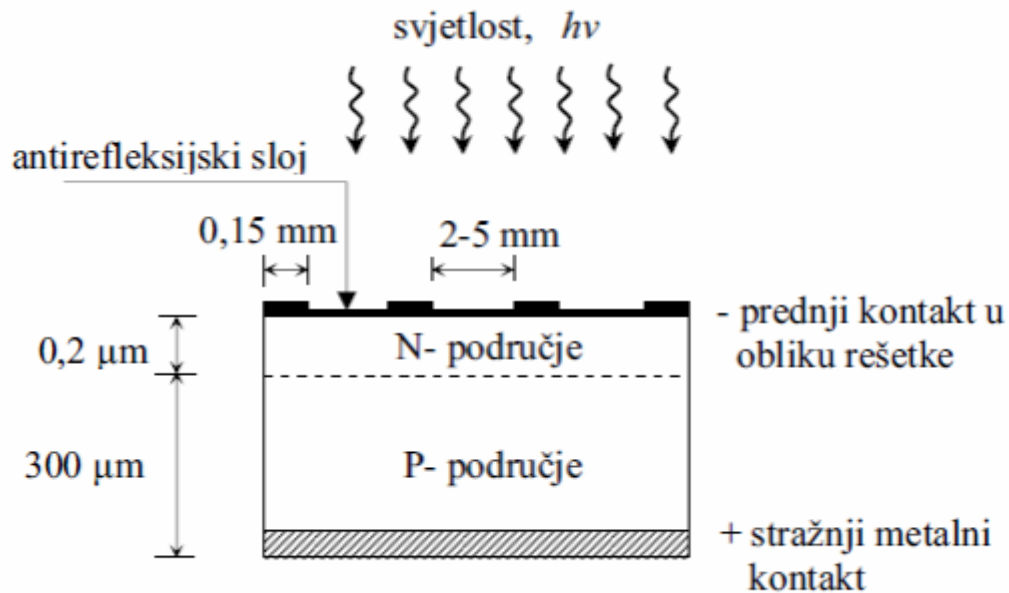
2. FOTONAPONSKE ČELIJE I MODULI

2.1. Povijest sunčevih ćelija

Fizikalnu pojavu u kojoj se energija svjetlosti pretvara u električnu energiju – fotonaponski efekt, 1839. godine otkrio je francuski fizičar Alexandre Edmond Becquerel. Otkriveno je slučajno, eksperimentirajući sa elektrolitom i metalnim elektrodama zapazio je porast vodljivosti elektrolita s porastom osvijetljenosti. Willoughby Smith 1873. godine otkrio je fotonaponski efekt u seleniju, dok je William G. Adams 1876. godine otkrio odvijanje fotonaponskog efekta na spoju platine i selenija. 1877. godine ta dva otkrića bila su temelj za izradu prve sunčane ćelije na bazi selenija. Albert Einstein je 1904 [4]. godine teoretski je opisao fotonaponski efekt te je 1921. godine dobio Nobelovu nagradu. Robert Millikan eksperimentalno je potvrdio 1916. godine Einsteinovu teoriju. Poljski znanstvenik Jan Czochralski 1918. godine otkrio je metodu dobivanja monokristaličnog silicija što je omogućilo proizvodnju monokristaličnih silicijskih sunčanih ćelija [1]. Calvin Fuller, Gerald Pearson i Daryl Chapin u Bell Telephone Laboratories razvili su silicijsku ćeliju učinkovitosti 4% 1954. godine. Kasnijim razvojem su razvijene nove tehnologije i materijali te se povećala se učinkovitost ćelija[1-4].

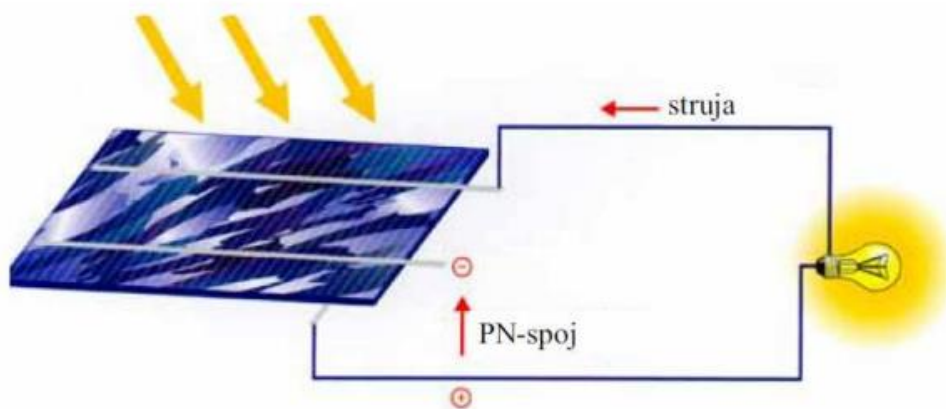
2.2. Načelo rada sunčevih ćelija

U silicijevoj su solarnoj ćeliji, prikazanoj na slici 2.1., na površini pločice *P*-tipa silicija difundirane primjese (npr. fosfor), tako da na tankom površinskom sloju nastane područje *N*-tipa poluvodiča. Da bi se skupili naboji nastali apsorpcijom fotona iz sunčeva zračenja, na prednjoj površini ćelije nalazi se metalna rešetka koja ne pokriva više od 5% površine, tako da gotovo ne utječe na apsorpciju sunčeva zračenja. Stražnja strana ćelije prekrivena je metalnim kontaktom[2]. Prednja površina ćelije može biti prekrivena prozirnim proturefleksnim slojem, koji smanjuje refleksiju sunčeve svjetlosti, da bi se povećala djelotvornost ćelije[2-4]. U slučaju osvjetljenja solarne ćelije, pojavljuje elektromotorna sila, tj. napon na njezinim se krajevima. U tom slučaju poluvodička dioda, tj. *PN-spoj* postaje solarna ćelija, te se ponaša kao ispravljački uređaj koji propušta struju samo u jednom smjeru[1-2].



Sl 2.1. Silicijska solarna ćelija. Izvor: [2]

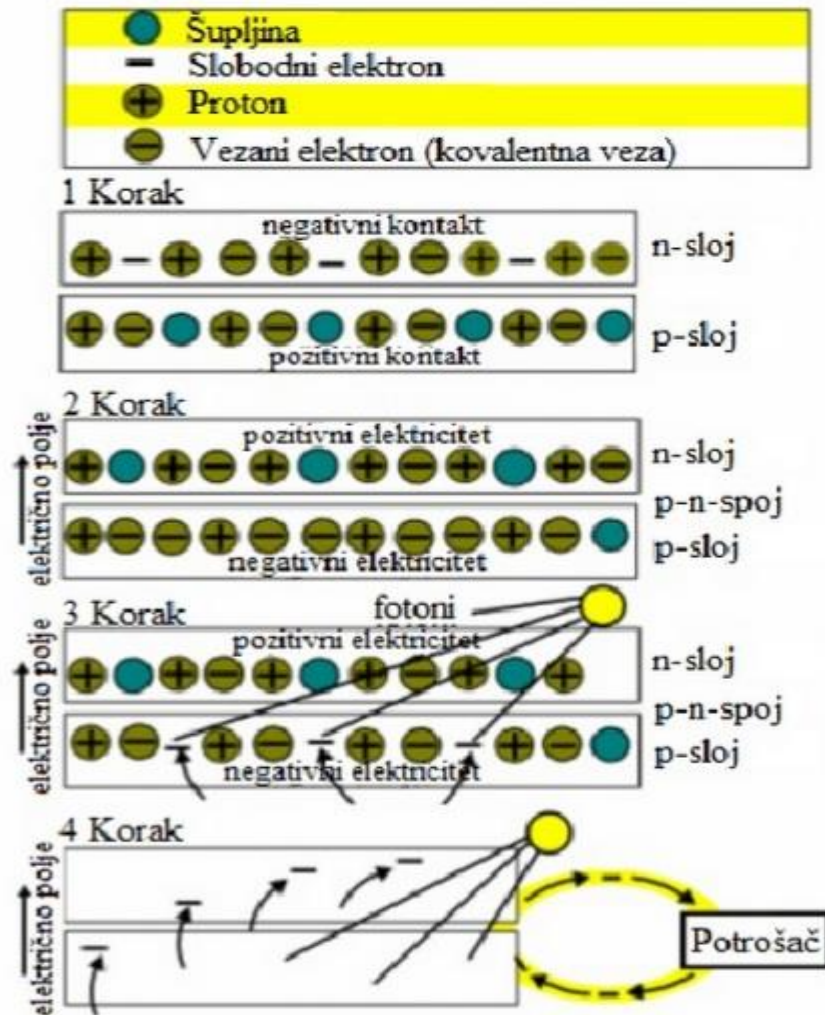
Kada se *PN*-spoj, odnosno solarna ćelija osvjetli, apsorbirani fotoni proizvode parove elektron-šupljina. Ako apsorpcija nastane daleko od *PN*-spoja, nastali par ubrzo se rekombinira. Međutim, nastane li apsorpcija blizu, ili unutra *PN*-spoja, unutrašnje električno polje, koje postoji u osiromašenom području, odvaja nastali šupljinu i elektron. Šupljina se giba prema *P*-strani, a elektron se prema *N*-strani [1-2]. Zbog skupljanja šupljina i elektrona na odgovarajućim suprotnim stranama *PN*-spoja dolazi do pojave *E* elektromotorne sile na krajevima solarne ćelije. Kada se osvjetli solarna ćelija, kontakt na *N*-dijelu postaje negativan, a na *P*-dijelu postaje pozitivan. Ako su s vanjskim trošilom spojeni kontakti ćelije, kao što je prikazano na slici 2.3., proteći će električna struja, a izvorom električne energije postaje solarna ćelija [2].



Sl 2.2. Solarna ćelija kao izvor el. en. Izvor: [2]

2.3. Fotonaponski efekt

Fotonaponski efekt je pojava koja za posljedicu ima oslobađanje slobodnih nosioca naboja pod djelovanjem svjetlosti te stvara električni tok [3].



Sl 2.3. Fotonaponski efekt. Izvor: [3]

Na slici 2.3. je prikazan fotonaponski efekt koji je objašnjen u četiri koraka. U prvom koraku prikazan je izgled fotonaponske ćelije prije nego li se spoje p -tip i n -tip poluvodića. Kada se spoje p -tip i n -tip poluvodića kao rezultat dobije se takozvani p - n spoj koji za posljedicu ima stvaranje električnog polja [3]. P - n spoj nastaje kada višak elektrona na strani n -tipa poluvodića kreće se na stranu p -tipa poluvodića. Rezultat kretanje elektrona je nagomilavanje negativnog naboja na strani p -tipa poluvodića, odnosno nagomilavanje pozitivnog naboja na strani n -tipa poluvodića.

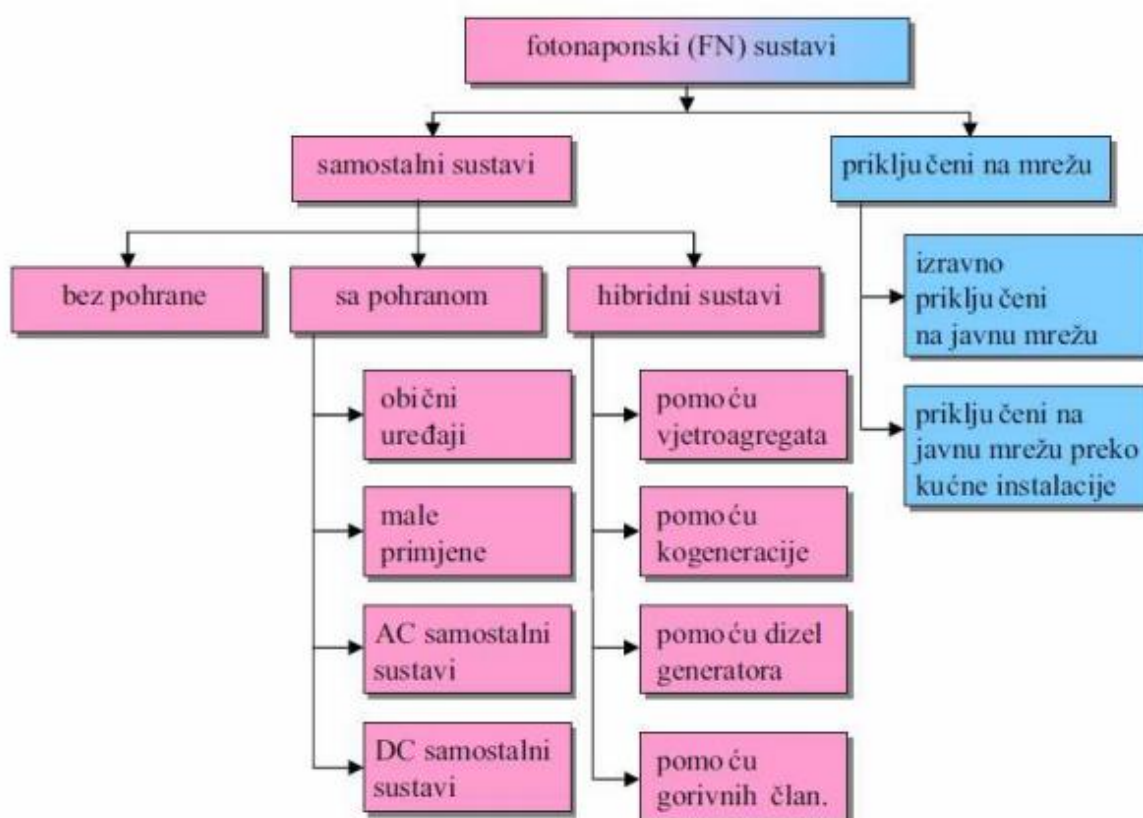
Kada na fotonaponsku ćeliju dođu fotoni oni se mogu reflektirati, absorbirati ili proći direktno kroz ćeliju, ali samo energiju za proizvodnju struje mogu dati fotoni koji su absorbirani.

Kada se absorbira dovoljno svjetla tada se elektroni istiskuju iz atoma, preseljavaju se na negativnu stranu kontakta ćelije dok se za to vrijeme šupljine kreću prema pozitivnoj strani kontakta ćelije gdje očekuju elektrone kako je prikazan korak 3 na slici[3-5].

U posljednjem koraku napon na vanjskim kontaktima p-n spoja povezuje se sa potrošačima pri čemu se stvara naboj i poteće istosmjerna struja sve dokle postoji upadni tok svjetlosti.

2.4. Vrste fotonaponskih sustava

Solarni fotonaponski sustavi mogu se podijeliti na dvije osnovne skupine: fotonaponski sustavi priključeni na javnu elektroenergetsku mrežu (engl. on-grid), i fotonaponski sustavi koji nisu priključeni na mrežu (engl. off-grid), a često se nazivaju i samostalnim sustavima (engl. stand-alone systems). Podjela fotonaponskih sustava prikazana je na slici 2.4 [4-5].

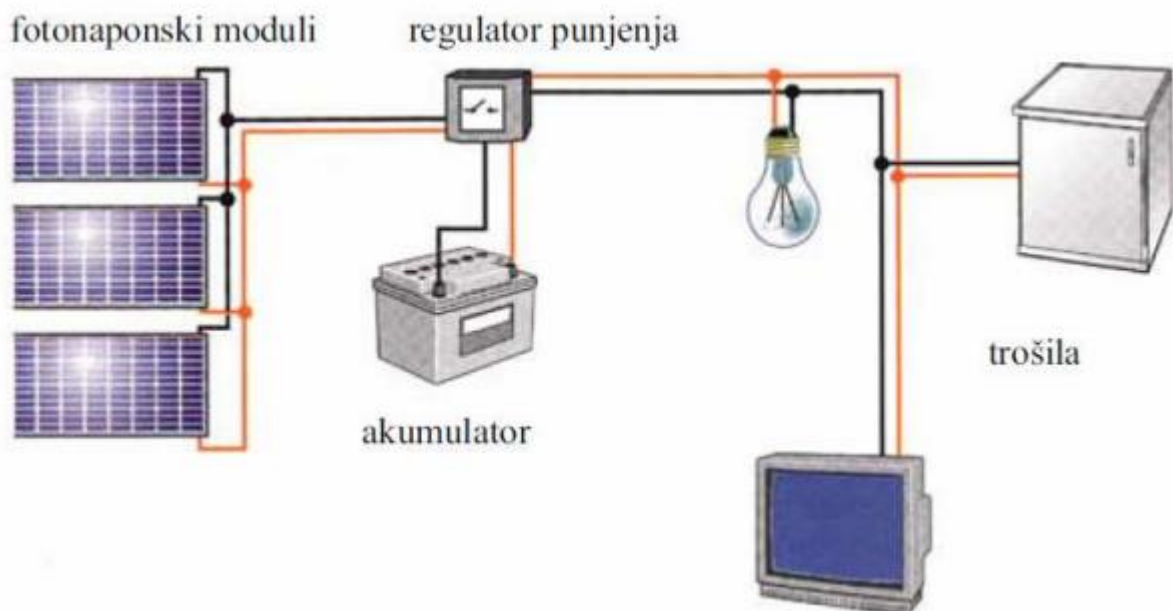


Sl 2.4. Podjela FN sustava. Izvor: [5]

Fotonaponski samostalni sustavi, odnosno koji nisu priključeni na mrežu, mogu biti sa ili bez pohrane energije, što će ovisiti o načinu potrošnje energije i vrsti primjene i hibridni sustavi koji mogu biti s dizelskim generatorom, gorivnim ćelijama, kogeneracijom ili vjetroagregatom. Fotonaponski sustavi koji su priključeni na javnu elektroenergetsku mrežu mogu biti priključeni na javnu elektroenergetsku mrežu preko kućne instalacije ili izravno priključeni na javnu elektroenergetsku mrežu [5].

2.4.1. Samostalni FN sustavi

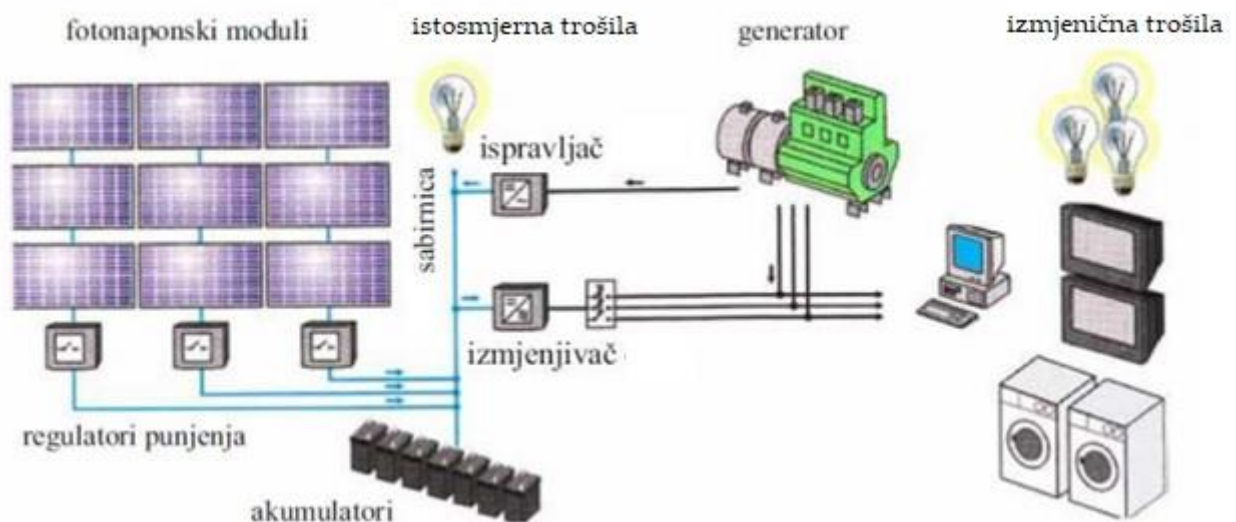
Kao što je već rečeno, solarni fotonaponski sustavi koji nisu priključeni na mrežu (engl. offgrid) često se nazivaju i samostalnim sustavima (engl. stand-alone systems), a mogu biti sa ili bez pohrane energije, i hibridni sustavi koji mogu biti s gorivnim ćelijama, dizelskim generatorom, vjetroagregatom ili kogeneracijom .



Sl 2.5. Samostalni sustav s pohranom energije. Izvor: [5]

Fotonaponska pretvorba svjetlosne energije u električnu, odnosno energije sunčeva zračenja, odvija se u solarnoj ćeliji, dok se u akumulatoru obavlja povratni (reverzibilni) elektrokemijski proces pretvorbe, povezan s nabijanjem (punjenjem) i izbijanjem (pražnjenjem) akumulatora. U trošilima se električna energija pretvara u različite oblike, kao primjerice toplinsku, mehaničku, svjetlosnu ili neku drugu energiju. Trošilo je definirano naponom, snagom, i strujom.

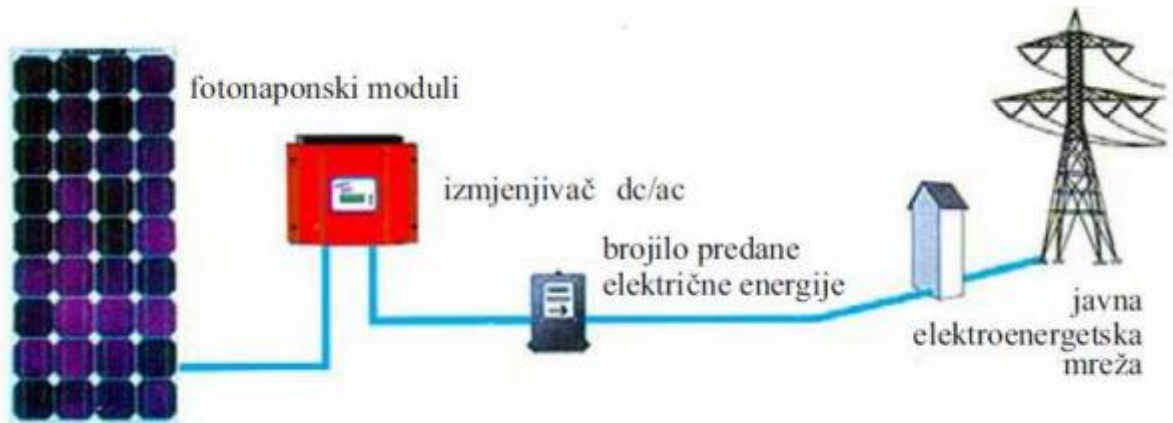
Solarni fotonaponski sustavi mogu biti izvedeni i kao hibridni sustavi s kogeneracijom, vjetroagregatom, gorivnim člancima ili pak najčešće, generatorom na biodizel ili dizel gorivo. Kod tih sustava se električnom energijom proizvedenom vjetroagregatom ili solarnim modulima, prvotno napajaju trošila, a višak energije se pohranjuje u tzv. solarne akumulatore. U slučaju da ne postoje uvjeti za proizvodnju 16 električne energije vjetroagregatom ili solarnim modulima, izvor za napajanje izmjeničnih ili istosmjernih trošila će biti akumulator. U slučaju da ni akumulator više nema energije za napajanje trošila, uključuje se generator na biodizel ili dizel gorivo.



Sl 2.6. Hibridni FN sustav. Izvor: [5]

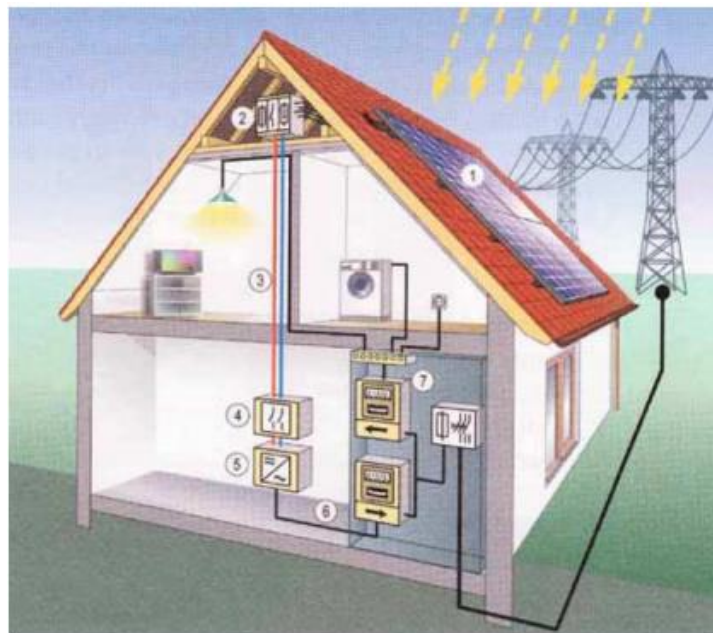
2.4.2. FN sustavi priključeni na javnu elektroenergetsku mrežu

Razvojem tržišta fotonaponske tehnologije, primjerice modula, ćelija, izmjenjivača i prateće opreme, fotonaponski sustavi počinju se ugrađivati ne samo na građevinama ili u njihovoj neposrednoj blizini, nego i na slobodnim površinama u blizini elektroenergetske mreže, te gradnjom djela elektroenergetske mreže do priključka na nisku, srednju ili visoku razinu napona elektroenergetskog sustava. Ti su sustavi izravno priključeni na javnu elektroenergetsku mrežu i svu proizvedenu električnu energiju predaju u elektroenergetski sustav, kao što je prikazano na slici 2.7. Za te je sustave karakteristična veća snaga i zahtijevaju veće površine.



Sl 2.7. FN sustav priključen na mrežu. Izvor: [5]

Osim fotonaponskih sustava koji su priključeni direktno na elektroenergetsku mrežu postoje i sustavi koji su kombinacija samostalnih i spojenih na elektroenergetsku mrežu, kod kojih se spajanje na elektroenergetsku mrežu izvodi koristeći kućnu instalaciju te se zbog toga tako i nazivaju. Oni omogućuju povezivanje distribuiranih sustava na centralizirane sustave, odnosno sustave priključene uglavnom na niskonaponsku razinu elektroenergetskog sustava. Temeljne komponente fotonaponskog sustava su: FN moduli, spojna kutija, kablovi, glavna sklopka, izmjenjivač, brojilo. Sustav s takvim komponentama priključen na javnu mrežu pomoću kućne instalacije prikazan je na slici 2.8.



Sl 2.8. FN sustav priključen na mrežu pomoću kućne instalacije. Izvor: [5]

3. DIDAKTIČKA OPREMA

Didaktička oprema Lucas-Nuelle namijenjena je pružanju temeljnog znanja o FN sustavima kao OIE. Oprema je skalirana i prilagođena laboratorijskim uvjetima.

3.1. Fotonaponska ploča

Lucas-Nuelle oprema sastoji se od fotonaponske ploče koja sadrži sve potrebne komponente za izgradnju otočnog fotonaponskog sustava. Fotonaponski sustav (slika 3.1.) sastoji se od:

- napajanja
- UniTrain sučelja
- radne ploče s pripadajućim sensorima
- izvora svjetlosti

Na radnoj ploči nalaze se 24 fotonaponske ćelije koje su fizički spojene u četiri fotonaponska modula. Također na ploči se nalaze ventilator te LED svjetiljka od 12 V i potencijometar sa mogućnošću fizičke promjene otpora kao dostupna trošila. Nadalje, sustav sadrži olovnu bateriju kao spremnik energije te radno mjesto za spajanje predloženih pokusa.

Za izvor svjetlosti koristi se svjetiljka snage 120 W koja ima mogućnost prigušenja zračenja svjetlosti te promjenu kuta zračenja. Koristi se kako bi imitirala zračenje Sunca.

Sučelje se pomoću USB kabela spaja sa računalom kako bi se rezultati mjerenja pokusa mogli iskazati numerički i pomoću karakteristika. Dimenzije radne ploče su 560 x 270 mm.



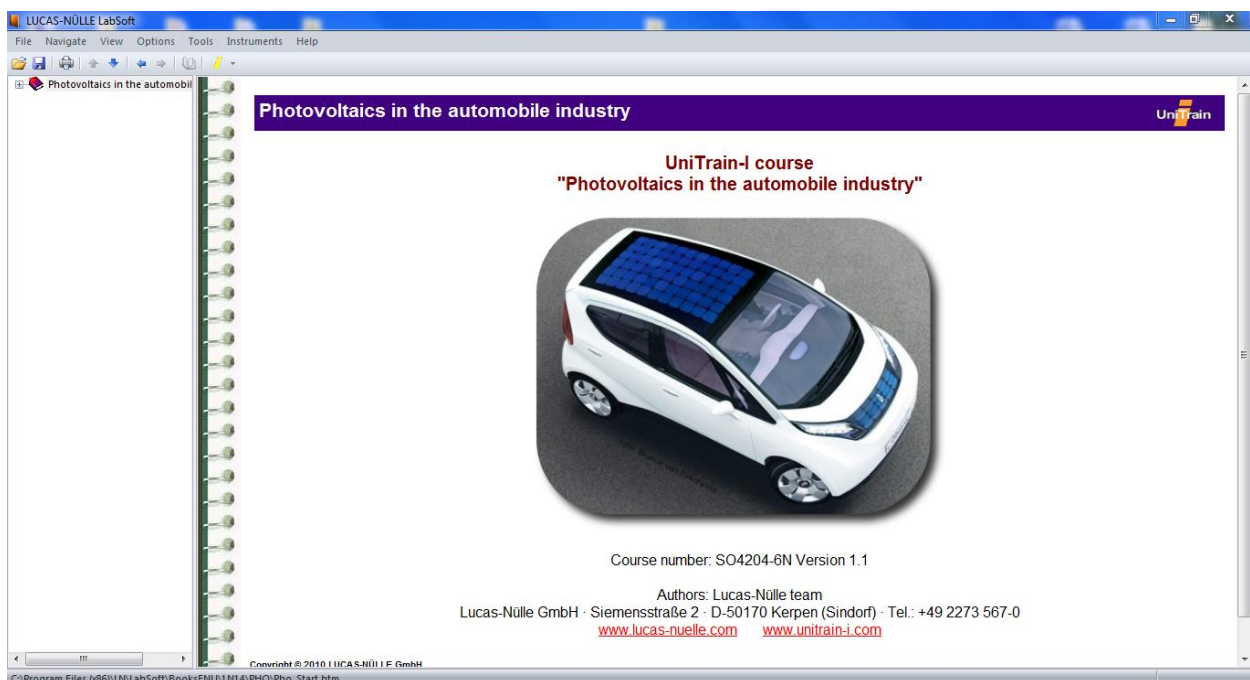
Sl 3.1. FN sustav Lucas-Nuelle. Izvor: Izrada autora

3.2. Predloženi pokusi

Vježbe koje sadrži Lucas-Nuelle oprema su:

- strujne karakteristike FN- ćelija s obzirom na položaj u odnosu na izvor svjetlosti,
- analiza osjetljivosti napona praznog hoda o temperaturi,
- pokus korisnosti i faktor ispunje,
- opterećenje fotonaponskog modula s različitim trošilima

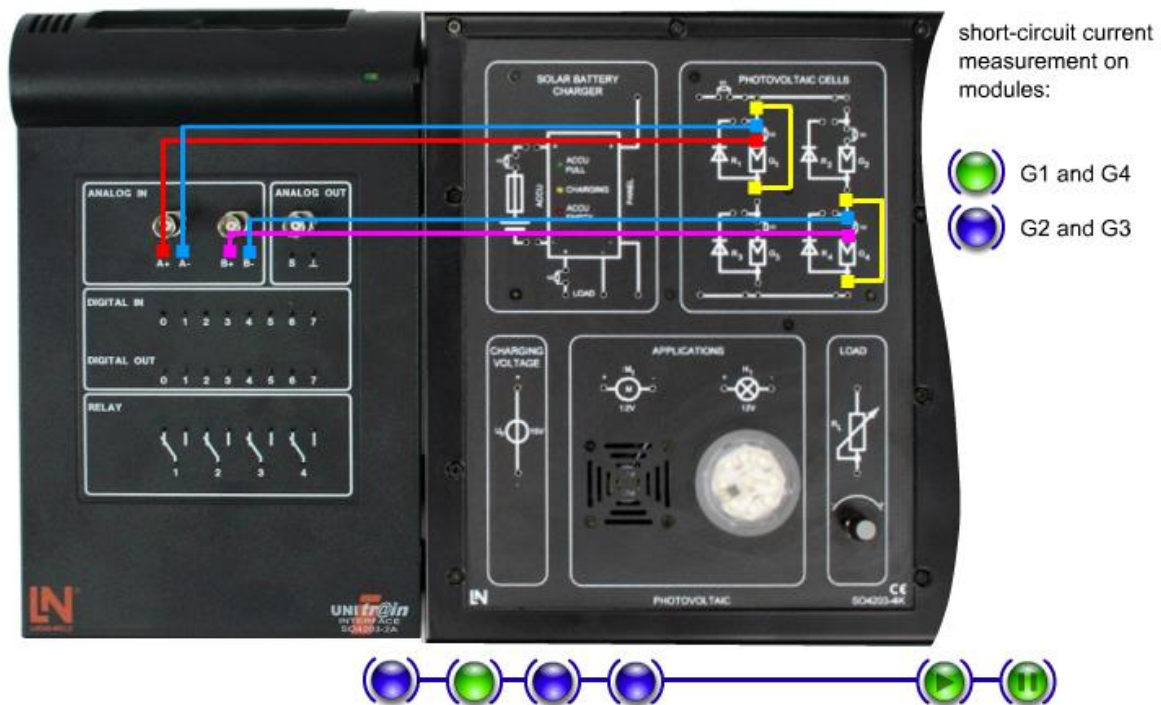
Vježbe se pokreću pomoću računala na koje se instalira LUCAS - NULLE LabSoft program (slika 3.2.) na kojemu se nalaze upute za spajanje predloženih pokusa, sheme spojeva te uputstva za pravilno izvođenje vježbi.



Sl. 3.2. LUCAS – NULLE LabSoft program. Izvor: izrada autora

3.2.1. Strujne karakteristike FN- ćelija s obzirom na položaj u odnosu na izvor svjetlosti

U prvom predloženom pokusu demonstrirano je kako se mjeri sruja fotonaponskih ćelija koja ovisi o promjeni položaja izvora svjetlosti (slika 3.3.).

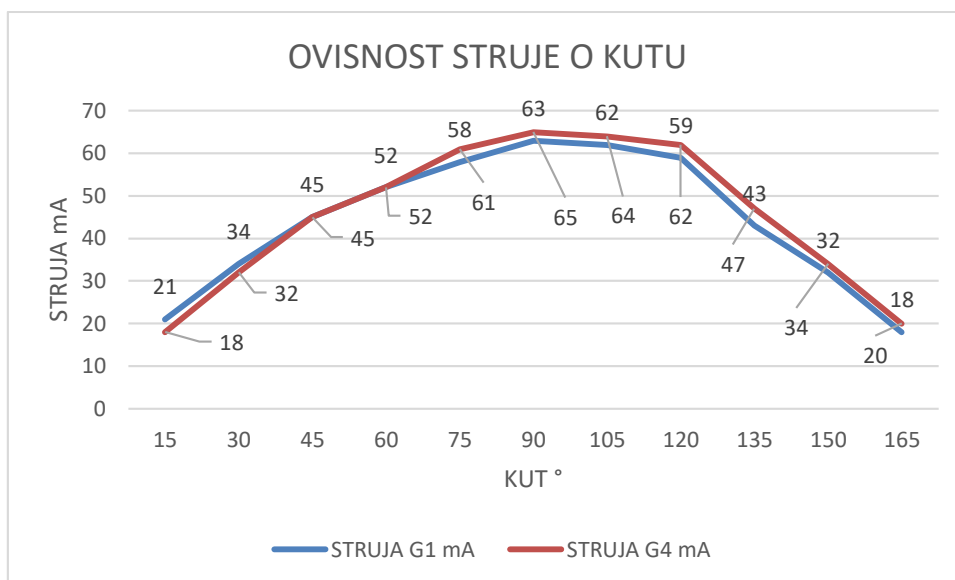


Sl. 3.3. Shema spoja G1 i G4 modula. Izvor: izrada autora

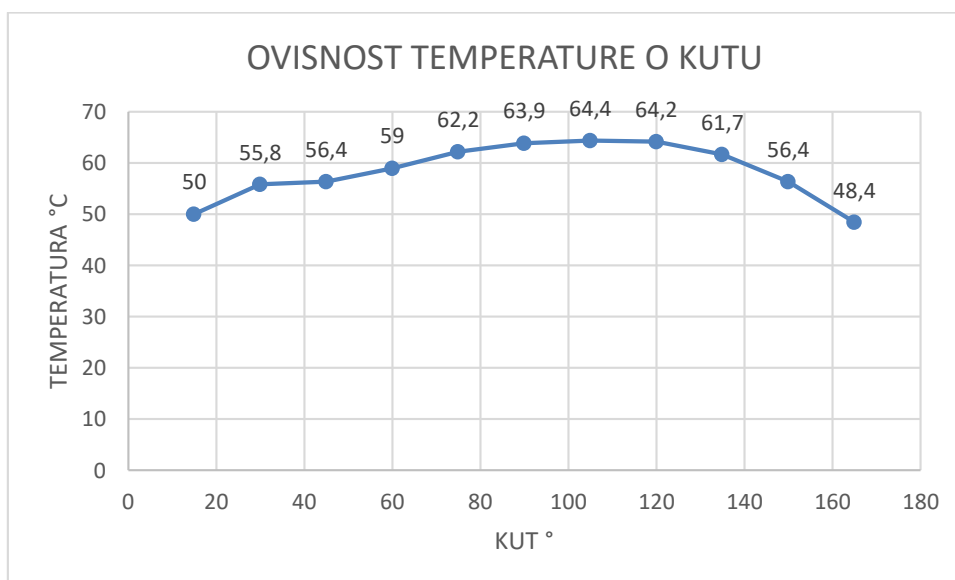
Kratko su spajani moduli G1 i G4 te im je mjerena struja kratkog spoja i temperatura pod različitim kutevima. Kutevi su se mjenjali po 15 stupnjeva od 15°-165°. Izvor svjetlosti je bio maksimalnog zračenja ($G= 1130 \text{ W/m}^2$).

Tablica 3.1. Rezultati mjerenja temperature i struje kratkog spoja za module G1 i G4

<i>KUT</i> (°)	<i>STRUJA G1</i> (mA)	<i>STRUJA G4</i> (mA)	<i>TEMPERATURA</i> (°C)
15	21	18	50
30	34	32	55,8
45	45	45	56,4
60	52	52	59
75	58	61	62,2
90	63	65	63,9
105	62	64	64,4
120	59	62	64,2
135	43	47	61,7
150	32	34	56,4
165	18	20	48,4



Sl 3.4. Ovisnost struja G1 i G4 o različitim kutevima. Izvor: Izrada autora



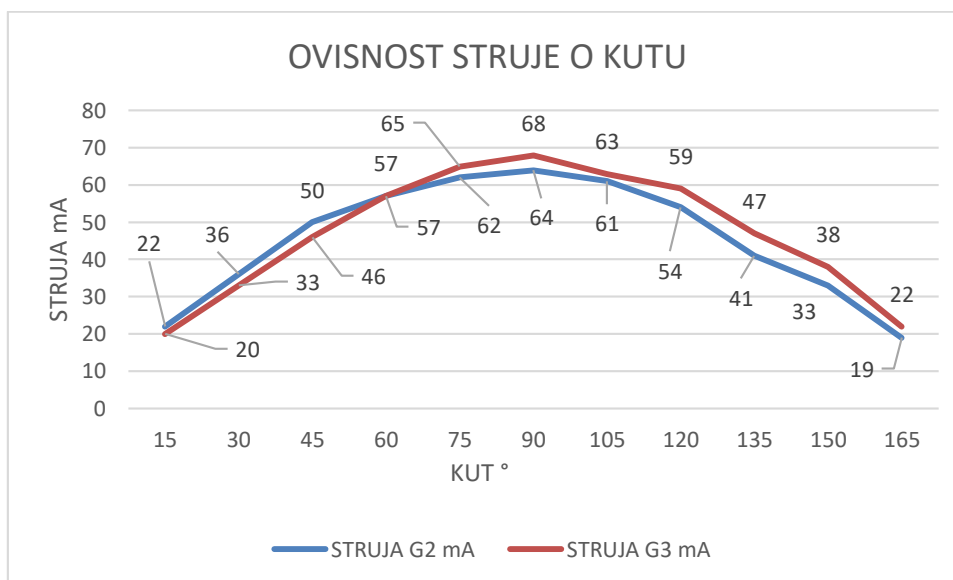
Sl 3.5. Ovisnost temperature o kutu za module G1 i G4. Izvor: Izrada autora

Iz pokusa se može zaključiti kako optimalni kut s obzirom na proizvodnju struje modula iznosi 60°, iz razloga što je struja jednaka na oba spoja. Temperatura se značajno ne mjenja ali je najviša pod kutem od 90°, tj. ovisna je o jačini zračenja.

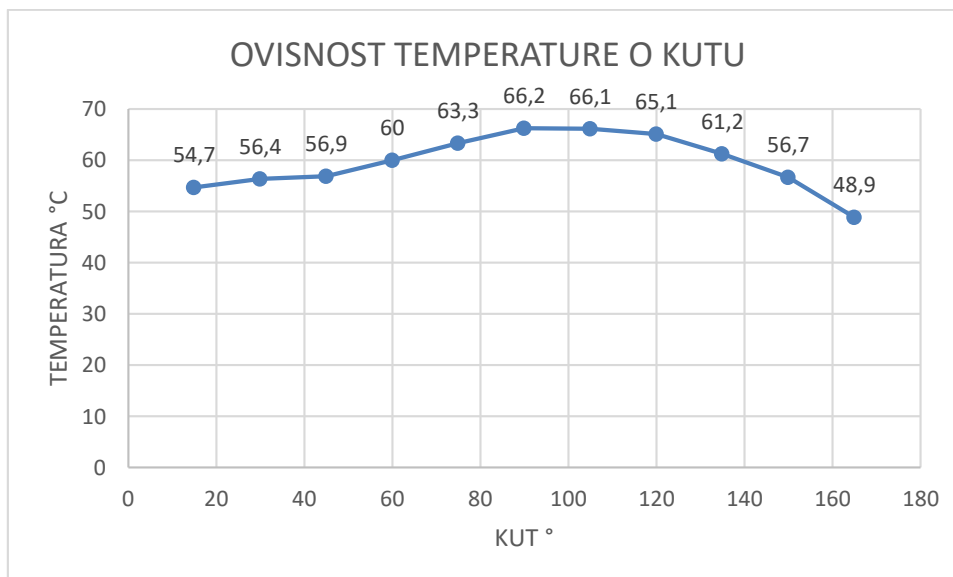
U drugom dijelu pokusa spajani su moduli G2 i G3. Njihovi rezultati su dani u tablici 3.2.

Tablica 3.2. Rezultati mjerenja temperature i struje kratkog spoja za module G2 i G3

KUT (°)	STRUJA G2 (mA)	STRUJA G3 (mA)	TEMPERATURA (°C)
15	22	20	54,7
30	36	33	56,4
45	50	46	56,9
60	57	57	60
75	62	65	63,3
90	64	68	66,2
105	61	63	66,1
120	54	59	65,1
135	41	47	61,2
150	33	38	56,7
165	19	22	48,9



Sl 3.6. Ovisnost struja G2 i G3 o različitim kutevima. Izvor: Izrada autora



Sl 3.7. Ovisnost temperature o kutu za module G2 i G3. Izvor: Izrada autora

Slični rezultati se dobijaju kod spajanja G2 i G3 kao i kod G1 i G4 što je logično s obzirom na njihov položaj. Struje i temperature u pokusu nisu jednake za istu udaljenost izvora svjetlosti od središta odnosno kut od 60° i 120° nemaju jednake struje i temperature zbog položaja u odnosu na izvor svjetlosti.

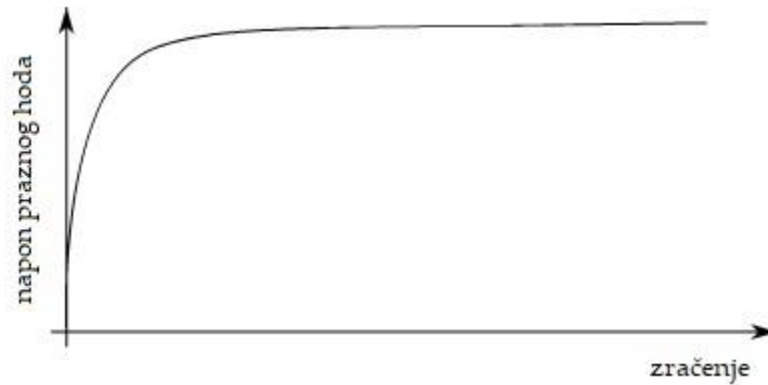
3.2.2. Analiza osjetljivosti napona praznog hoda o temperaturi

Napon praznog hoda je najveći napon koji se javlja kod FN- ćelija. Napon praznog hoda važan je kod dimenzioniranja stringova prilikom serijskog spajanja, dobija se iz pokusa praznog hoda modula.

Parametri koji utječu na napon praznog hoda su: zračenje, promjena kuta, temperatura.

Zračenje

Ovisnost napona praznog hoda o zračenju prikazan je na slici 3.8. Napon približava svoju maksimalnu razinu već pri niskim zračenjima. Prilikom ugradnje treba imati na umu da moduli proizvode napone i po oblačnom vremenu, tj. prilikom mjenjanja vrijednosti zračenja.



Sl. 3.8. Ovisnost napona praznog hoda o zračenju. Izvor: [8]

Promjena kuta

Mjerenje ovisnosti napona praznog hoda o promjeni kuta svjetla pokazuje da je najveći napon prilikom okomitog zračenja svjetlosti odnosno pod kutem od 90 stupnjeva.

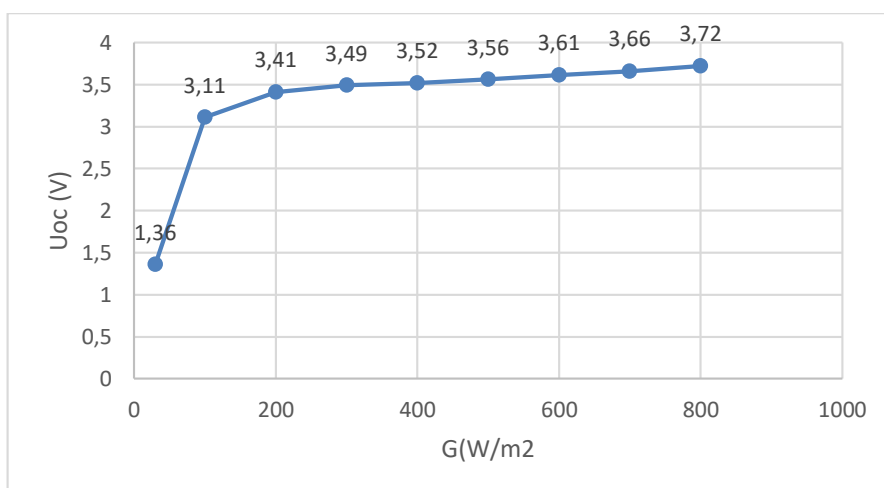
Temperatura

Napon praznog hoda ima negativni koeficijent temperature, odnosno kako se fotonaponski modul zagrijava napon praznog hoda pada. Kao rezultat temperaturne ovisnosti može se zaključiti da je napon praznog hoda najviši pri niskim temperaturama (zimi). Zbog toga u toplijim krajevima treba dodati module.

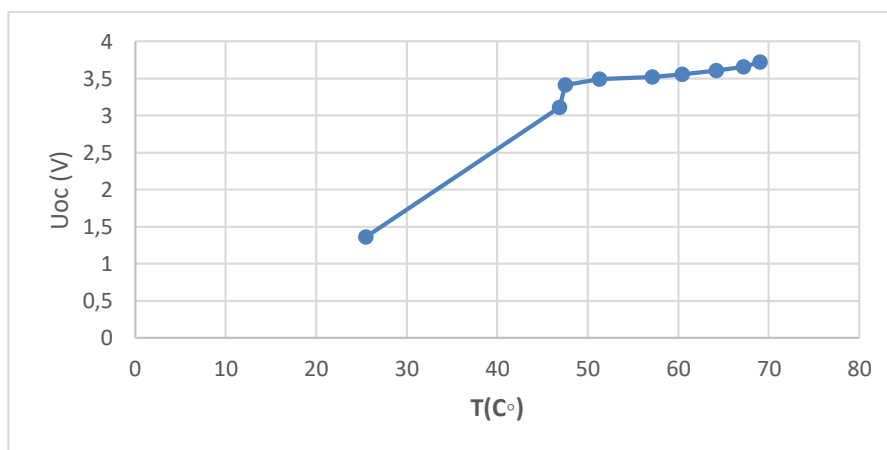
U ovome pokusu se ispituje napon praznog hoda u ovisnosti o zračenju i temperaturi za karakteristične kuteve (30°, 60°, 90°).

Tablica 3.3. Rezultati mjerenja napona praznog hoda, temperature te zračenja pri kutu od 90°

$G(\text{W/m}^2)$	$T(\text{C}^\circ)$	$U_{oc} (\text{V})$
800	69	3,72
700	67,2	3,66
600	64,2	3,61
500	60,4	3,56
400	57,1	3,52
300	51,3	3,49
200	47,5	3,41
100	46,9	3,11
30	25,5	1,36



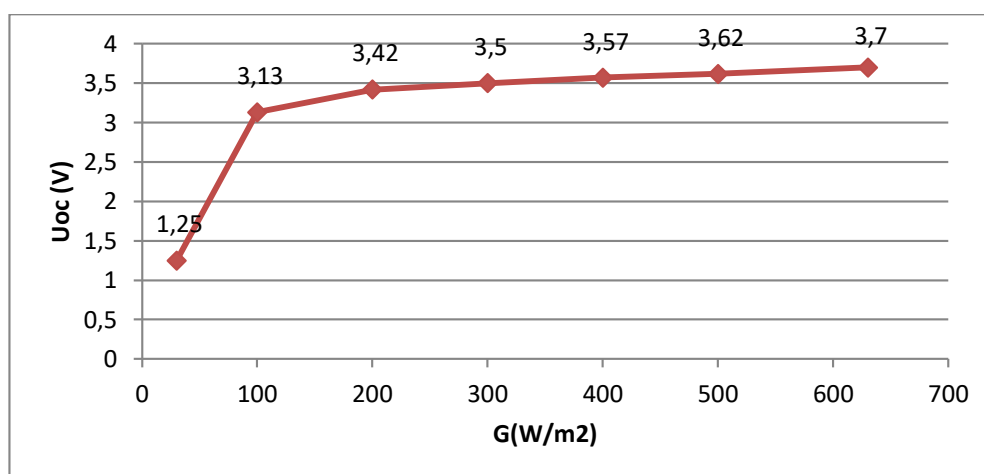
Sl.3.9. Ovisnost napona praznog hoda o zračenju. Izvor: Izrada autora



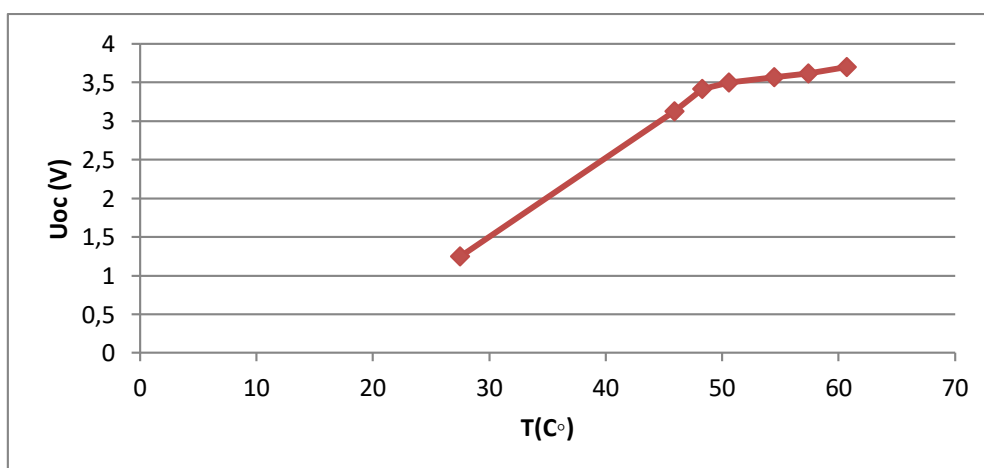
Sl. 3.10. Ovisnost napona praznog hoda o temperaturi. Izvor: Izrada autora

Tablica 3.4. Rezultati mjerenja napona praznog hoda, temperature te zračenja za kut od 60°

$G(\text{W}/\text{m}^2)$	$T(\text{C}^\circ)$	$U_{oc} (\text{V})$
630	60,7	3,7
500	57,4	3,62
400	54,5	3,57
300	50,6	3,5
200	48,3	3,42
100	45,9	3,13
30	27,5	1,25



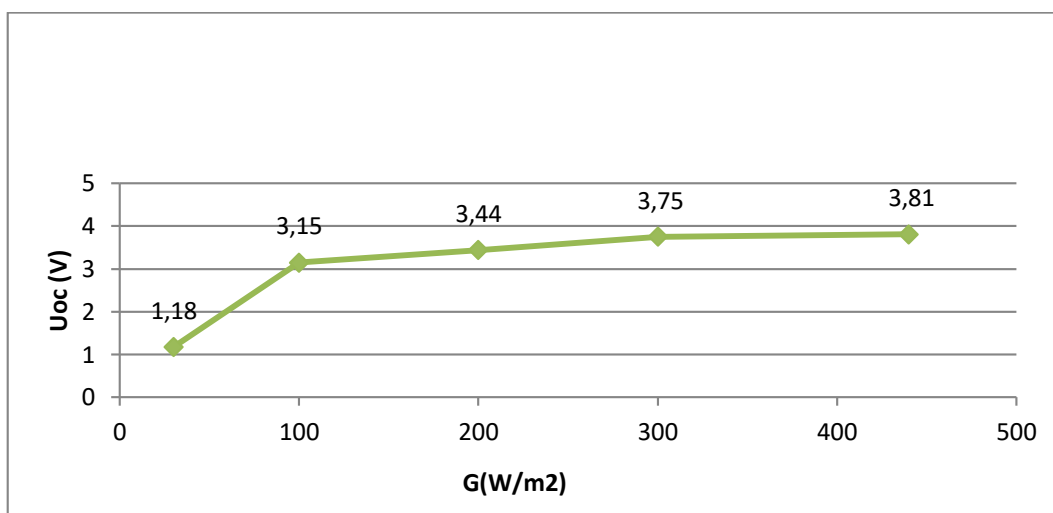
Sl.3.11. Ovisnost napona praznog hoda o zračenju. Izvor: Izrada autora



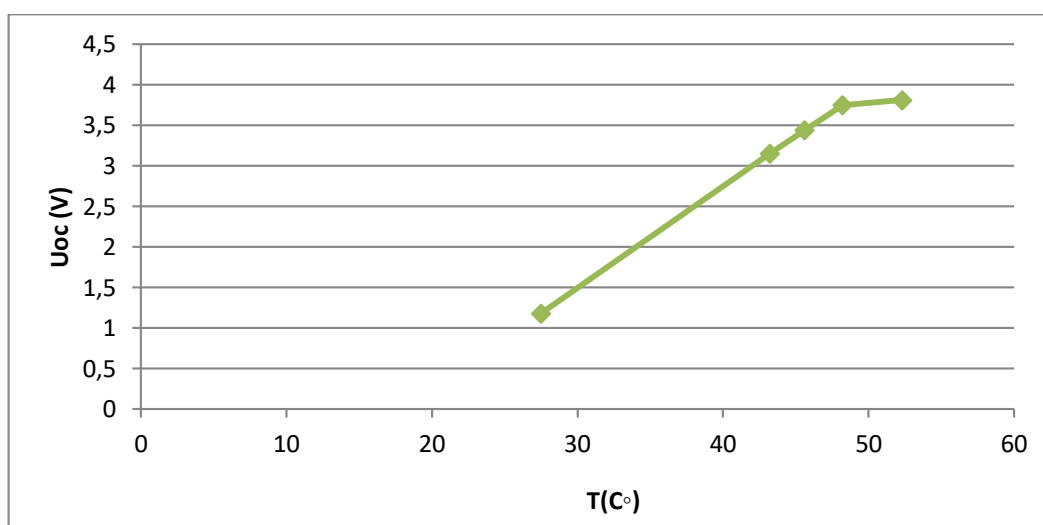
Sl.3.12. Ovisnost napona praznog hoda o temperaturi. Izvor: Izrada autora

Tablica 3.5. Rezultati mjerenja napona praznog hoda, temperature te zračenja za kut od 30°

$G(\text{W/m}^2)$	$T(\text{C}^\circ)$	$U_{oc} (\text{V})$
440	52,3	3,81
300	48,2	3,75
200	45,6	3,44
100	43,2	3,15
30	27,5	1,18



Sl.3.11. Ovisnost napona praznog hoda o zračenju. Izvor: Izrada autora



Sl.3.12. Ovisnost napona praznog hoda o temperaturi. Izvor: Izrada autora

Iz pokusa se daje zaključiti da ovisnost napona praznog hoda o zračenju ide prema maksimalnom naponu već pri malim promjenama prilikom povećanja zračenja ($200\text{W}/\text{m}^2$). Temperatura raste zbog izvora svjetlosti te zračenja, dominantniji je utjecaj zračenja zbog emitiranja topline iz umjetnog izvora svjetlosti. Već prilikom 45°C vidljivo je da se temperatura ustaljuje u odnosu na temperaturu modula koji je osvijetljen zračenjem izazvanim fotonaponskim efektom.

3.2.3. Pokus korisnosti i faktor ispunje

Faktor ispunjenja (FF) je kriterij kvalitete fotonaponskog modula a računa se kao omjer maksimalne točke snage (MPP) te umnoška napona praznog hoda i struje kratkog spoja. Što je faktor ispunjenja bliži 1 to je kvaliteta fotonaponskog modula veća.

$$FF = \frac{P_{MPP}}{U_{OC} \cdot I_{SC}} = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{U_{OC} \cdot I_{SC}} \quad 3.1$$

Gdje je:

- U_{MPP} - napon u točki maksimalne snage
- I_{MPP} – struja u točki maksimalne snage
- U_{OC} – napon praznog hoda
- I_{SC} – struja kratkog spoja

Za određivanje učinkovitosti η fotonaponskog modula treba znati snagu u maksimalnoj točki snage (MPP), zračenje E i površinu A solarne ćelije. Učinkovitost se izračunava iz sljedećeg izraza:

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{E \cdot A} = \frac{FF \cdot U_{OC} \cdot I_{SC}}{E \cdot A} = \frac{U_{OC} \cdot I_{SC}}{G} \cdot 100\% \quad 3.2$$

Gdje je:

- G – zračenje

U pokusu je potrebno izmjeriti napon praznog hoda, struju kratkog spoja, te očitati napon i struju u točki maksimalne snage za karakteristične kuteve ($30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$)

Tablica 3.6. Rezultati očitavanja struje i napona u točki maksimalne snage za određene kuteve

Kut (°)	U_{MPP} (V)	I_{MPP} (mA)
30	3,1	32
60	3	48
90	2,8	57
120	2,6	50
150	2,8	30

Tablica 3.7. rezultati mjerenja napona praznog hoda i struje kratkog spoja za određene kuteve

Kut (°)	U_{oc} [V]	I_{sc} [mA]
15	3.73	23.00
30	3.81	36.00
45	3.77	46.00
60	3.73	53.00
75	3.71	59.00
90	3.70	62.00
105	3.68	63.00
120	3.65	59.00
135	3.58	44.00
150	3.51	34.00
165	3.39	21.00

Izračun faktora ispunjenja te učinkovitost za kut od 90° :

$$FF = \frac{P_{MPP}}{U_{OC} \cdot I_{SC}} = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{U_{OC} \cdot I_{SC}} = \frac{2.8 \cdot 57}{3.7 \cdot 62} = 0.69$$

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{E \cdot A} = \frac{FF \cdot U_{OC} \cdot I_{SC}}{E \cdot A} = \frac{FF \cdot U_{OC} \cdot I_{SC}}{G} \cdot 100\% = \frac{0.69 \cdot 3.7 \cdot 62}{790} \cdot 100 = 20\%$$

Tablica 3.8. Izračun FF i η za karakteristične kuteve

$Kut(^{\circ})$	FF	η
30	0.72	0.19
60	0.73	0.19
90	0.69	0.20
120	0.6	0.17
150	0.7	0.16

Iz pokusa se da zaključiti kako je učinkovitost skaliranog sustava 20% što odgovara vrijednostima stvarnih fotonaponskih modula kao i FF [17]. Kako se izvor svjetlosti mijenja učinkovitost se ne mijenja značajno što govori o tome da je skalirani sustav dobro dimenzioniran, odnosno indentičan je pravom komercionalnom sustavu.

3.2.4. Opterećenje FN modula s različitim trošilima

U ovome pokusu ispituje se odziv fotonaponskih modula koji su povezani s različitim opterećenjima u samostalnom sustavu. Da bi izravno priključeno trošilo učinkovito funkcioniralo, između njega i FN modula obično je potreban dodatni elektronički uređaj, tj. uređaji koji osiguravaju da FN modul uvijek radi u točki maksimalne snage kako bi se optimizirala proizvodnja električne energije. U prvom djelu pokusa serijski su spojena četiri FN modula te im je dodano opterećenje u vidu LED rasvjete. Zračenje je bilo podešeno na maksimalnu vrijednost ($G=1130\text{w/m}^2$). Potrebno je izmjeriti napon praznog hoda, te nazivni napon i struju trošila. U drugom dijelu LED rasvjetu smo zamjenili ventilatorom. Dobiveni rezultati prikazani su u tablici 3.9.

Tablica 3.9. Izmjereni podatci za različita opterećenja

	<i>LED rasvjeta</i>	<i>Ventilator</i>
$U_{OC} (V)$	14.9	14.9
$U_N (V)$	11.4	8.4
$I_N (mA)$	37	42
$P_N (mW)$	440	353

Iz pokusa se vidi da je trošilo sa svojim karakteristikama, a kada nema uređaja za postavljanje radne točke u točku maksimalne snage kako se postavlja radna točka na karakteristici. Tako je radna točka LED rasvjete za isti modul u točki A(11.4, 37), dok je za ventilator radna točka u točki B(8.4, 42). Iz tablice 3.9. može se vidjeti kako je snaga LED rasvjete veća od snage ventilatora, ali to je pod pretpostavkom da je u – i karakteristika trošila linarna.

4. IZVOĐENJE POKUSA I MJERENJA

Na predstavljenoj opremi napravljena su tri generalna pokusa kojima je demonstrirano kako se skaliranim sustavom može imitirati stvarni FN sustav. Ovi dodatni pokusi su preporučeni pokusi za učenje o fotonaponskim sustavima kako bi se bolje uočile i razjasnile karakteristike fotonaponskih sustava. Demonstrirani su sljedeći pokusi: proizvodnja električne energije u ovisnosti o utjecajnim parametrima (zračenju i kutu upadu zraka) te serijsko i paralelno spajanje modula.

4.1. Proizvodnja električne energije u ovisnosti o utjecajnim parametrima

Putanja Sunca je od Istoka prema Zapadu pa zbog toga raspoloživa energija varira. Kod fiksiranih sustava kakav je i ovaj, veliki dio energije nije moguće prihvatiti i koristiti za pretvorbu s obzirom da su paneli postavljeni pod određenim kutom (Sl 4.1.) [10].



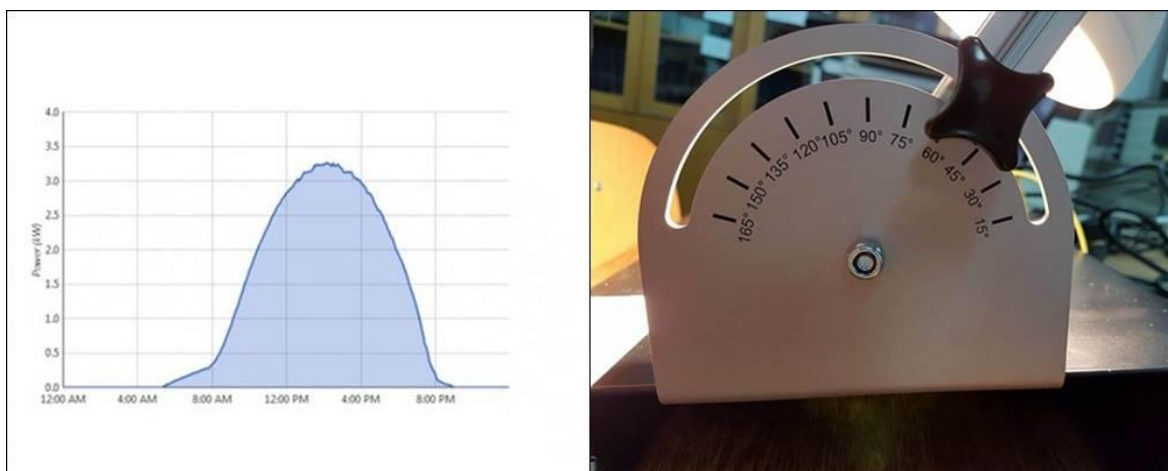
Sl 4.1. Fiksni fotonaponski sustav na krovu obiteljske kuće. Izvor [6]

Drugi način za praćenje Sunčevog zračenja je korištenjem FN sustava koji mijenjaju svoj položaj (engl. *PV Tracker*) koji rade na principu suncokreta, odnosno prate kretanje Sunca od izlaska do zalaska te tako povećavaju učinkovitost proizvodnje električne energije (Sl 4.2).



Sl 4.2. FN tragač (engl. *Pv Tracker*). Izvor [6]

Najveća proizvodnja električne energije je oko podneva, dok je najmanja prilikom izlaska i zalaska Sunca što se može vidjeti iz dnevnog dijagrama snage. U ovome pokusu će se mijenjati kut upada Sunčevog zračenja pomoću izvora svjetlosti prikazanog na slici 4.3. te će biti snimljena $u-i$ i $p-u$ karakteristike pomoću kojih će se doći do zaključka pod kojim kutom FN moduli proizvode najviše energije.

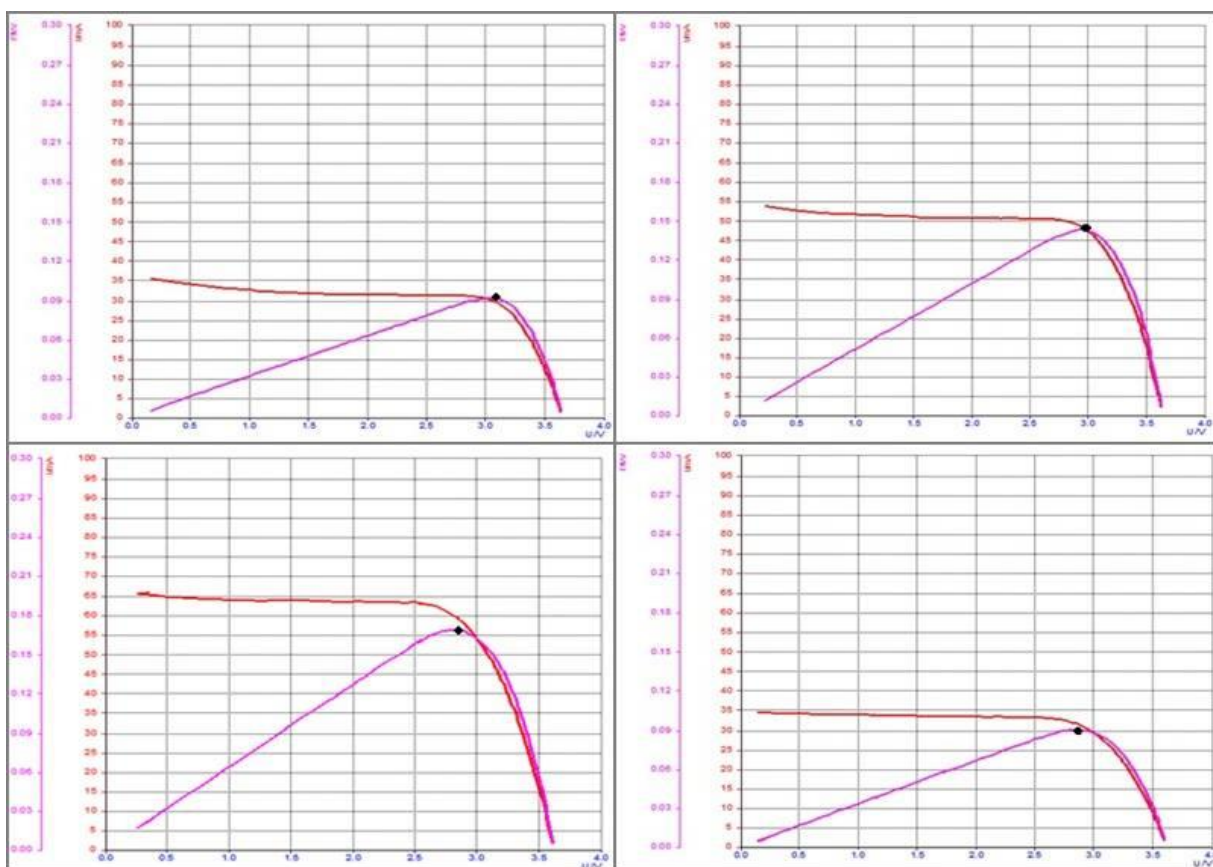


SL 4.3. Dnevni dijagram snage (lijevo) i izvor svjetlosti s mogućnošću promjene kuta upada zraka (desno). Izvor: izrada autora

Iz pokusa (slika 4.4.) uočeno je kako je snaga gotovo identična pod upadnim kutom od 30° i 150° zbog toga što predstavlja isti položaj Sunca u odnosu na module. Pri tome bi kut od 30° predstavljao položaj Sunca u jutarnjim satima, dok bi kut od 150° predstavljao položaj Sunca popodne.

Tablica 4.1. Rezultati mjerenja proizvodnje energije pod različitim upadnim kutovima

KUT °	TEMP (C°)	ZRAČENJE (W/m ²)	SNAGA (W)
30	51,2	455	0,093
60	61,5	690	0,14
90	69	790	0,17
120	66,1	775	0,135
150	56,5	510	0,091



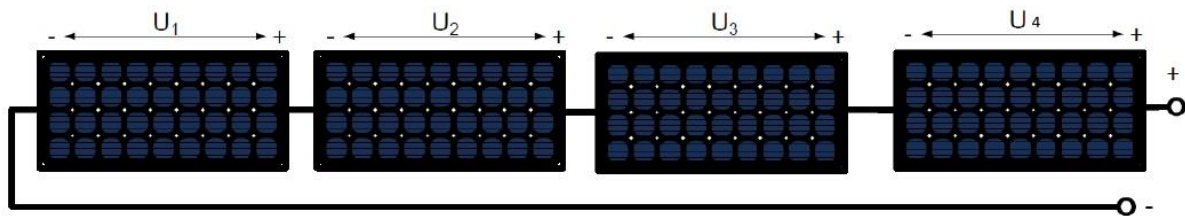
Sl 4.4. Različiti upadni kutevi izvora svjetlosti (30°,60°,90°,150°)

Slika 4.4. prikazuje FN module spojene pod različitim kutovima gdje kut 30° gornja lijeva karakteristika, kut 60° (gore desno), kut 90° (dolje lijevo), kut 150° (dolje desno).

Najveća proizvodnja električne energije je ostvarena pod upadnim kutom od 90° što je i logično iz razloga što Sunčeve zrake okomito padaju na module i iz tog razloga FN moduli proizvode najviše energije, a što se može vidjeti i iz maksimalnih vrijednosti za snagu i zračenje (tablica 4.1.).

4.2. Međusobno spajanja modula- serijski spoj

FN se moduli kao i FN ćelije mogu spajati u seriju kako bi se povećao napon ili u paralelu kako bi se povećala struja niza. FN nizovi sastavljeni su obično od kombinacije serijsko i paralelno spojenih FN modula kako bi se povećala snaga cijelog sustava. Moduli spojeni u seriju mijenjaju $u-i$ karakteristiku te je ukupni napon niza jednak zbroju napona pojedinih modula [10]. Načelna shema serijskog spajanja četiri FN modula nalazi se na slici 4.5.



Sl 4.5. Shema spajanja četiri modula u seriju Izvor: Izrada autora

Slike 4.6. prikazuje snimljene $u-i$ karakteristike za različiti broj serijski spojenih FN modula. Zračenje je podešeno na $G=1150 \text{ W/m}^2$. U ovome pokusu spajano je više modula u seriju, te su terećeni promjenjivim otpornikom. Mijenjanjem otpornosti od 0Ω prema maksimalnoj vrijednosti dobiva se $u-i$ karakteristika. Kako bi napon niza rastao u seriju su dodani i drugi, treći te četvrti modul (slika 4.6.) te je snimana karakteristika povećavanjem otpora. Da bi $u-i$ karakteristika bila kontinuirana i glatka, te da bi se osigurala ponovljivost pokusa potrebno je navesti promjenu otpornosti za linearni dio karakteristike, za koljeno karakteristike te vrijeme koje je potrebno za okretanje potenciometra za određeni dio karakteristike. Za snimanje karakteristike

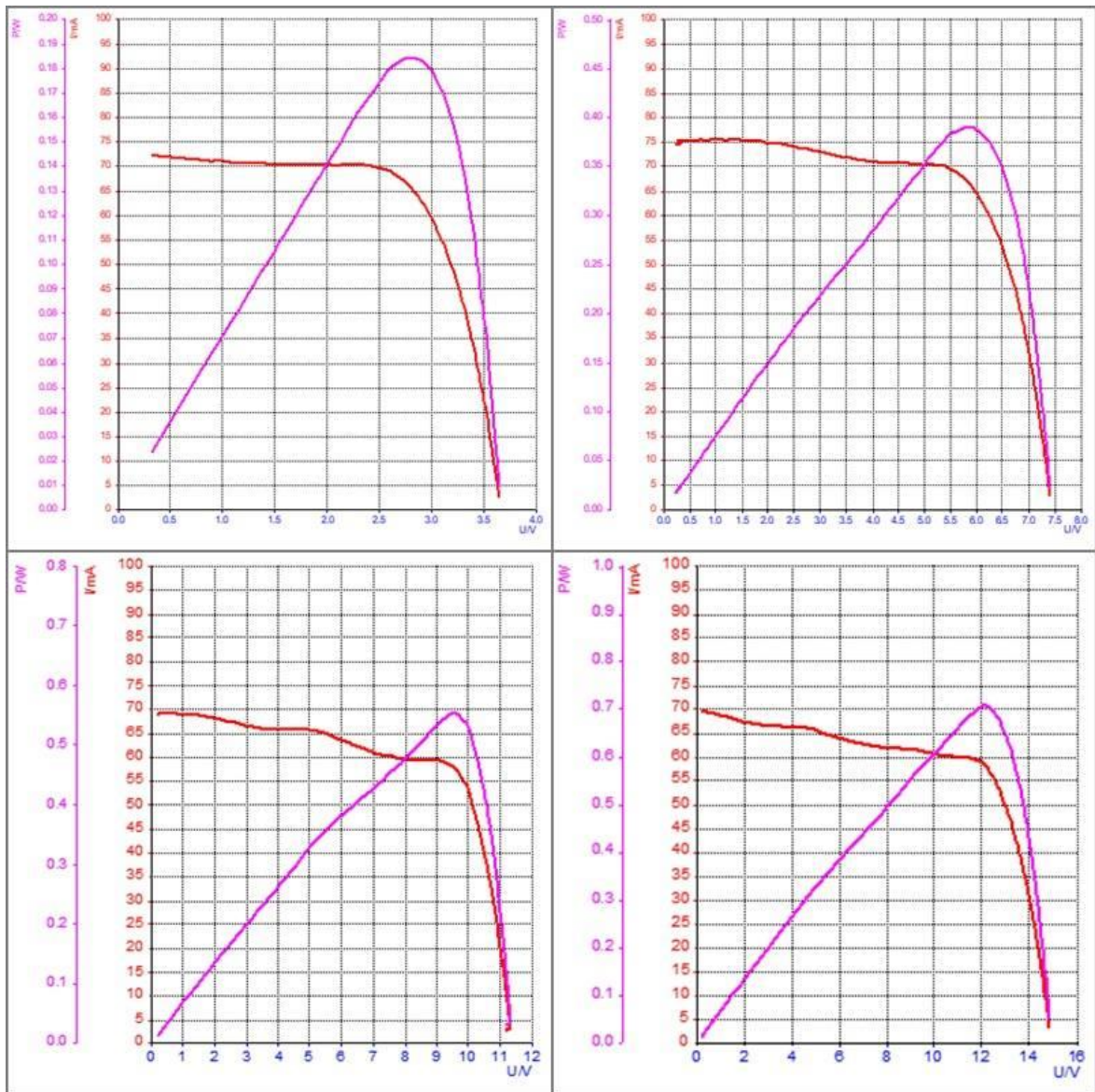
jednog modula, otpor linearnog dijela karakteristike mijenja se u rasponu od 0 do 33 Ω , u vremenu od 0 do 10.94 s, dok se za koljeno otpornost mijenja u rasponu od 33 do 62 Ω za vrijeme od 10.94 do 13.31 s. Pošto za snimanje svih ostalih karakteristika u serijskom spoju vrijedi jednaki postupak kao i za snimanje jednog modula rezultati su dani tablicom 4.3. Dok su rezultati mjerenja pokusa dani tablicom 4.2.

Tablica 4.2. Rezultati mjerenja serijskog spoja

<i>BROJ MODULA</i>	<i>NAPON (V)</i>	<i>STRUJA (mA)</i>	<i>SNAGA (W)</i>
1	3.7	73	0.185
2	7.38	73	0.38
3	11.3	73	0.56
4	15	73	0.7

Tablica 4.3. Rezultati mjerenja otpora i vremena za sva četiri modula

<i>BROJ MODULA</i>	1	2	3	4
<i>OTPOR LINEARNOG DIJELA (Ω)</i>	0 – 33	0 – 78	0 – 152.6	0 – 218
<i>OTPOR KOLJENA KARAKTERISTIKE (Ω)</i>	33 – 66	78 – 141	152.6 – 225	218 – 298
<i>VRIJEME LINEARNOG DIJELA (s)</i>	0 – 10.94	0 – 18.15	0 – 17.56	0 – 25.34
<i>VRIJEME KOLJENA KARAKTERISTIKE (s)</i>	10.94 – 13.31	18.15 – 22.34	17.56 – 19.87	25.34 – 29.03

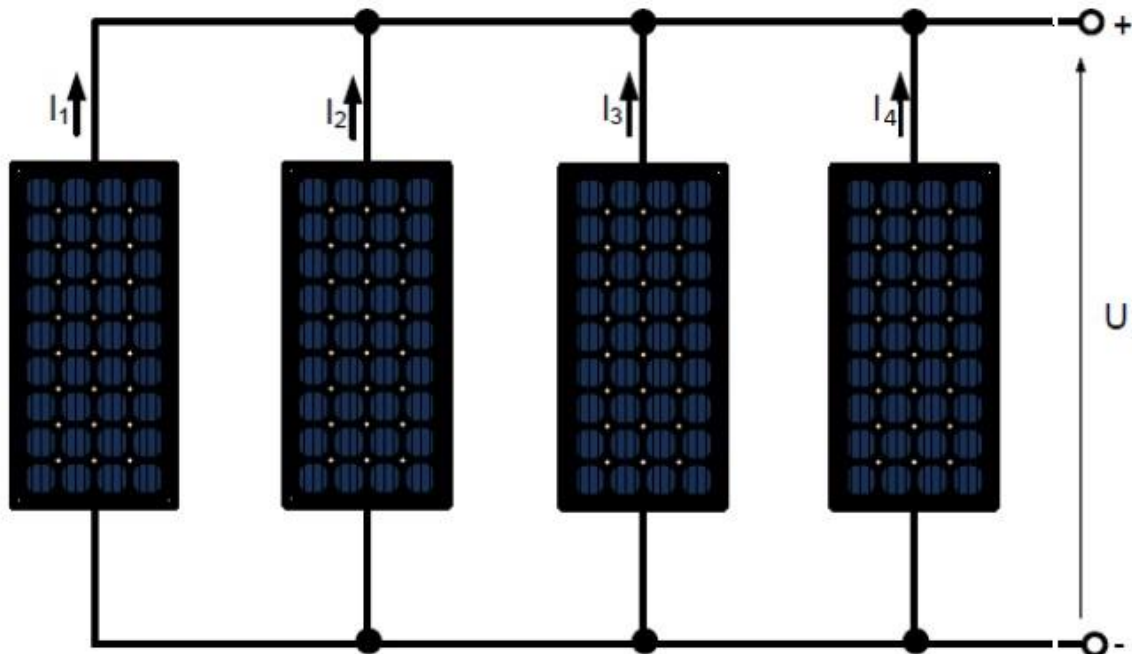


Sl 4.6. Fotonaponski moduli spojeni u seriju. Izvor: izrada autora

Slika 4.6. prikazuje različit broj FN modula spojenih u seriju. Spoj jednog modula odgovara karakteristici gore lijevo, spoj dva modula (gore desno), spoj tri modula (dolje lijevo) dok je spoj četiri modula donja desna karakteristika.

4.3. Međusobno spajanja modula – paralelni spoj

Fotonaponski moduli se spajaju paralelno kako bi se dobila veća struja. U pokusu je potrebno spojiti fotonaponske module u paralelu te odrediti otpornost trošila te vrijeme snimanja dijelova karakteristike. Načelna shema paralelnog spoja modula prikazana je na slici 4.7.



Sl.4.7. Shema paralelnog spoja modula. Izvor: Izrada autora

Slika 4.8. prikazuje snimljene $u-i$ karakteristike za različiti broj paralelno spojenih FN modula. Zračenje je podešeno na $G=635 \text{ W/m}^2$ što nije maksimalno zračenje kao u prethodnom pokusu iz razloga što LabSoft ima strujno ograničenje na 200mA, te se iz tog razloga zračenje moralo podesiti na odgovarajuću vrijednost. U ovome pokusu spajano je više modula u paralelu, te su terećeni promjenjivim otpornikom. Mijenjanjem otpornosti od 0Ω prema maksimalnoj vrijednosti dobiva se $u-i$ karakteristika. Kako bi struja niza rasla, u paralelu su dodani i drugi, treći i četvrti modul te je snimana karakteristika povećavanjem otpora. Da bi $u-i$ karakteristika bila kontinuirana i glatka, te da bi se odredila ponovljivost kao u prethodnom pokusu potrebno je odrediti promjenu otpornosti za linearni dio karakteristike, za koljeno karakteristike i vrijeme koje je potrebno za okretanje potencijometra za određene dijelove karakteristike. Za snimanje

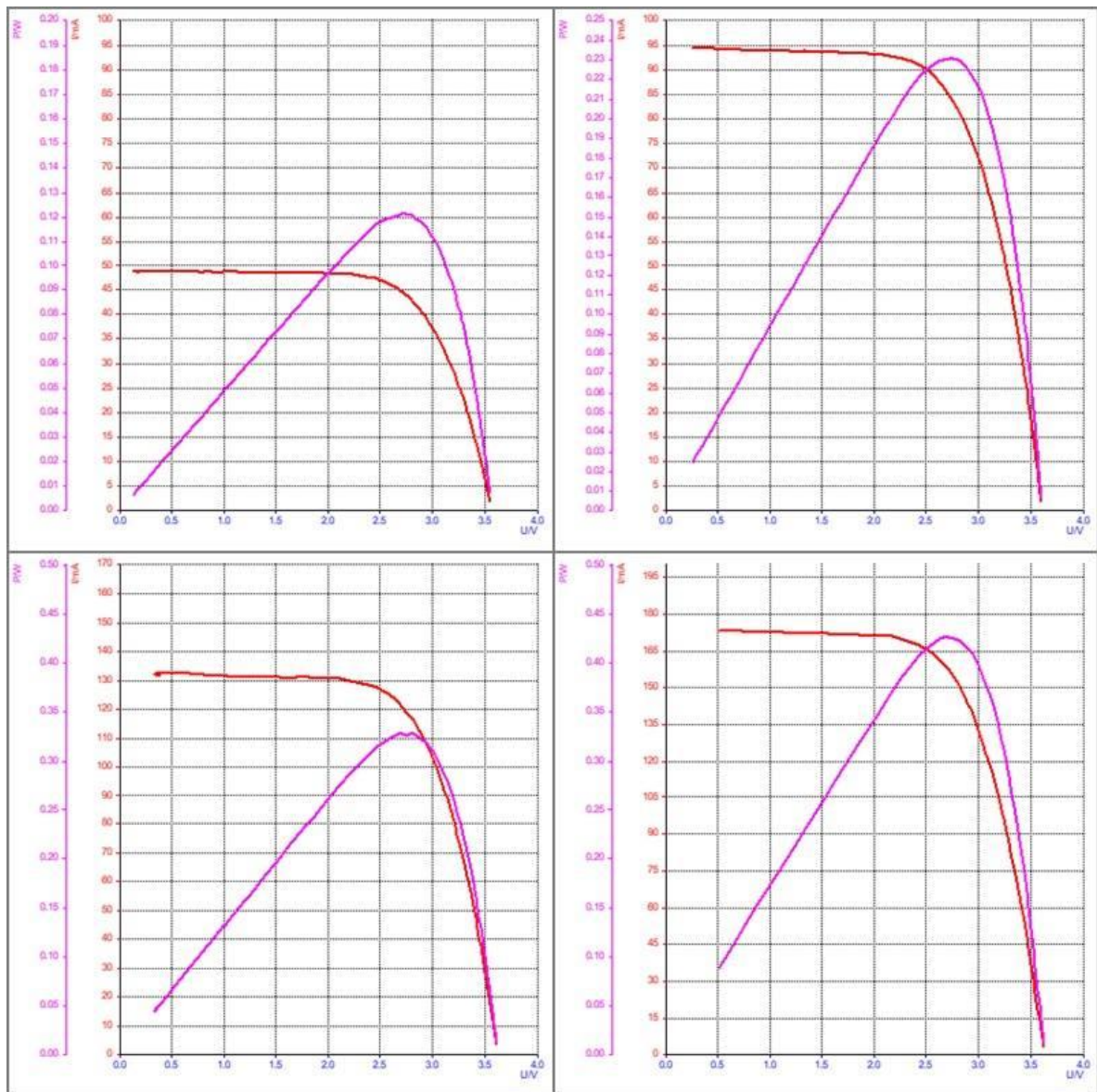
karakteristike jednog modula, otpor linearnog dijela karakteristike mijenja se u rasponu od 0 do 42.1 Ω u vremenu od 0 do 8.59 s, dok je za koljeno otpornost u rasponu od 42.1 do 55.5 Ω u vremenu od 8.59 do 17.59 s. Pošto za snimanje svih ostalih karakteristika u paralelnom spoju vrijedi jednaki postupak kao i za snimanje jednog modula rezultati su dani tablicom 4.5. Dok su rezultati mjerenja pokusa dani tablicom 4.4.

Tablica 4.4. Rezultati mjerenja paralelnog spoja

<i>BROJ MODULA</i>	<i>NAPON (V)</i>	<i>STRUJA (mA)</i>	<i>SNAGA (W)</i>
1	3.7	48	0.122
2	3.7	96	0.23
3	3.7	135	0.32
4	3.7	175	0.43

Tablica 4.5. Rezultati mjerenja otpora i vremena za sva četiri modula

<i>BROJ MODULA</i>	1	2	3	4
<i>OTPOR LINEARNOG DIJELA (Ω)</i>	0 – 42.1	0 – 20.7	0 – 15.1	0 – 12.4
<i>OTPOR KOLJENA KARAKTERISTIKE (Ω)</i>	42.1 – 55.5	20.7 – 34.3	15.1 – 27.4	12.4 – 21.4
<i>VRIJEME LINEARNOG DIJELA (s)</i>	0 – 8.59	0 – 10.82	0 – 8.03	0 – 5.57
<i>VRIJEME KOLJENA KARAKTERISTIKE (s)</i>	8.59 – 17.59	10.82 – 15.73	8.03 – 13.93	5.57 – 10.73



Sl 4.8. Fotonaponski moduli spojeni u paralelu. Izvor: izrada autora

Slika 4.8. prikazuje međusobno paralelno povezane FN module gdje je gornja lijeva slika spoj jednog modula, gornja desna spoj dva paralelna modula, te karakteristike spoja tri i četiri modula nalaze se na donjem dijelu slike lijevo (tri modula) te desno (četiri modula).

FN moduli se obično spajaju kao kombinacija serijskog i paralelnog spoja radi dobivanja željenih izlaznih veličina. Najčešće se moduli spajaju prvo u seriju radi postizanja željenog naponskog nivoa, pa se potom dobiveni niz multiplicira paralelnim spojem do željene izlazne snage [9].

5. ZAKLJUČAK

U ovome radu predstavljena je didaktička oprema kao alternativa praktičnog učenja na stvarnim FN sustavima. Ovakav pristup praktičnom učenju omogućuje proučavanje utjecajnih parametara na proizvodnju električne energije iz FN sustava.

Pokusima su pokazane strujno – naponske karakteristike u kojima se određivao iznos otpora potenciometra te brzina mijenjanja otpora kako bi rezultati pokusa bili ponovljivi, analiza osjetljivosti napona praznog hoda, učinkovitost sustava ($\eta=0.20$) te faktor ispunjenja ($FF=0.69$) iz kojeg se može vidjeti kako skalirani sustav odgovara komercijalnim stvarnim sustavima. Pokusom opterećenja FN modula s različitim trošilima prikazano je postavljanje radne točke tošila na $u - i$ karakteristici uz pretpostavku da je karakteristika trošila linearna.

Također je pokazano da je najveća proizvodnja električne energije pri okomitom položaju izvora svjetla s maksimalnim osvjetljenjem u odnosu na promjenu kuta izvora svjetlosti. Ovo bi odgovaralo stvarnom položaju Sunca kada Sunčeve zrake udaraju okomito na FN module u vremenu maksimalnog Sunčevog zračenja bez naoblake tokom dana (oko podneva). Smanjenjem osvjetljenja te mijenjanjem kuta upada svjetlosnih zraka, maksimalna raspoloživa snaga FN modula se smanjuje. Mijenjanjem ova dva parametra moguće je imitirati utjecaj položaja i zračenja Sunca tokom jednog cijelog dana.

Serijskim spajanjem FN modula postiže se željeni izlazni napon FN niza, gdje se onda dodavanjem istih FN nizova u paralelu postiže željena izlazna snaga povećanjem raspoložive struje. Iz pokusa je uočeno kako prilikom paralelnog spajanja modula ploča ima strujno ograničenje na 200 mA, te se iz tog razloga zračenje smanjivalo sa maksimalnog na $G=635\text{w/m}^2$.

LITERATURA

- [1] Samir Kouro, Jose I. Leon, Dimitri Vinnikov, Leopoldo G. Franquelo, „Grid-Connected Photovoltaic Systems: An Overview of Recent Research and Emerging PV Converter Technology,“ IEEE Industrial Electronics Magazine, Vol: 9, Issue: 1, March 2015.
- [2] João Henrique de Oliveira, João Paulo Ramos Gomes, Wallace do Couto Boaventura, Victor Flores Mendes, „Impact of integrating a photovoltaic power plant in a distribution feeder,“ 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP),“ 16-19 Oct. 2016.
- [3] Ahteshamul Haque, Zaheeruddin, „Research on Solar Photovoltaic (PV) energy conversion system: An overview,“ Third International Conference on Computational Intelligence and Information Technology (CIIT 2013), 18-19 Oct. 2013.
- [4] Zhiqiang Gao, Song Li, Xuesong Zhou, Youjie Ma, „An overview of PV system,“ 2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 7-10 Aug. 2016.
- [5] Cornelis Jan Kikkert, „Towards a sustainable, economic and reliable power grid for Australia,“ IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT-Asia), 4-7 Dec. 2017.
- [6] P. Srinivasa Rao, P. Dinesh, G. Saravana Ilango, Chilakapati Nagamani, „Laboratory course on solar photovoltaic systems based on low cost equipment,“ IEEE International Conference in MOOC, Innovation and Technology in Education (MITE), 20-22 Dec. 2013.
- [7] Andrej Brandis, Denis Pelin, „Multimedia system for e-learning about modulation techniques in three phase voltage inverters,“ International Conference on Smart Systems and Technologies (SST), 18-20 Oct. 2017.
- [8] <https://www.lucas-nuelle.us>, Course – Power Engineering: Photovoltaics, accessed on: 16.6.2018.
- [9] Majdandžić Lj., Solarni sustavi, Zagreb: Graphis d.o.o., (2010).
- [10] Majdandžić Lj., Obnovljivi izvori energije, Zagreb: Graphis d.o. (2008). skripta
- [11] https://www.fer.hr/_download/forum/Paneli_sun%C4%8Danih_%C4%87elija-seminar.pdf - internet izvor, datum zadnje posjete 17.08.2018.

[12] https://hr.wikipedia.org/wiki/Fotonaponski_sustavi internet izvor, datum zadnje posjete 17.06.2018.

[13] <http://agria.hr/obnovljivi-izvori-energije/obnovljivi-izvori-energije-fotonaponski-sustavi-72> internet izvor, datum zadnje posjete 22.08.2018.

[14] <https://www.schrack.hr/know-how/alternativni-izvori/otocni-fn-sustavi/> internet izvor, datum zadnje posjete 02.05.2018.

[15] <https://www.schrack.hr/know-how/alternativni-izvori/osnove-o-fn-celiji-i-modulu/> internet izvor, datum zadnje posjete 02.05.2018.

[16] http://www.ieee.hr/_download/repository/DR08GOreski.pdf internet izvor, datum zadnje posjete 01.09.2018.

[17] <http://reslab.ferit.hr/BISOL%20Produktna%20specifikacija%20BMO%20HR%20-%20mono.pdf> - internet izvor, datum zadnje posjete 20.09.2018.

SAŽETAK

Predloženi su pokusi za učenje o proizvodnji električne energije iz sunčevog zračenja, tj. iz sunca kao obnovljivog izvora energije, korištenjem didaktičke opreme. 24 fotonaponskih (FN) ćelija je fizički spojeno u 4 FN modula, na kojima su snimane $u-i$ karakteristike s obzirom na jačinu svjetlosti i temperaturu, pri čemu su kao dio opreme korišteni umjetni izvor svjetlosti, te senzori za mjerenje temperature i osvijetljenosti. U pokusima su izmjerene strujno – naponske karakteristike. Napravljena je analiza osjetljivosti napona praznog hoda, pokusi učinkovitosti i faktora ispunje FN modula, te opterećenja modula s različitim trošilima. Snimane su i analizirane $u-i$ karakteristike nizova pri serijskom i paralelnom spajanju više FN modula. Provedena je analiza osjetljivosti s obzirom na kut i jačinu svjetlosti u svrhu određivanja optimalne proizvodnje električne energije s obzirom na razmještaj i međusobno spajanje FN modula.

Ključne riječi: obnovljivi izvori energije; fotonaponski sustavi; didaktička oprema; $u-i$ karakteristika

ABSTRACT

TITLE: Demonstration of power electrical energy production connect from photovoltaic cells by using didactic equipment

Experiments for learning about electrical energy production from insolation, i.e. Sun as renewable energy source are proposed by using multimedia equipment. 24 Photovoltaic (PV) cells are physically connected to four PV modules, on which the $v-i$ characteristics are recorded regarding to brightness and temperature. Embedded artificial light source, temperature and irradiance sensors are used in experiments as part of the test equipment. In experiments they carried out current characteristic, the analysis sensitivity of open circuit voltage, the experiments of efficiency and the fill factor, then loads of modules with different consumables. PV $v-i$ strings characteristics are recorded and analysed on various parallel and series PV modules connections. Sensitivity analysis regarding to the light angle and irradiance for the purpose of determining the optimal power production, considering the arrangement and PV modules interconnections is conducted.

Keywords: Renewable energy source, PV system, didactic equipment, $v-i$ characteristic

ŽIVOTOPIS

Alen Hmelina rođen je 31.03.1994. u Osijeku (Hrvatska). Školovanje započinje u Osnovnoj školi Josipovac, u Josipovcu. Pohađao Elektrotehničku i prometnu školu u Osijeku, te stekao zvanje elektrotehničar. Završio Stručni studij elektrotehnike, smjer elektroenergetika u Osijeku te stekao zvanje stručni prvostupnik inženjer elektrotehnike. Student druge godine diplomskog studija elektrotehnika, smjer elektroenergetika na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Sudjelovao na 1. međunarodnoj studentskoj GREEN konferenciji. Posjeduje znanje engleskog jezika, te rad na računalu u različitim programskim alatima (Microsoft Office, AutoCad, LabSoft itd.). Kroz školovanje sudjelovao u raznim sportskim natjecanjima. Dosadašnje iskustvo stekao samostalno radeći kroz školovanje.

Vlastoručni potpis:
