

# Dimenzioniranje fotonaponskog sustava za pokrivanje vlastite potrošnje stambenog objekta

---

Čabrajac, Tomislav

Master's thesis / Diplomski rad

2017

*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:200:040650>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-17**

*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Sveučilišni studij**

**DIMENZIONIRANJE FOTONAPONSKOG SUSTAVA ZA  
POKRIVANJE VLASTITE POTROŠNJE STAMBENOG  
OBJEKTA**

**Diplomski rad**

**Tomislav Čabrajac**

**Osijek, 2017.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada**

Osijek, 22.09.2017.

**Odboru za završne i diplomske ispite****Imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada**

<b>Ime i prezime studenta:</b>	Tomislav Čabrajac
<b>Studij, smjer:</b>	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
<b>Mat. br. studenta, godina upisa:</b>	D 951, 12.10.2015.
<b>OIB studenta:</b>	38471475486
<b>Mentor:</b>	Doc.dr.sc. Danijel Topić
<b>Sumentor:</b>	Izv. prof. dr.sc. Zvonimir Klaić
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Predsjednik Povjerenstva:</b>	Izv. prof. dr.sc. Zvonimir Klaić
<b>Član Povjerenstva:</b>	Zorislav Kraus
<b>Naslov diplomskog rada:</b>	Dimenzioniranje fotonaponskog sustava za pokrivanje vlastite potrošnje stambenog objekta
<b>Znanstvena grana rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak diplomskog rada:</b>	U uvodu diplomskog rada napraviti pregled literature vezane uz integrirane fotonaponske sustave. Opisati metodologiju dimenzioniranja mrežnih fotonaponskih sustava te samostalnih fotonaponskih sustava. Za odabrani stambeni objekt snimiti karakteristične dnevne i tjedne dijagrame opterećenja. Napraviti analizu potrošnje električne energije stambenog objekta. Dimenzionirati mrežni fotonaponski sustav s obzirom na dijagrame
<b>Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):</b>	Izvrstan (5)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
<b>Datum prijedloga ocjene mentora:</b>	22.09.2017.
Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 27.09.2017.

**Ime i prezime studenta:**

Tomislav Čabrajac

**Studij:**

Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika

**Mat. br. studenta, godina upisa:**

D 951, 12.10.2015.

**Ephorus podudaranje [%]:**

2

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Dimenzioniranje fotonaponskog sustava za pokrivanje vlastite potrošnje stambenog objekta**

izrađen pod vodstvom mentora Doc.dr.sc. Danijel Topić

i sumentora Izv. prof. dr.sc. Zvonimir Klaić

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

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

## IZJAVA

Ja, Tomislav Čabrajac, OIB: 38471475486, student/ica na studiju: Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika, dajem suglasnost Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek da pohrani i javno objavi moj **diplomski rad**:

**Dimenzioniranje fotonaponskog sustava za pokrivanje vlastite potrošnje stambenog objekta**

u javno dostupnom fakultetskom, sveučilišnom i nacionalnom repozitoriju.

Osijek, 27.09.2017.

---

potpis

# SADRŽAJ

1	UVOD .....	1
2	FOTONAPONSKI MODUL .....	2
2.1	Fotonaponske ćelije .....	2
2.2	Tehnologije izrade fotonaponskih ćelija.....	3
2.2.1	Kristalni silicij .....	3
2.2.2	Tehnologija tankih filmova .....	4
2.3	Nadomjesna shema fotonaponske ćelije.....	5
2.3.1	Strujno – naponska karakteristika fotonaponske ćelije .....	6
2.3.2	Utjecaj temperature na U-I karakteristiku .....	6
2.4	Tehničke karakteristike fotonaponskog modula.....	7
2.5	Mrežni i samostalni fotonaponski sustavi .....	8
2.5.1	Mrežni fotonaponski sustav .....	8
2.5.2	Samostalni fotonaponski sustav .....	9
2.6	Dimenzioniranje mrežnih fotonaponskih sustava.....	10
2.6.1	Odabir broja modula.....	10
2.6.2	Određivanje karakteristika FN niza.....	10
2.6.3	Odabir izmjenjivača .....	11
2.6.4	Odabir kabela .....	11
3	SNIMANJE PROFILA OPTEREĆENJA STAMBENOG OBJEKTA .....	13
3.1	Korišteni uređaj .....	13
3.2	Dobivene vrijednosti mjerenja.....	13
3.2.1	Potrošnja energije radnim danima.....	15
3.2.2	Potrošnja energije vikendom.....	16
4	SIMULACIJA I PRORAČUN FOTONAPONSKIH SUSTAVA.....	17
4.1	Proračun i simulacija za samostalni fotonaponski sustav.....	21
4.2	Proračun za mrežni fotonaponski sustav .....	28

5 ZAKLJUČAK.....	33
LITERATURA.....	34
SAŽETAK.....	36
ABSTRACT.....	36
ŽIVOTOPIS.....	37

# 1 UVOD

Zadnjih stotinjak godina čovjek iskorištava energiju iz fosilnih goriva kojima je trebalo približno 400 milijuna godina da se formiraju i „uskладиšte“ pod zemljom. Posljednjih godina ulazimo u novo „solarno doba“, što znači da bi trebali uložiti puno truda, što s tehnološke, što s političke strane kako bi razvijali energetske sustave koji korisno iskorištavaju sunčevu energiju. Uređaji koji nam koriste u tom iskorištavanju sunčeve energije su fotonaponski moduli, koji su u ovom diplomskom radu zapravo osnovno polazište.

Sunce na našu planetu neprestano šalje gotovo nezamislivu količinu energije –  $10^{17}$  W svake sekunde. Kako bi se dobio osjećaj veličine – to znači da u malo manje od sat vremena Sunce na planet Zemlju pošalje toliko količinu energije koja se na planetu Zemlji potroši u jednoj godini. Gustoća sunčevog zračenja (snaga koju zrake sunca donose na površinu Zemljine atmosfere po jedinici površine) koju još nazivamo i solarna konstanta iznosi  $1366 \text{ W/m}^2$ . 30 % te vrijednosti se gubi prolaskom kroz atmosferu što znači da pri potpuno čistom danu na razini mora Sunce donosi energiju od  $1000 \text{ W/m}^2$ .

Zadnjih godina postoji trend ugradnje fotonaponskih modula na stambene objekte kako bi se povećala kvota proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije. Uz brojna sufinancijaranja od strane Europske unije sve se više ugrađuju fotonaponski moduli na stambene objekte kako bi se namirila potreba za električnom energijom samog stambenog objekta.

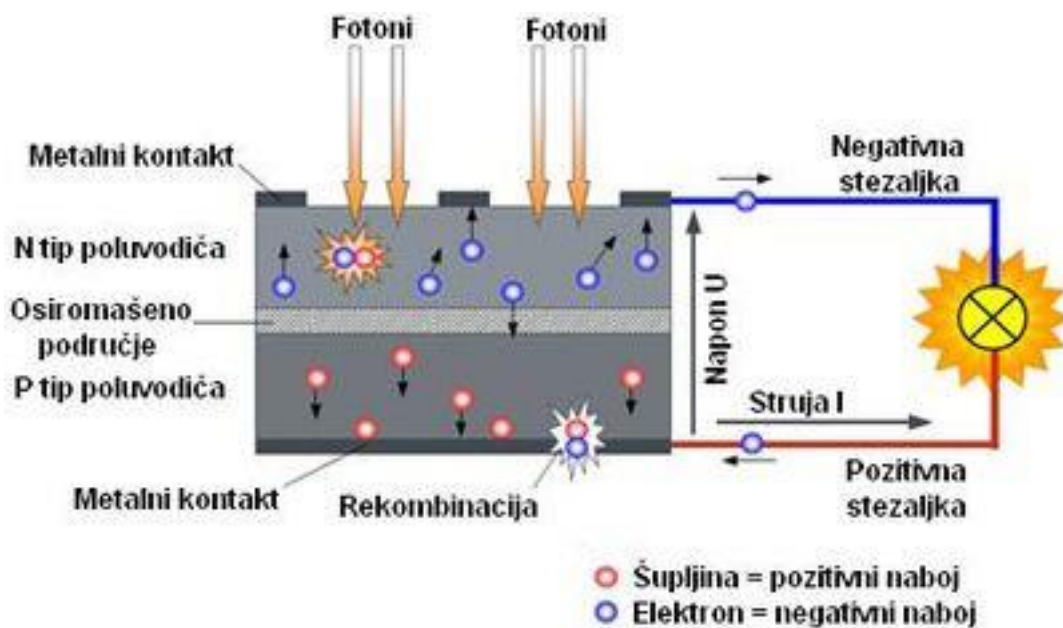


## 2 FOTONAPONSKI MODUL

Fotonaponski modul je naziv za ploču ili panel sastavljen od grupe fotonaponskih ćelija koje su sastavljene od još manjih fotonaponskih članaka.

### 2.1 Fotonaponske ćelije

Fotonaponske ćelije su poluvodički uređaji koji pretvaraju sunčevu energiju direktno u električnu energiju na načelu fotoelektričnog efekta. Na slici 2.1. je prikazan princip rada fotonaponske ćelije.



*Slika 2.1.: Prikaz rada fotonaponske ćelije [2]*

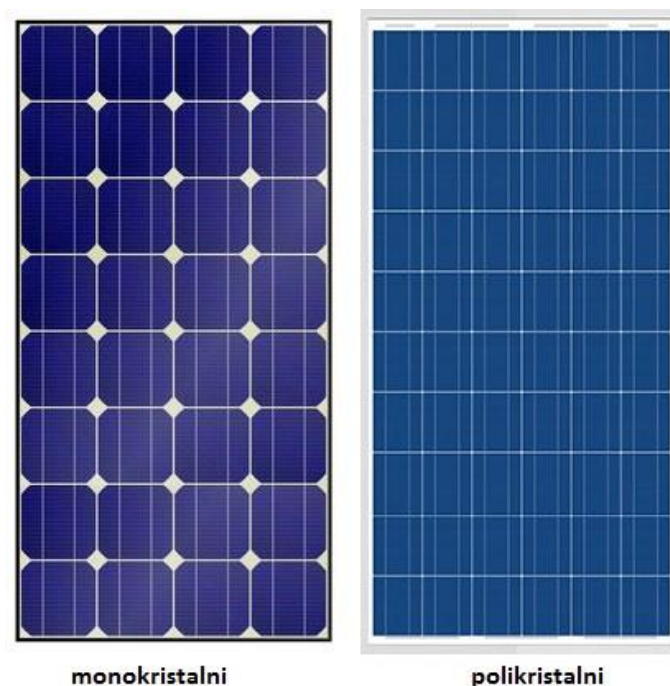
Princip rada fotonaponske ćelije je takav da kad svjetlost pada na sunčanu ćeliju, ona razdvaja nositelje naboja unutar poluvodiča te svaki od nositelja naboja (pozitivni i negativni) odlazi na jedan kraj fotonaponske ćelije tj. na pozitivnu ili negativnu elektrodu. Ako se na vanjske stezaljke spoji trošilo, kroz njega proteče struja te se sunčeva energija preko električne energije pretvorila u neki drugi oblik energije ovisno o vrsti trošila. Međusobnim spajanjem fotonaponskih ćelija tvori se fotonaponski modul koji je osnova svakog fotonaponskog sustava.

## 2.2 Tehnologije izrade fotonaponskih ćelija

1883. godine Charles Fritts je izradio prvu fotonaponsku ćeliju i to tako što je poluvodič selen prekrio tankim slojem zlata. Od tada do danas su se razvile mnoge tehnologije izrade fotonaponskih ćelija, a osnovni element pri proizvodnji fotonaponskih ćelija je kristalni silicij.

### 2.2.1 Kristalni silicij

Kristalni silicij danas predstavlja osnovu pri proizvodnji fotonaponskih ćelija zbog najboljeg omjera njegovih fizičkih i kemijskih svojstava. Razlikujemo 3 tehnologije izrade fotonaponskih ćelija od kristalnog silicija, a to su: monokristalni silicij, polikristalni silicij i trakasti silicij. Tehnologija monokristalnog silicija je najskuplja od navedenih tri, ali i najefikasnija. Proizvodi se iz jednog kristala rezanjem iz cilindričnih poluga. Polikristalni silicij ima nižu cijenu, ali i nižu efikasnost. Proizvode se iz lijevanih pravokutnih poluga, a prema zadnjim istraživanjima prodaja polikristalnog silicija je pretekla prodaju monokristalnog silicija. Tehnologija trakastog silicija pripada u grupu polikristalnog silicija no on se proizvodi izvlačenjem tankih ravnih filmova iz rastaljenog silicija, imaju još nižu efikasnost, ali su i troškovi izrade manji zbog smanjenog silicijskog otpada. Na slici 2.2. je prikazana razlika u tehnologiji izrade fotonaponskih modula između monokristalnog i polikristalnog silicija.



*Slika 2.2.: Razlika u tehnologiji izrade fotonaponskih modula iz kristalnog silicija [3]*

## 2.2.2 Tehnologija tankih filmova

Ovom tehnologijom se smanjuje količina materijala koja je potrebna za proizvodnju fotonaponske ćelije. Iako ova tehnologija umanjuje troškove, isto tako se smanjuje i efikasnost same ćelije. Postoji nekoliko tehnologija tankog filma, osim silicija to su: Kadmij-telurid, bakar-indij-galij-selen, višespojni galij-arsenid i još neke. Jedna od važnih prednosti ove tehnologije je fleksibilnost, što znači da se fotonaponski moduli mogu po želji oblikovati i prilagođavati.

### 2.2.2.1 Kadmij telurid

Tehnologija kadmij telurid fotonaponske ćelije ili skraćeno CdTe su jedina tehnologija koja cijenom može parirati tehnologiji izrade fotonaponskih ćelija od silicija. Nedostatak je što je kadmij toksičan, a telurij je u prirodi ograničen.

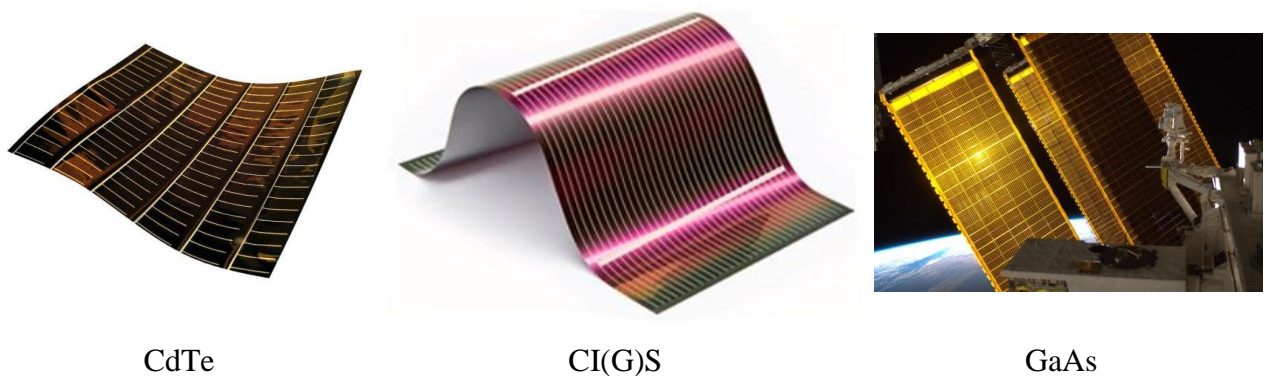
### 2.2.2.2 Bakar indij galij selen

Ova tehnologija ima veliku efikasnost koja se kreće oko 20 %, a proizvodi se u vakuumu umjetnim isparavanjem i raspršivanjem.

### 2.2.2.3 Galij arsenid

Najskuplja tehnologija izrade ali i rekordno najefikasnija sa 28,8 % efikasnosti (jednospojni). Prvotno su razvijene za satelitske i potrebe svemira. Trostruko spojna metamorfna ćelija bazirana na galij arsenid tehnologiji je 2010. Postigla rekord od 42,3 % efikasnosti.

Na slici 2.3. su prikazane fotonaponske ćelije različitih tehnologija izrade.



*Slika 2.3.: Prikaz različitih tehnologija tankog filma [4][5][6]*

## 2.3 Nadomjesna shema fotonaponske ćelije

Fotonaponska ćelija je ustvari realni strujni izvor zato što je jakost struje tog izvora proporcionalna sunčevom zračenju. Izlaznu struju tog izvora dobijemo tako da se od struje koju proizvodi sunčeva svjetlost  $I_{fs}$  oduzme struja diode  $I_d$  i struja kroz paralelno spojeni šant  $I_p$ .

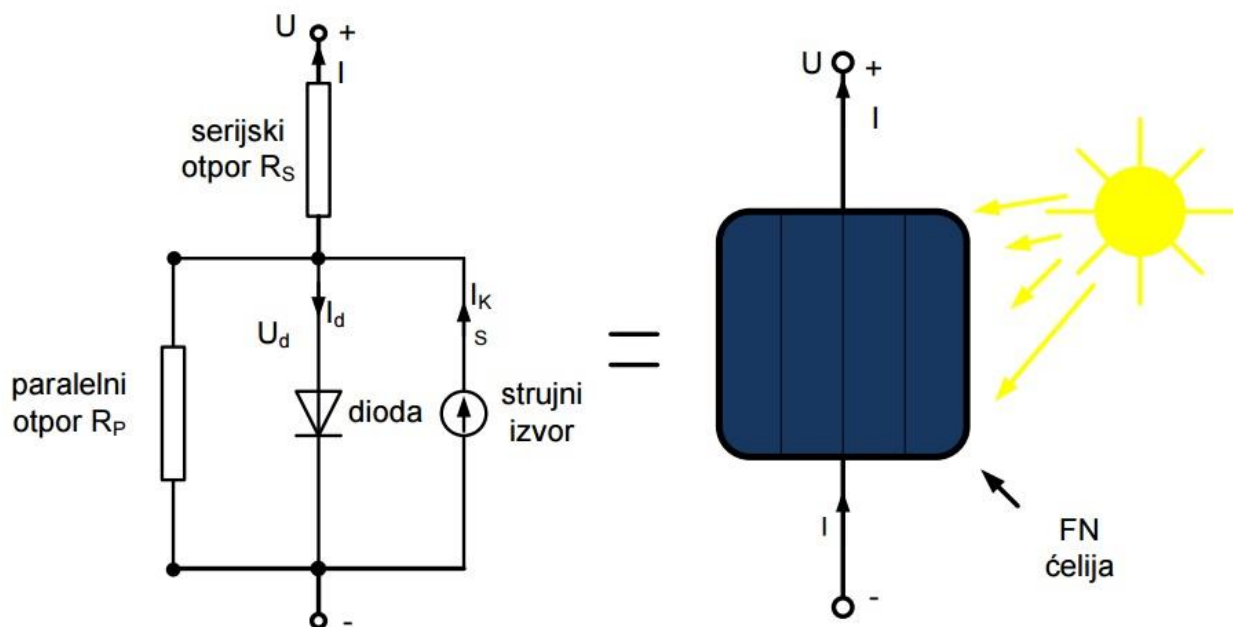
$$I = I_{fs} - I_d - I_p = I_{fs} - I_0 \left[ e^{\frac{e(U+IR_s)}{mKT}} - 1 \right] - \frac{U}{R_p}$$

Otpor šanta je velik pa možemo zanemariti struju  $I_p$ , pa dobijemo:

$$I = I_{fs} - I_0 \left[ e^{\frac{e(U+IR_s)}{mKT}} - 1 \right]$$

Gdje su:  $U$  - napon,  $R_p$  - paralelni otpor FN ćelije,  $I_0$  - struja zasićenja,  $e$  - elementarni naboj,  $R_s$  - serijski otpor FN ćelije,  $m$  - parametar FN ćelije,  $k$  - Boltzmannova konstanta,  $T$  - apsolutna temperatura.

Na slici 2.4. je prikazana nadomjesna shema fotonaponske ćelije, gdje vidimo da je ona načinjena od 4 električna elementa: serijskog otpora  $R_s$ , paralelnog otpora  $R_p$ , diode i strujnog izvora.



Slika 2.4.: Nadomjesna shema FN ćelije [7]

### 2.3.1 Strujno – naponska karakteristika fotonaponske ćelije

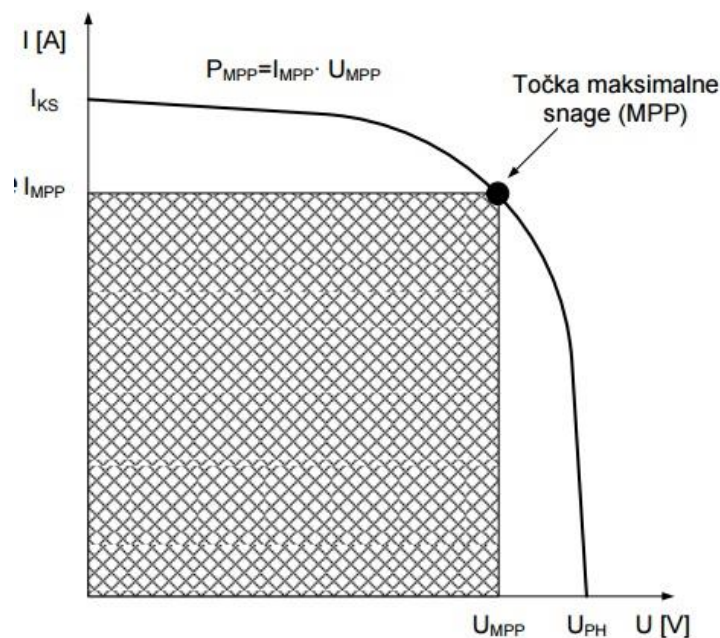
Strujno – naponska karakteristika, kako joj i samo ime kaže prikazuje ovisnost struje o naponu fotonaponske ćelije. Sama karakteristika ima na sebi 3 karakteristične točke a to su:

1. Točka kratkog spoja – označava vrijednost struje kad su stezaljke kratko spojene, pri tome je napon  $U=0$ , a  $I_{KS}=I_{fs}$
2. Točka praznog hoda – označava vrijednost napona pri otvorenim stezaljkama

$$U_{PH} = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{I_{KS}}{I_0} + 1\right)$$

3. Točka maksimalne snage – točka u kojoj se postiže maksimalna snaga na trošilu

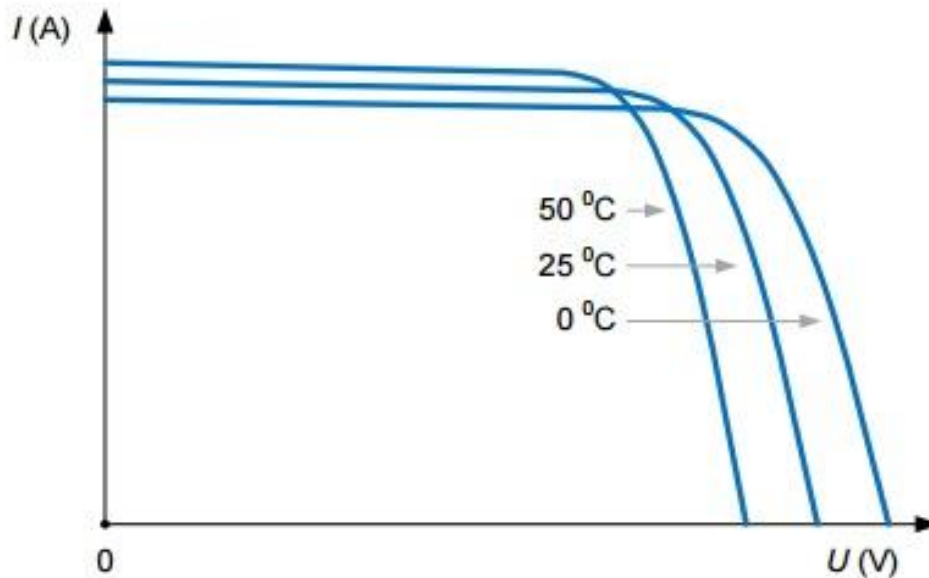
Te tri karakteristične točke su prikazane na slici 2.5.



*Slika 2.5.: Strujno naponska karakteristika fotonaponskog modula [7]*

### 2.3.2 Utjecaj temperature na U-I karakteristiku

Stupanj djelovanja fotonaponske ćelije opada s porastom temperature i to skoro 0,5 % po 1 °C, zbog toga treba pri instalaciji fotonaponskih modula obratiti pozornost i na taj segment. Također temperatura utječe i na izgled U-I karakteristike što možemo vidjeti na slici 2.6.



*Slika 2.6.: Ovisnost FN ćelije o temperaturi [7]*

Struja diode  $I_d$  je funkcija koja uvelike ovisi o temperaturi ćelije, zbog čega ukupna struja fotonaponske ćelije pokazuje negativnu promjenu napona praznog hoda o ovisnosti temperaturi.

$$T_{\text{ćel}} = T_{\text{okoline}} + \left( \frac{\text{NOCT} - 20^\circ}{0,8} \right) \times G$$

Gdje su:

*NOCT* – nominalna radna temperatura ćelije kada je temperatura okoline  $20^\circ\text{C}$  (tvornički podatak)

$G$  – sunčevo zračenje ( $\text{kW/m}^2$ )

## 2.4 Tehničke karakteristike fotonaponskog modula

Tehničke karakteristike fotonaponskog modula zapravo su odraz karakteristika ćelija od kojih su izgrađeni. Te karakteristike se definiraju za standardne testne uvjete (*STC*). Karakteristike su sljedeće:

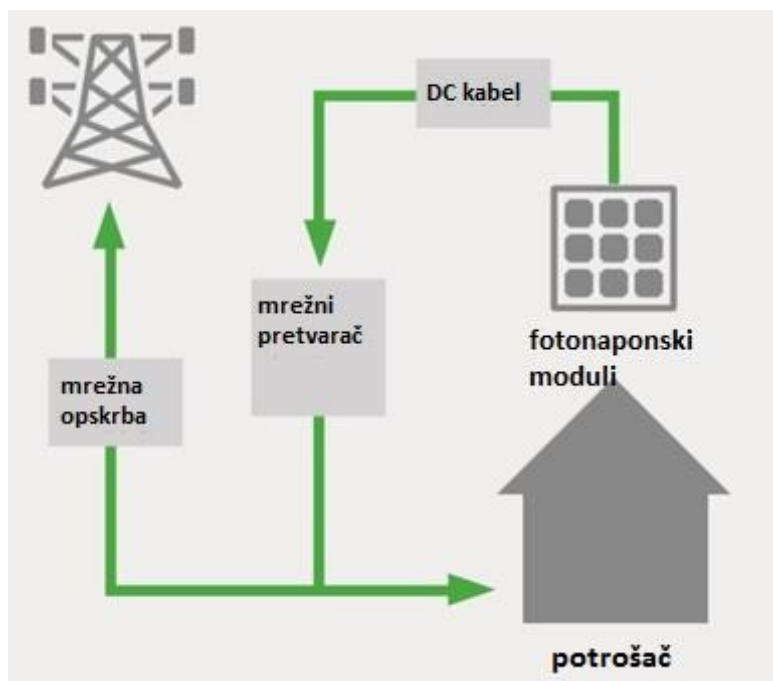


## 2.5 Mrežni i samostalni fotonaponski sustavi

### 2.5.1 Mrežni fotonaponski sustav

Mrežni sustav je fotonaponski sustav direktno povezan sa mrežom, proizvedena energija se direktno pušta u mrežu. U zadnje vrijeme su česti 10 kW fotonaponski sustavi na kućama jer su upravo ti sustavi trenutno u sustavu poticaja. Jednostavna shema ovakvog sustava prikazana je na slici 2.7.

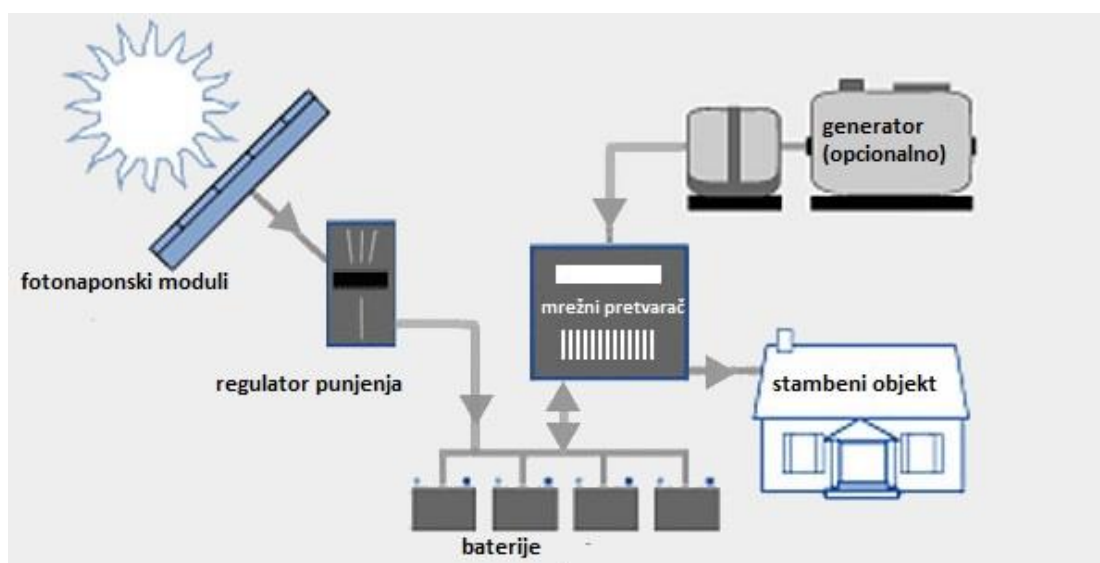




*Slika 2.7.: Shematski prikaz mrežnog fotonaponskog sustava [8]*

### 2.5.2 Samostalni fotonaponski sustav

Samostalni fotonaponski sustav je sustav koji funkcionira samostalno, nije povezan s mrežom. Dodatne investicije kod ovog sustava su baterije (i regulator punjenja baterija), koje su još uvijek vrlo skupe. Ovaj način spajanja se često koristi na mjestima gdje nije moguće provesti trasu električnih vodova, ili je ona krajnje neisplativa (npr. vikendice). Na slici 2.8. shematski je prikazan samostalni fotonaponski sustav sa pomoćnim generatorom u slučaju kvara na fotonaponskom sustavu.



*Slika 2.8.: Samostalni fotonaponski sustav s pomoćnim generatorom [9]*



Ovakav tip sustava se najviše koristi za stambene objekte koji nisu u funkciji cijelu godinu (vikendice, vile apartmani) ili pri gradnji energetske neovisne kuće.

## 2.6 Dimenzioniranje mrežnih fotonaponskih sustava

Kako bi prilagodili potrebnu snagu fotonaponskog sustava dobivenoj krivulji potrošnje, potrebno je izvršiti proračun i prema njemu napraviti odabir dijelova fotonaponskog sustava.

### 2.6.1 Odabir broja modula

Potreban broj modula određujemo tako da izračunom dobivenu potrebnu snagu podijelimo sa snagom jednog modula.

$$n = \frac{P_{potrebno}}{P_{MPP}}$$

Površinu fotonaponskog sustava jednostavno dobijemo tako da pomnožimo broj modula sa površinom jednog modula.

$$A_{FN} = A_{modul} \cdot n$$

### 2.6.2 Određivanje karakteristika FN niza

Prvi korak pri određivanju karakteristika fotonaponskog niza je određivanje vrijednosti napona praznog hoda i napona vršne snage za maksimalnu i minimalnu vrijednost temperature fotonaponskog modula, a te pretpostavljene temperature iznose  $T_{min} = -10 \text{ °C}$  i  $T_{max} = +70 \text{ °C}$ . Za referentnu temperaturu se uzima vrijednost  $T_{STC} = 25 \text{ °C}$ . Maksimalni napon praznog hoda nastupa pri minimalnoj temperaturi, a određuje se po izrazu:

$$U_{PH,maks} = U_{PH} + \beta(T_{STC} - T_{min})$$

Nadalje, minimalni i maksimalni naponi vršne snage su:

$$U_{MPP,min} = U_{MPP} + \beta(T_{STC} - T_{maks})$$

$$U_{MPP,maks} = U_{MPP} + \beta(T_{STC} - T_{min})$$

Za konačnu maksimalnu vrijednost napona modula  $U_{m,maks}$  uzima se veća vrijednost između  $U_{PH,maks}$  i  $1,2 \cdot U_{PH}$ .

Nadalje, broj modula u fotonaponskom nizu se određuje da se prvotni broj modula  $n$  podijeli s brojem nizova  $j$ .

Maksimalni napon praznog hoda fotonaponskog niza  $U_{PH,n,maks}$  prema tome iznosi:

$$U_{PH,n,maks} = m \cdot U_{m,maks}$$

Napon vršne snage fotonaponskog niza  $U_{MPP,n}$ :

$$U_{MPP,n} = m \cdot U_{MPP}$$

Struja vršne snage niza  $I_{MPP,niz}$  jednaka je struji vršne snage modula  $I_{MPP}$  jer su moduli u nizu spojeni serijski.

Minimalni i maksimalni napon vršne snage fotonaponskog niza  $U_{MPP,n,maks}$  i  $U_{MPP,min}$ :

$$U_{MPP,n,maks} = m \cdot U_{MPP,maks}$$

$$U_{MPP,n,min} = m \cdot U_{MPP,min}$$

### 2.6.3 Odabir izmjenjivača

Pri odabiru izmjenjivača potrebno je obratiti pozornost na tehničke podatke sa natpisne pločice izmjenjivača kao što su: Ulazna nazivna snaga  $P_{DC}$ , područje rada na DC strani, maksimalni ulazni napon na DC strani, maksimalna ulazna struja na DC strani, faktor snage, nazivna frekvencija i još mnogi.

Detaljnije, zbroj maksimalnih napona praznog hoda fotonaponskih modula niza mora biti manji od maksimalno dopuštenog ulaznog napona na izmjenjivaču. Također, zbroj minimalnih napona fotonaponskih modula u radnoj točki u nizu mora biti veći od minimalno dopuštenog ulaznog napona, odnosno unutar opsega radnog napona, kao i maksimalni napon u radnoj točki.

### 2.6.4 Odabir kabela

Pri odabiru kabela na DC strani potrebno je zadovoljiti uvjet:

$$I_{zDC} = 1,25 \cdot I_{KS}$$

Gdje je  $I_{z,DC}$  – maksimalna struja koju kabel može podnijeti uz uračunati utjecaj temperature i načina instalacije na smanjenje nazivne struje.

Kabel na AC strani mora zadovoljiti uvjet:

$$I_{zAC} > \frac{P_i}{U_{AC} \cos \phi}$$

### 3 SNIMANJE PROFILA OPTEREĆENJA STAMBENOG OBJEKTA

Za snimanje profila opterećenja stambenog objekta odabrana je privatna kuća u kojoj žive 2 osobe odabrana zbog pristupačnosti iste. Snimanje će se vršiti u trajanju od 7 dana s vremenom uzorkovanja svakih 10 minuta.

#### 3.1 Korišteni uređaj

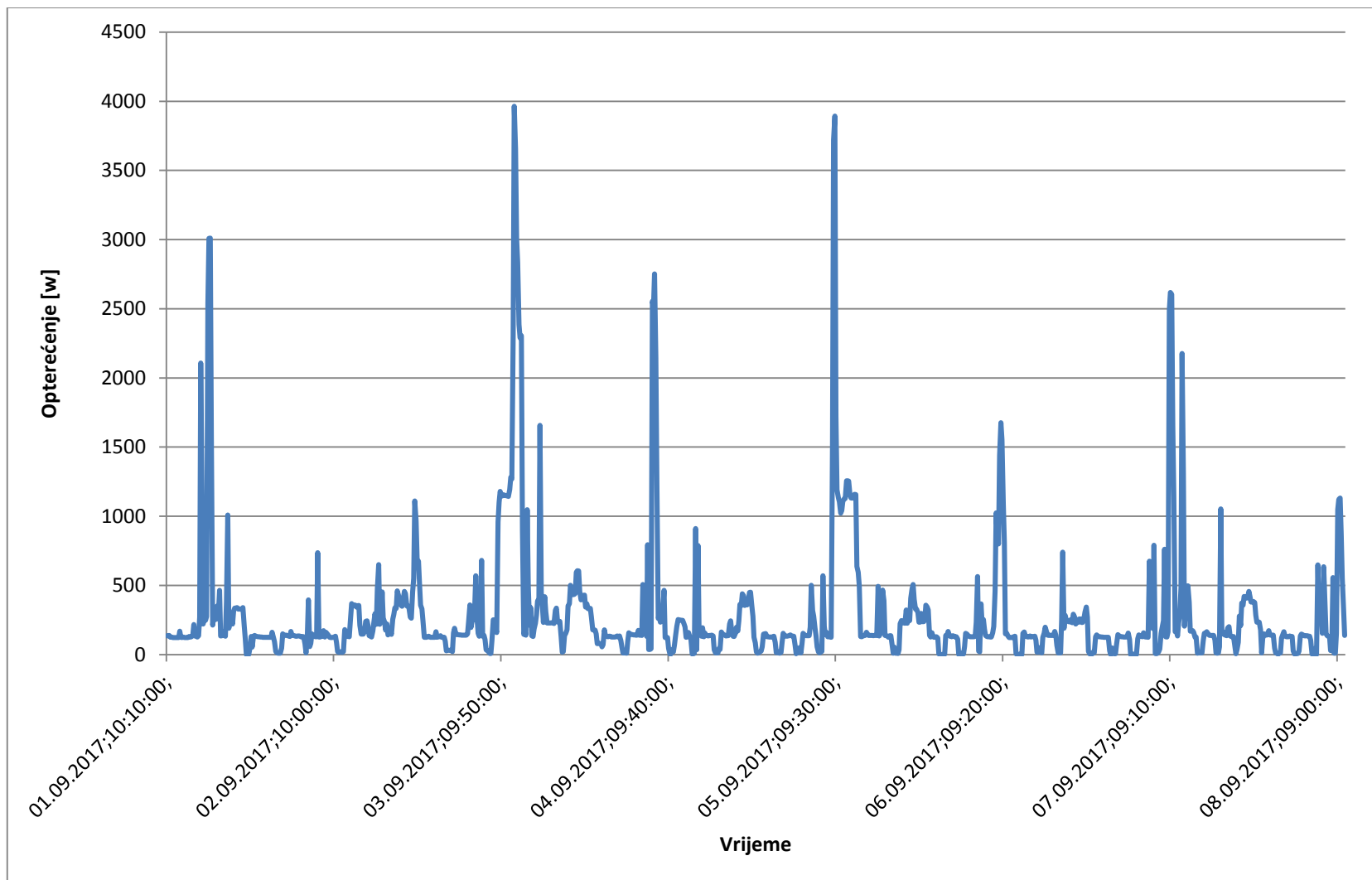
Uređaj koji je korišten za mjerenje potrošnje stambenog objekta je FLUKE 1745 Power Quality Logger, kojega se može vidjeti na slici 3.1.. Njegove naponske stezaljke i strujna kliješta smo spojili na tri faze i nulu u kućnom priključnom ormariću kako bi izmjerili potrošnju električne energije. Mjerenje je trajalo točno 7 dana, a obavljalo se iz razloga kako bi se dobio uvid u potrošnju električne energije objekta, kako bi se prema tim vrijednostima mogao dimenzionirati fotonaponski sustav koji će služiti za snabdijevanje vlastite potrošnje.



*Slika 3.1.: Uređaj za mjerenje kvalitete električne energije FLUKE 1745 [11]*

#### 3.2 Dobivene vrijednosti mjerenja

Nakon što je prethodno navedeni uređaj tjedan dana bilježio potrošnju s intervalom mjerenja od 10 minuta, dobiveni su sljedeći grafovi potrošnje električne energije za stambenu građevinu, prikazani na slici 3.2..

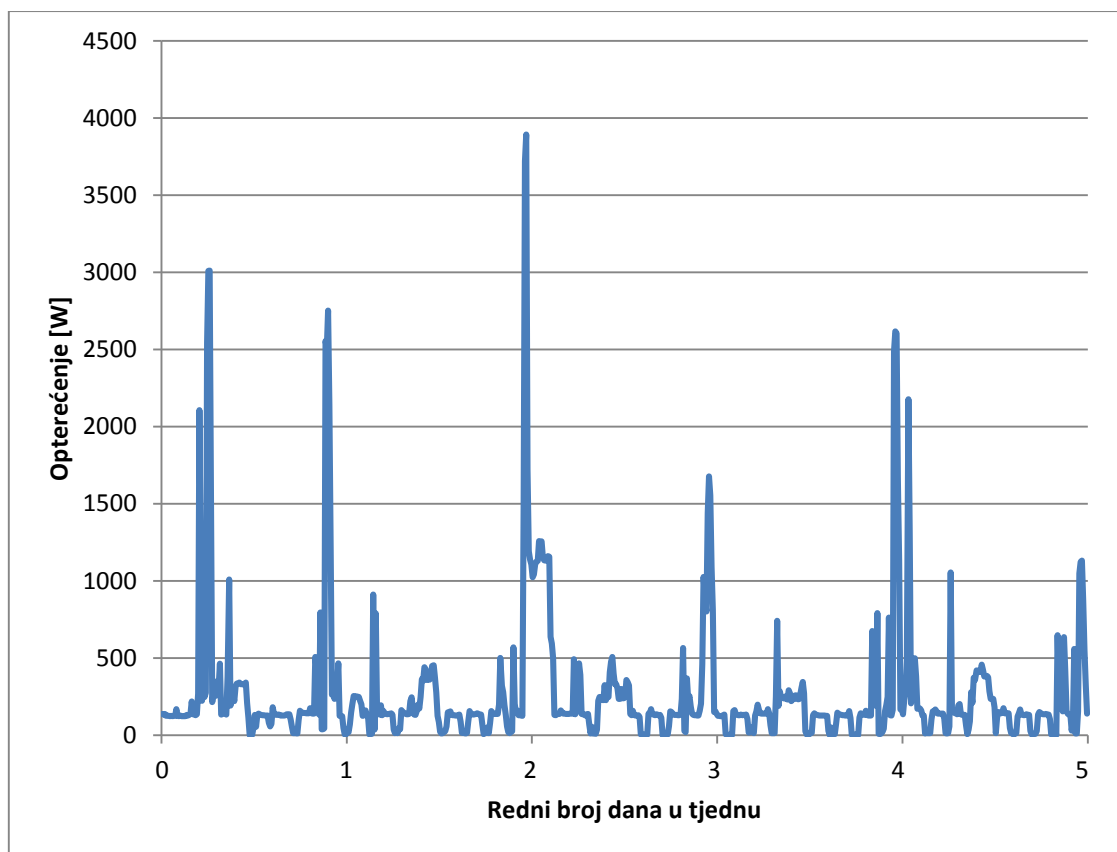


*Slika 3.2.: Tjedni dijagram opterećenja stambenog objekta*

Gledajući graf, potrošnja energije je relativno mala, no to je otprilike i očekivano, budući da u kući borave 2 osobe te da ne traje sezona grijanja. Ukupno potrošena energija u tjednu mjerenja iznosi 48,892 kWh. Budući da godina ima 52 tjedna, množenjem potrošene energije u tjednu, i broja tjedana u godini simulirat ćemo godišnju potrošnju energije kućanstva. Prema tome, godišnja potrošena energija iznosi 2542,38 kWh.

### 3.2.1 Potrošnja energije radnim danima

Na slici 3.3. prikazan je dijagram potrošnje električne energije stambenog objekta radnim danima, počevši od petka u 10:00h.

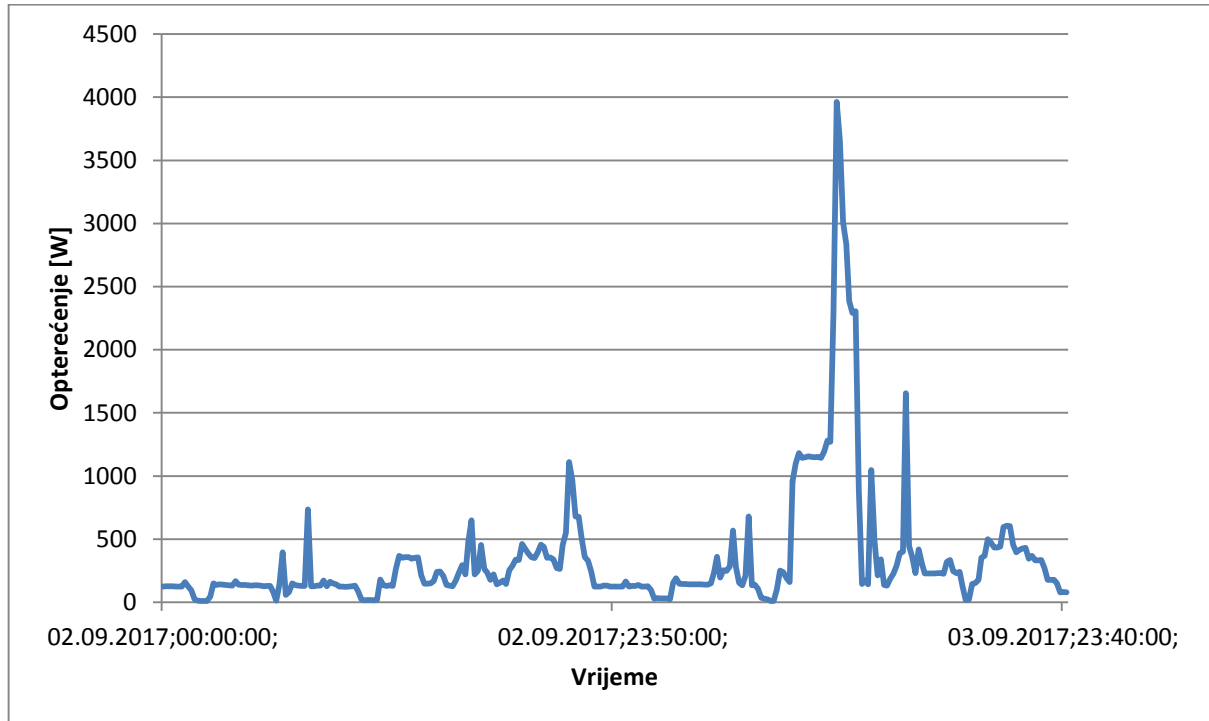


*Slika 3.3.: Dijagram tjedne potrošnje radnim danima*

Maksimum potrošnje dosegnut je u iznosu od 3893 W, uz još par dnevnih vrhova za koje je vjerojatno zaduženo paljenje električnog štednjaka. Minimalna potrošnja s iznosom jednakim nuli je dostignuta preko 10 puta.

### 3.2.2 Potrošnja energije vikendom

Na slici 3.4. prikazan je dijagram potrošnje električne energije stambenog objekta za vikend, počevši od subote u 00:00h.



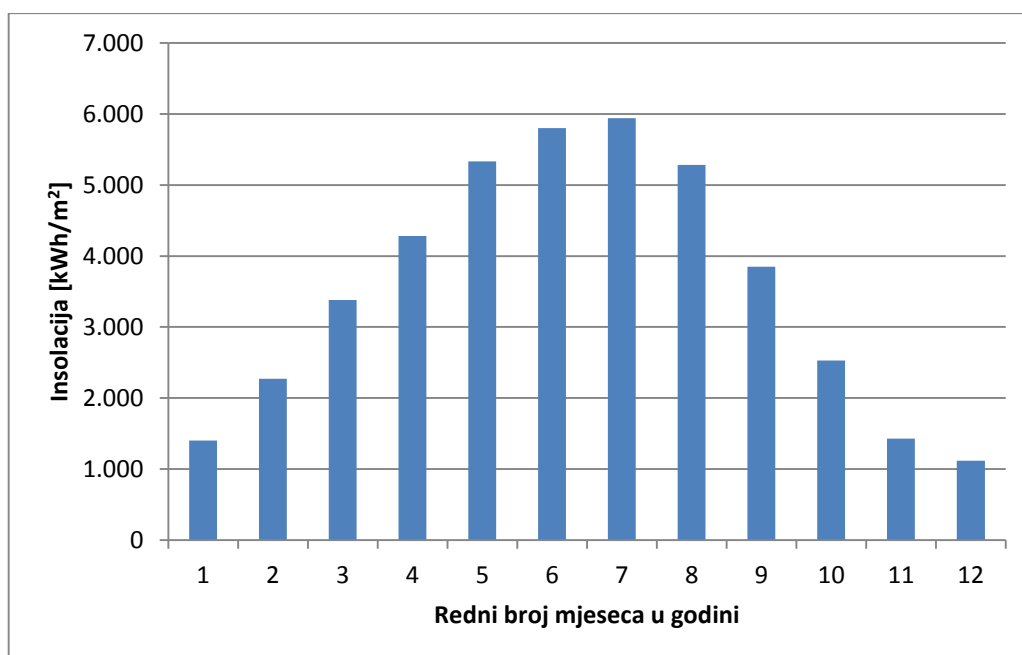
*Slika 3.4.: Prikaz potrošnje električne energije vikendom*

Maksimum potrošnje električne energije vikendom postignuta je u iznosu od 3962 W, dok je minimum potrošnje s iznosom bliskim nuli izmjeren više puta tokom vikenda. Budući da je maksimum potrošnje dostignut u nedjelju u kasnijim jutarnjim satima, pretpostavlja se da je za to zaslužno paljenje električne pećnice, uz istovremeni rad električnog štednjaka.

## 4 SIMULACIJA I PRORAČUN FOTONAPONSKIH SUSTAVA

Proračune za najpovoljniju kombinaciju fotonaponskog sustava ćemo vršiti pomoću programskog softvera HOMER Pro, i to za 2 opcije: sustav priključen na mrežu te autonomni sustav (otočni pogon). Glavni uvjet odabira sustava pri simuliranju je bila povoljnost samog sustava. U program su unošeni različiti parametri fotonaponskih sustava, izmjenjivača i baterija temeljenih na unaprijed odabranim stvarnim proizvodima koji su se pokazali najpraktičnijima za dimenzioniranje. Za samostalni fotonaponski sustav unošeni su parametri fotonaponskih modula kao što su snaga, vijek trajanja, pad snage kroz godine i temperaturni radni opseg. Za izmjenjivač su unošeni parametri kao što su snaga i vijek trajanja, a za baterije je najbitniji parametar bio vijek trajanja jer se u programu modeliralo sa baterijom od 1 kWh. Nakon odrađivanja simulacije, dodavali su se novi bliski parametri, tj. primjerice ako je dobiveni najpovoljniji sustav imao vrijednost snage fotonaponskih modula blisku najnižoj ponuđenoj, bilo je dodano još novih opcija manje snage fotonaponskih modula te se ponovno odrađivala simulacija kako bi se utvrdilo da je dobivena opcija sigurno najpovoljnija. Isto to se radilo i za baterije i za mrežni pretvarač. Kada se radio proračun za mrežni fotonaponski sustav, bilo je potrebno dodati u sustav i mrežu koja će otkupljivati proizvedenu energiju ili namiriti potrebnu električnu energiju kada fotonaponski sustav ne može isporučiti dovoljnu količinu iste.

U program su unošeni podaci o insolaciji za grad Osijek, što je prikazano na slici 4.1.

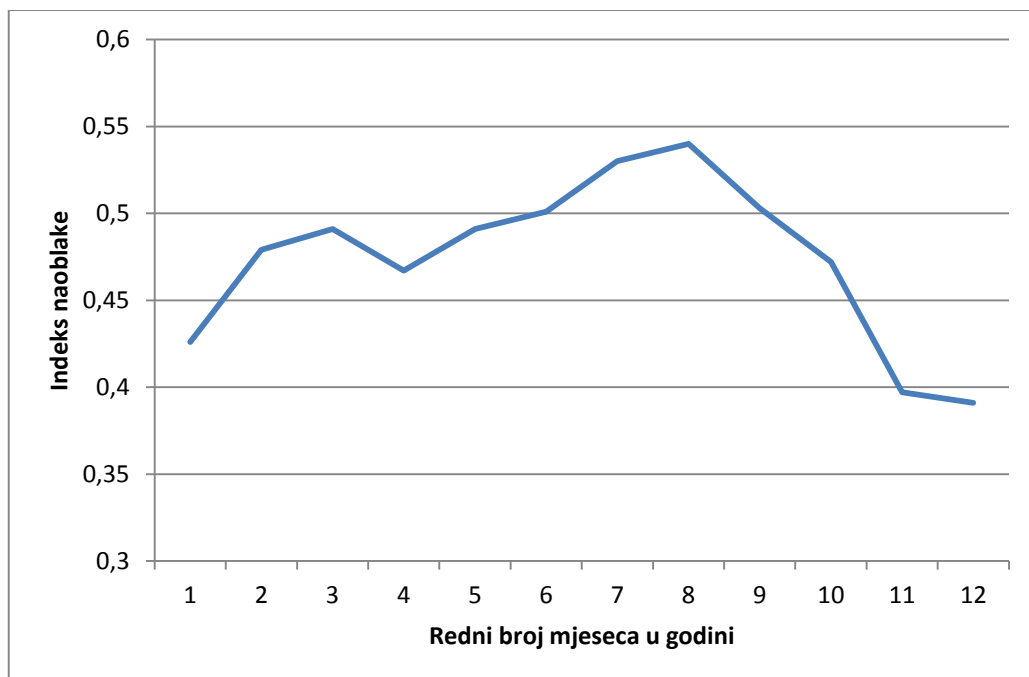


*Slika 4.1.: Prosječna mjesečna insolacija za grad Osijek*



Po dobivenom grafu insolacije vidimo da je maksimum insolacije, odnosno najviše energije dolazi na površinu fotonaponskih modula u mjesecu srpnju, gotovo  $6 \text{ kWh/m}^2$ , a najmanje u mjesecu prosincu kada dolazi tek nešto više od  $1 \text{ kWh/m}^2$ . Problem samostalnog sustava s baterijama u zimskim mjesecima kada je sunca višestruko manje nego u ljetnim mjesecima, ali i to da ljeti ostaje puno neiskorištenog potencijala za iskorištavanje sunčeve energije.

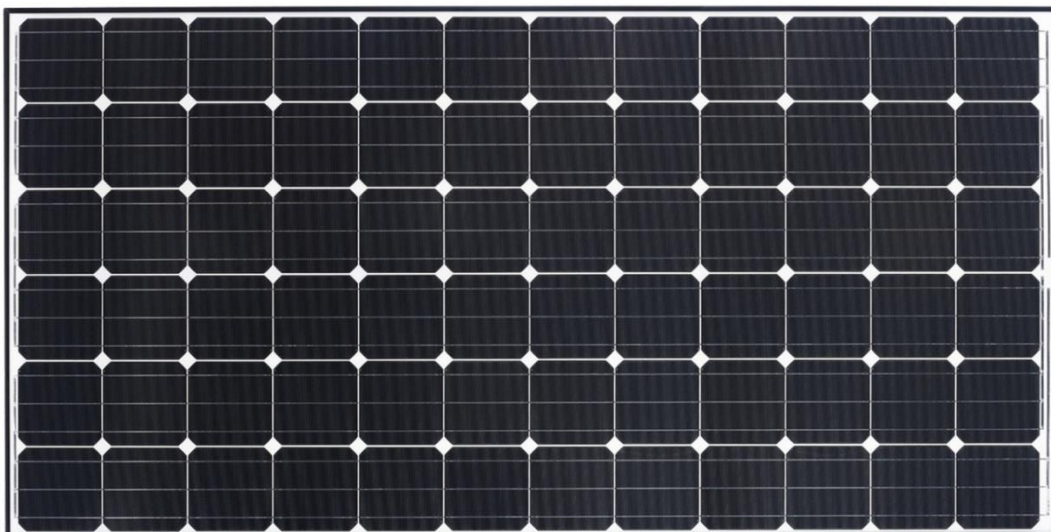
Na slici 4.2. prikazan je koeficijent koji nam govori o naoblaci po mjesecima, tj. omjer vedrih dana i oblačnih dana po mjesecima.



*Slika 4.2.: Prikaz odnosa vedrih i oblačnih dana po mjesecima*

Pri dimenzioniranju fotonaponskih sustava, osim insolacije, bitno je uzeti i indeks naoblake, jer pri naoblaci snaga fotonaponskih modula značajno opada, a kod nekih sustava je bitno primjerice održati kapacitet baterije na određenom nivou, što nebi bilo moguće ukoliko bi sustav bio manje snage, a dođe do dugotrajnije naoblake.

Odabrani fotonaponski modul prikazan na slici 4.3. je monokristalični BISOL BMO-280, snage 280 W, čiji su tehnički podaci prikazani u tablici 4.1.. Razlog odabira je ponajviše visoka učinkovitost i najbolji omjer cijene i kvalitete.



*Slika 4.3.: Fotonaponski modul BISOL BMO-280 [12]*

*Tablica 4.1.: Tehnički podaci za fotonaponski modul BISOL BMO-280*

Mjerena veličina	Oznaka	Vrijednost
Nazivna snaga	$P_{MPP}$	280 W
Struja kratkog spoja	$I_{SC}$	9,35 A
Napon praznog hoda	$U_{OC}$	39,9 V
Struja u točki maksimalne snage	$I_{MPP}$	9 A
Napon u točki maksimalne snage	$U_{MPP}$	31,1 V
Učinkovitost modula	$\eta_M$	17,1 %
Temperaturni koeficijent promjene napona	$\beta$	-0,3 %/K
Temperaturni opseg	-	-40 °C do +85 °C
Površina	A	1,634 m <sup>2</sup>

Odabrani izmjenjivač prikazan na slici 4.4. je SMA Sunny Boy 5000TL vršne snage 5200 W, čiji tehnički podaci su prikazani u tablici 4.2..



*Slika 4.4.: Mrežni pretvarač SMA Sunny Boy 5000TL [13]*

*Tablica 4.2.: Tehničke karakteristike za mrežni pretvarač SMA Sunny Boy 5000TL*

Mjerna veličina	Iznos
Maksimalna ulazna snaga	5250 W
Ulazni naponski radni opseg u točki maksimalne snage	175-500 V
Maksimalni ulazni napon	750 V
Maksimalna ulazna struja	15 A
Nominalna izlazna snaga	4600 W
Opseg izlaznog napona	180-280 V
Maksimalna učinkovitost	97 %
Europska učinkovitost	96,5 %

Odabrane solarne baterije su Victron Energy GEL 12 V 110 Ah kapaciteta 1,32 kWh primjer koje možemo vidjeti na slici 4.5. Odabrane su ove baterije iz razloga što imaju dug životni vijek (proizvođač garantira 12 godina) te nam odgovara takva vrijednost kapaciteta za lakše dimenzioniranje sustava za pohranu energije. Baterije su izrađene u gel tehnologiji, tj elektrolit je

u obliku gela, što sprječava njegovo curenje van kućišta, a istovremeno produljuje vijek trajanja baterije. Tehničke karakteristike baterije prikazane su u tablici 4.3..



*Slika 4.5.: Solarna akumulatorska baterija Victron energy GEL 12V 110Ah [14]*

*Tablica 4.3.: Tehničke karakteristike baterije Victron energy BAT412101104*

Mjerna veličina	Iznos
Nazivni kapacitet	110 Ah
Nazivni napon	12 V
Dimenzije	330x171x220 mm
Težina	33 kg

#### 4.1 Proračun i simulacija za samostalni fotonaponski sustav

Proračun i simulacija za sustav odvojen od mreže, tzv. samostalni fotonaponski sustav će se izvršiti u programskom paketu Homer pro, i to na 3 načina ovisno o pretpostavci trajanja prestanka opskrbe u godini: za 0 %, 5 % i 10 %.

Najpovoljniji samostalni fotonaponski sustav sa 0 % prestanka opskrbe se sastoji od fotonaponskih modula ukupne snage 18,2 kW, baterije od 26 kWh i izmjenjivača snage 5,2 kW sa ukupnom cijenom od 27.704 \$.

Budući da je snaga jednog modula jednaka 280 W, znači da bi nam trebalo 65 takvih modula kako bi zadovoljili uvjet.

$$\frac{18,2 \text{ kW}}{0,28 \text{ kW}} = 65 \text{ modula}$$

Potrebna površina za sustav:

$$A_{FN} = A_{modul} \cdot n$$

$$A_{FN} = 1,634 \text{ m}^2 \cdot 65 = 106,21 \text{ m}^2$$

Kada se vrši proračun može li pretvarač zadovoljiti maksimalne vrijednosti nizova modula, dolazi se do problema jer pretvarač ima 4 ulaza za nizove, a kada bi nanizali dovoljno modula kako bi ispunili taj uvjet, maksimalni napon niza fotonaponskih modula nam prelazi maksimalno dozvoljenu vrijednost.

$$\frac{65}{4} = 16,25$$

Budući da je maksimalan broj ulaza u pretvarač 4, znači da bi sustav trebao biti ostvaren kao 4 niza od 17 modula kako bi se zadovoljio uvjet snage fotonaponskog sustava (budući da mora biti jednak broj modula u nizu, a da se zadovolji uvjet maksimalne snage - najbliže rješenje je sa 68 modula). Dalje slijedi proračun za napone u nizu, te provjera odgovaraju li vrijednosti onima izraženima za mrežni pretvarač.

Dobivene vrijednosti napona praznog hoda i napona u točki maksimalne snage potrebno je korigirati s obzirom na utjecaj temperature. Iz tehničkih karakteristika za fotonaponski modul vidimo da je temperaturni opseg od  $-40 \text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+85 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , a mi za referentnu vrijednost uzimamo temperaturu pri standardnim testnim uvjetima iznosa  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Prvo preračunavamo postotnu vrijednost promjene napona u ovisnosti o temperaturi kako bi se olakšao daljnji proračun.

$$0,3 \frac{\%}{\text{K}} \cdot 39,9 \text{ V} = 0,1197 \text{ V}/^{\circ}\text{C}$$

Temperaturno korigirani napon praznog hoda iznosi:

$$U_{oc} = 39,9 + [0,1197 \cdot (25 - (-40))] = 47,68 \text{ V}$$

Temperaturno korigirani minimalni napon u točki maksimalne snage iznosi:

$$U_{mpp,min} = 31,1 + [0,1197 \cdot (25 - 85)] = 23,92 \text{ V}$$

Temperaturno korigirani maksimalni napon u točki maksimalne snage iznosi:

$$U_{mpp,max} = 31,1 + [0,1197 \cdot (25 - (-40))] = 38,88 \text{ V}$$

Zbog sigurnosnih razloga za dimenzioniranje sustava se koristi viša vrijednost napona između korigiranog napona praznog hoda i 120 % napona praznog hoda.

$$1,2 \cdot 39,9 \text{ V} = 47,88 \text{ V}$$

Budući da je  $47,88 \text{ V} > 47,68 \text{ V}$ , za proračun uzimamo tu prvu, veću vrijednost.

Dalje slijedi proračun za niz od 17 modula.

$$U_{max} = n_{mod} \cdot U_{oc} = 17 \cdot 47,88 \text{ V} = 813,96 \text{ V}$$

$$U_{niz,min} = n_{mod} \cdot U_{mpp,min} = 17 \cdot 23,92 \text{ V} = 406,64 \text{ V}$$

$$U_{niz,max} = n_{mod} \cdot U_{mpp,max} = 17 \cdot 38,88 \text{ V} = 660,96 \text{ V}$$

$$I_{ks,max} = 1,25 \cdot I_{ks} = 1,25 \cdot 9,35 \text{ A} = 11,69 \text{ A}$$

Dalje slijedi provjera kompatibilnosti s odabranim mrežnim pretvaračem.

$813,96 \text{ V} < 750 \text{ V}$  – uvjet maksimalnog ulaznog napona nije zadovoljen

$406,64 \text{ V} > 175 \text{ V}$  – uvjet minimalnog napona je ispunjen

$660,96 \text{ V} < 500 \text{ V}$  – uvjet maksimalnog napona nije zadovoljen

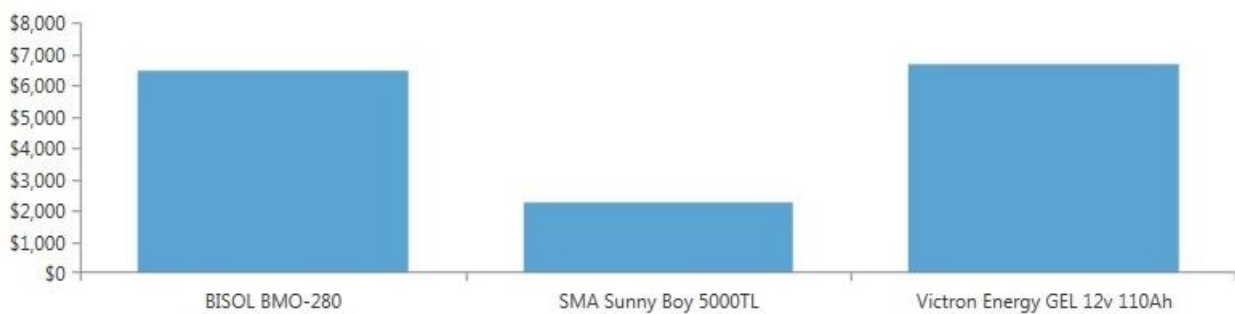
$11,69 \text{ A} < 15 \text{ A}$  – uvjet maksimalne struje zadovoljen

Ovako dobiveni sustav nije moguć jer 2 uvjeta maksimalno dopuštenih vrijednosti mrežnog pretvarača nisu zadovoljene. Po odnosu vrijednosti maksimalnih napona ( $660,96 \text{ V}$  i  $500 \text{ V}$ ) se vidi da ni rješenje sa 16 modula ne bi funkcioniralo nego bi funkcioniralo rješenje sa manje od 16 modula, a budući da je mrežni pretvarač ograničen na 4 ulaza za nizove, ovakav sustav je neostvariv bez daljnjih ulaganja u još jedan mrežni pretvarač, što nije više isplativo, te iz tog razloga daljnji proračun će se vršiti za slučaj kada se može priuštiti da 5 % godišnjeg vremena potrošnja ne bude zadovoljena, što znači da će potrošač 438 sati u godini biti bez dovoljno

električne energije (u zimskim mjesecima, no i taj prestanak opskrbe se može spriječiti racionalnim korištenjem energije za vrijeme zimskih oblačnih dana kada znamo da imamo manjak snage na modulima).

Simulacijom dobiveni najpovoljniji samostalni sustav s pretpostavkom prestanka opskrbe potrošnje 5 % godišnjeg vremena se sastoji od fotonaponskih modula ukupne snage 7,84 kW, pretvarača napona snage 5,2 kW te solarnih baterija ukupnog kapaciteta 16 kWh. Cijena takvog sustava je 15.397 \$. Uočavamo značajnu uštedu pri izgradnji sustava ukoliko pretpostavimo prestanak opskrbe 5 % godišnjeg vremena, točnije cijena čitavog sustava se gotovo prepolovila, sa cijene od 27.704 \$ je pala na cijenu od 15.397 \$ i predstavlja uštedu od 45 %.

Na slici 4.6. je prikazan odnos početnih ulaganja podijeljen po komponentama, odnosno prikazuje kolika su početna izdvajanja za fotonaponske module, kolika za mrežni pretvarač, a kolika za baterije.



*Slika 4.6.: Usporedba cijene investicije za pojedine komponente sustava*

Sa slike usporedbe cijene investicija se vidi da su početne cijene fotonaponskih modula i baterija gotovo jednake, a istovremeno skoro 3 puta većeg iznosa od cijene mrežnog pretvarača. Taj omjer cijena može služiti ukoliko se dimenzionira sustav s ograničenim iznosom cijene, jer se vidi da je uštedu lakše ostvariti odabirom povoljnijih baterija ili fotonaponskih modula nego samog mrežnog pretvarača.

Potrebni broj modula za ovakav sustav i njihova površina:

$$\frac{7,84 \text{ kW}}{0,28 \text{ kW}} = 28 \text{ modula}$$

$$A_{FN} = 1,634 \text{ m}^2 \cdot 28 = 45,752 \text{ m}^2$$

Budući da je potrebna snaga fotonaponskih modula 7,84 kW, a snaga jednog modula je 280 W, znači da nam je potrebno 28 modula koji će biti povezani u 2 niza po 14 modula. Slijedi provjera je li zamišljeni sustav sa 14 modula u nizu izvediv.

$$U_{max} = n_{mod} \cdot U_{oc} = 14 \cdot 47,88 \text{ V} = 670,32 \text{ V}$$

$$U_{niz,min} = n_{mod} \cdot U_{mpp,min} = 14 \cdot 23,92 \text{ V} = 334,88 \text{ V}$$

$$U_{niz,max} = n_{mod} \cdot U_{mpp,max} = 14 \cdot 38,88 \text{ V} = 543,2 \text{ V}$$

$$I_{ks,max} = 1,25 \cdot I_{ks} = 1,25 \cdot 9,35 \text{ A} = 11,69 \text{ A}$$

Slijedi provjera kompatibilnosti dobivenih vrijednosti fotonaponskih modula s mrežnim pretvaračem.

$670,32 \text{ V} < 750 \text{ V}$  – uvjet maksimalnog ulaznog napona je zadovoljen

$334,88 \text{ V} > 175 \text{ V}$  – uvjet minimalnog napona je ispunjen

$543,2 \text{ V} < 500 \text{ V}$  – uvjet maksimalnog napona nije zadovoljen

$11,69 \text{ A} < 15 \text{ A}$  – uvjet maksimalne struje zadovoljen

Budući da ovako dimenzioniran sustav nije moguć jer treći uvjet maksimalnog napona nije zadovoljen, slijedi proračun za rješenje sa 4 niza po 7 modula.

$$U_{max} = n_{mod} \cdot U_{oc} = 7 \cdot 47,88 \text{ V} = 335,16 \text{ V}$$

$$U_{niz,min} = n_{mod} \cdot U_{mpp,min} = 7 \cdot 23,92 \text{ V} = 167,44 \text{ V}$$

$$U_{niz,max} = n_{mod} \cdot U_{mpp,max} = 7 \cdot 38,88 \text{ V} = 272,16 \text{ V}$$

$$I_{ks,max} = 1,25 \cdot I_{ks} = 1,25 \cdot 9,35 \text{ A} = 11,69 \text{ A}$$

Slijedi provjera kompatibilnosti.

$335,16 \text{ V} < 750 \text{ V}$  – uvjet maksimalnog ulaznog napona je zadovoljen

$167,44 \text{ V} > 175 \text{ V}$  – uvjet minimalnog napona nije zadovoljen

$272,16 \text{ V} < 500 \text{ V}$  – uvjet maksimalnog napona je zadovoljen

$11,69 \text{ A} < 15 \text{ A}$  – uvjet maksimalne struje zadovoljen



Kada bi napravili sustav sa 4 niza po 7 modula, riješili smo prethodni problem s maksimalnim naponom, no sada uvjet minimalnog napona nije zadovoljen, pa se moramo odlučiti za rješenje sa 3 niza od po 10 modula kako bi se održale naponske razine. Samom odlukom za 3 niza po 10 modula snaga sustava raste za 0,56 kW te iznosi 8,4 kW.

Slijedi proračun i provjera za niz od 10 modula.

$$U_{max} = n_{mod} \cdot U_{oc} = 10 \cdot 47,88 V = 478,8 V$$

$$U_{niz,min} = n_{mod} \cdot U_{mpp,min} = 10 \cdot 23,92 V = 239,2 V$$

$$U_{niz,max} = n_{mod} \cdot U_{mpp,max} = 10 \cdot 38,88 V = 388,8 V$$

$$I_{ks,max} = 1,25 \cdot I_{ks} = 1,25 \cdot 9,35 A = 11,69 A$$

Provjera uvjeta mrežnog pretvarača:

$$478,8 V < 750 V - \text{uvjet maksimalnog ulaznog napona je zadovoljen}$$

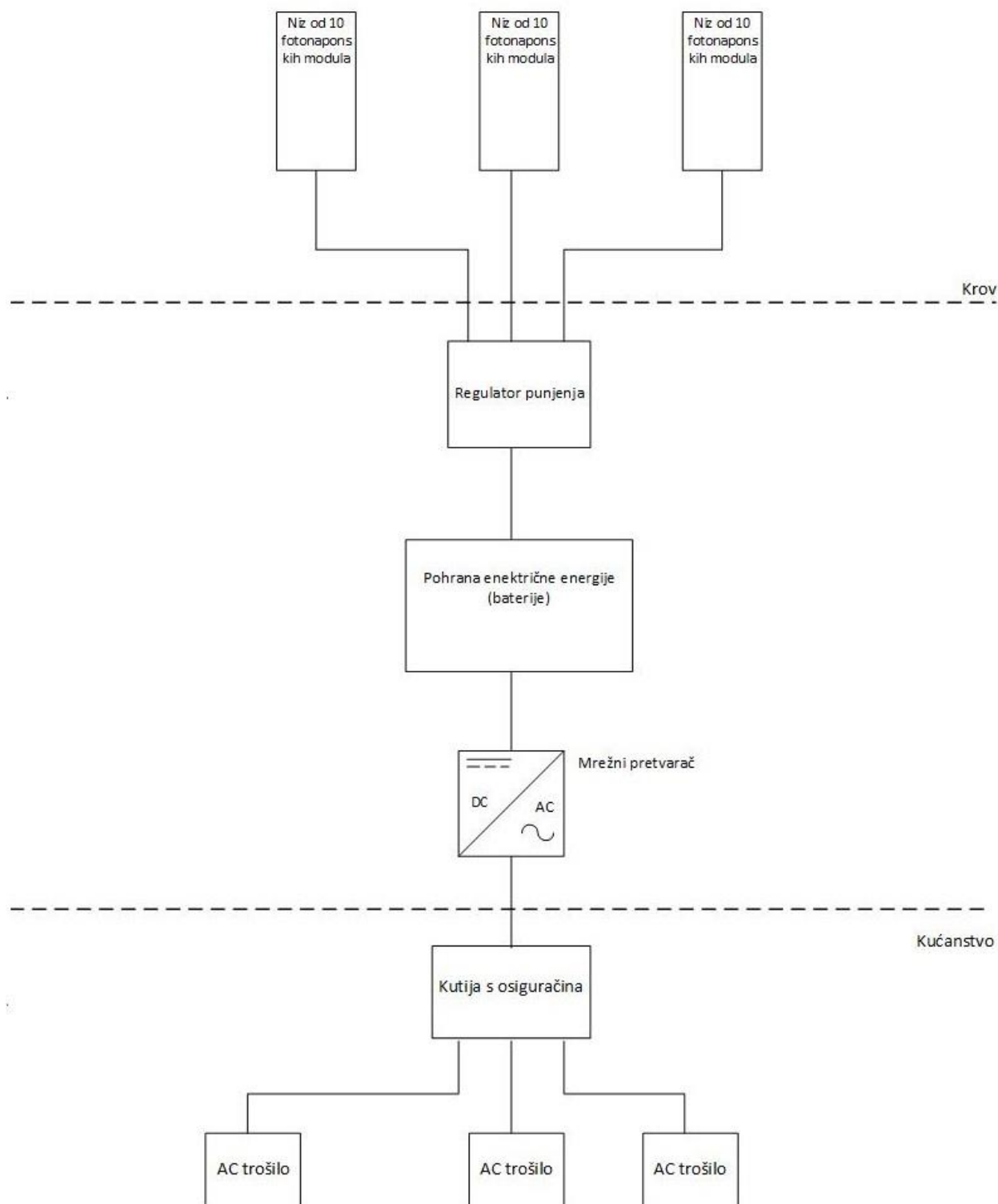
$$239,2 V > 175 V - \text{uvjet minimalnog napona je zadovoljen}$$

$$388,8 V < 500 V - \text{uvjet maksimalnog napona je zadovoljen}$$

$$11,69 A < 15 A - \text{uvjet maksimalne struje zadovoljen}$$

Svi uvjeti su zadovoljeni, niz od 10 modula je ostvariv.

Na slici 4.7. je prikazan dobiveni samostalni fotonaponski sustav sastavljen od 3 niza po 10 modula.



**Slika 4.7.:** Shema samostalnog fotonaponskog sustava snage 7,84 kW

Simulacijom dobiveni najpovoljniji samostalni fotonaponski sustav s pretpostavkom prestanka opskrbe potrošnje 10 % godišnjeg vremena se sastoji od fotonaponskih modula snage 6,44 kW, izmjenjivača snage 5,2 kW te solarnih baterija ukupnog kapaciteta 10 kWh. Cijena takvog

sustava je 12.727 \$, što predstavlja uštedu od 16 % u odnosu na sustav sa pretpostavkom prestanka opskrbe 5 % godišnjeg vremena. Ovakav sustav bi bio izvodiv u 2 niza po 12 fotonaponskih modula, jer je za traženu snagu od 6,44 kW potrebno 23 modula.

## **4.2 Proračun za mrežni fotonaponski sustav**

U Republici Hrvatskoj, u kojoj se nalazi stambeni objekt za koji je vršen proračun, postoji sustav naplate električne energije sa 2 tarife, tzv. „viša“ i „niža“ tarifa. Razlog postojanja ovih dviju tarifa je kako bi se potakla potrošnja u satima kada inače nema tolike potrošnje, kako bi se što više izravnala dnevna krivulja potrošnje, jer je to temelj za stabilnost elektroenergetskog sustava. Viša tarifa nastupa u 7 sati (po ljetnom računanju vremena u 8 sati) i traje do 21 sat (po ljetnom računanju vremena do 22 sata). Razlika u cijeni je 50 %, odnosno cijena električne energije u nižoj tarifi ima iznos polovice cijene električne energije u višoj tarifi. Bitno je unijeti ove parametre u programski softver kako bi mogao izračunati najpovoljnije uvjete za kupovanje/prodavanje električne energije dobivene na fotonaponskim modulima.

Za slučaj kada se pretpostavi da prestanka opskrbe električnom energijom nema ni u kojem trenutku u godini, dobijemo sustav sa sljedećim parametrima: fotonaponski moduli snage iznosa 13,2 kW, te mrežni pretvarač snage 10,4 kW. Cijena takvog sustava iznosi 12.489 \$, no gledano na period od 25 godina, izračunato je da bi zarada iznosila 36.513 \$. Dobiveni sustav ima čak cijenu manju od samostalnog fotonaponskog sustava s pretpostavkom prestanka opskrbe 10 % godišnjeg vremena, a nakon određenog vremena donosi zaradu, za razliku od samostalnog fotonaponskog sustava.

Isprobavanjem svih kombinacija različitih snaga fotonaponskih modula i mrežnih pretvarača došlo se do zaključka da program za najpovoljnije rješenje uvijek odabire sustav s najvećom snagom fotonaponskih modula, jer veća snaga fotonaponskog sustava donosi više energije, odnosno donosi veću zaradu. Iz tog razloga za proračun je odlučeno uzeti maksimalno 10,08 kW, zbog toga što je fotonaponski sustav do 10 kW u Republici Hrvatskoj najpopularniji što se tiče ugradnje na kuću (zato što je takav fotonaponski sustav trenutno u sustavu poticaja).

Ukoliko se odluči za sustav sa fotonaponskim modulima snage 10,08 kW, te mrežnim pretvaračem snage 10,4 kW, njegova početna cijena je 10.354 \$, a nakon 25 godina donosi zaradu od 24.588 \$.

Slijedi izračun za potreban broj modula i njihovu površinu.

$$\frac{10,08 \text{ kW}}{0,28 \text{ kW}} = 36 \text{ modula}$$

$$A_{FN} = 1,634 \text{ m}^2 \cdot 36 = 58,824 \text{ m}^2$$

Za ovakav sustav je potrebno 36 modula, a oni zajedno imaju površinu od 58,82 m<sup>2</sup>. Za klasičnu stambenu građevinu to je površina krova koja se može lako izdvojiti za gradnju fotonaponskog sustava.

Kod ovako dimenzioniranog sustava sa 2 mrežna pretvarača nije problem spojiti nizove u mrežni pretvarač, budući da svaki mrežni pretvarač ima 4 ulaza za nizove, što znači da na ovakav sustav možemo spojiti ukupno 8 nizova fotonaponskih modula. Budući da se simulacijom dobiveni sustav sastoji od 36 modula za spojiti i 8 ulaza za fotonaponske nizove, a prethodno je u radu provjereno da je 7 modula premalo jer ne dostignemo vrijednost minimalnog napona na mrežnom pretvaraču, odlučuje se za rješenje od 4 niza po 9 modula, i to po 2 niza u svaki mrežni pretvarač.

Slijedi proračun i provjera za niz od 9 modula.

$$U_{max} = n_{mod} \cdot U_{oc} = 9 \cdot 47,88 \text{ V} = 430,92 \text{ V}$$

$$U_{niz,min} = n_{mod} \cdot U_{mpp,min} = 9 \cdot 23,92 \text{ V} = 215,28 \text{ V}$$

$$U_{niz,max} = n_{mod} \cdot U_{mpp,max} = 9 \cdot 38,88 \text{ V} = 349,2 \text{ V}$$

$$I_{ks,max} = 1,25 \cdot I_{ks} = 1,25 \cdot 9,35 \text{ A} = 11,69 \text{ A}$$

$430,92 \text{ V} < 750 \text{ V}$  – uvjet maksimalnog ulaznog napona je zadovoljen

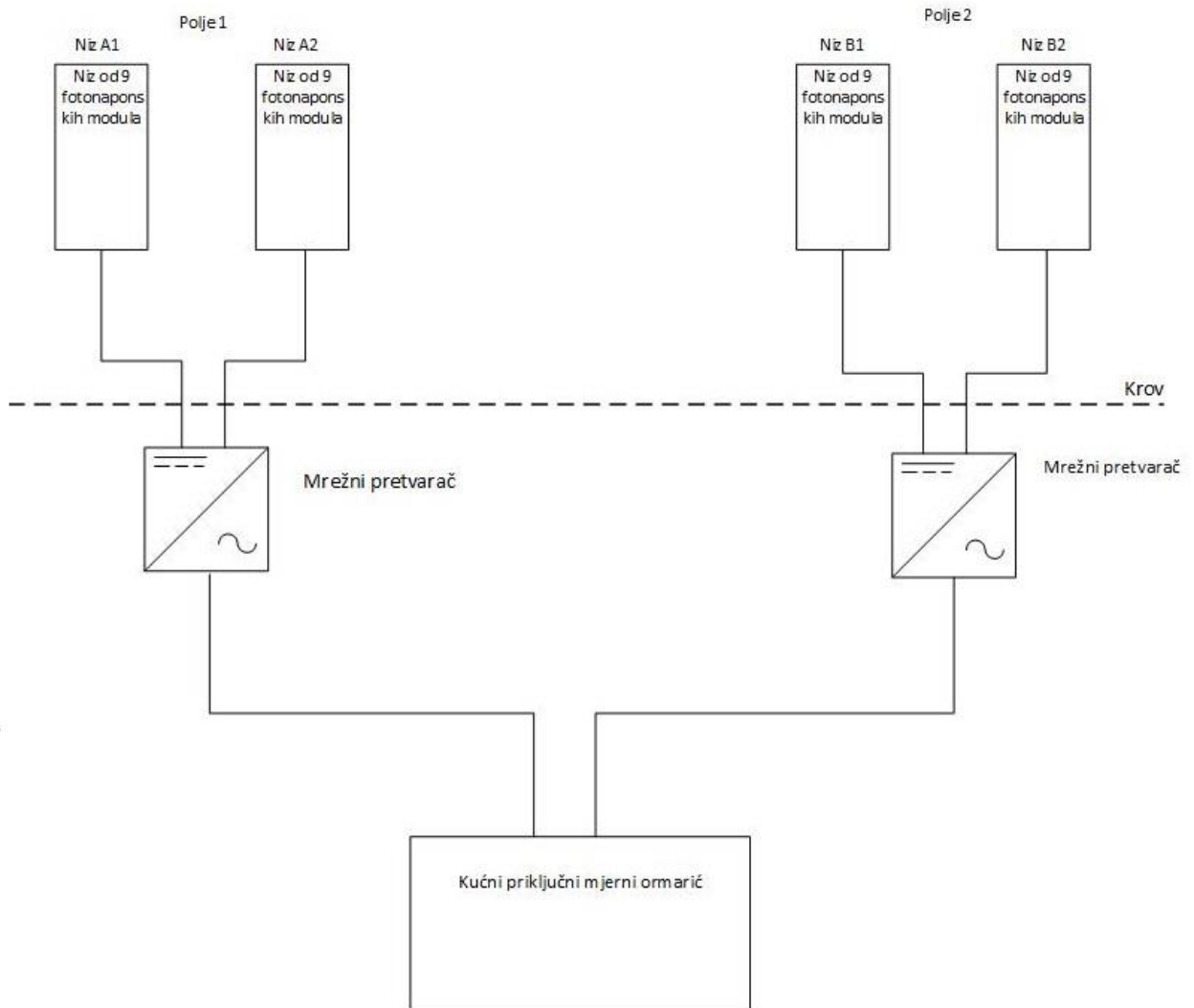
$215,28 \text{ V} > 175 \text{ V}$  – uvjet minimalnog napona je zadovoljen

$349,2 \text{ V} < 500 \text{ V}$  – uvjet maksimalnog napona je zadovoljen

$11,69 \text{ A} < 15 \text{ A}$  – uvjet maksimalne struje zadovoljen

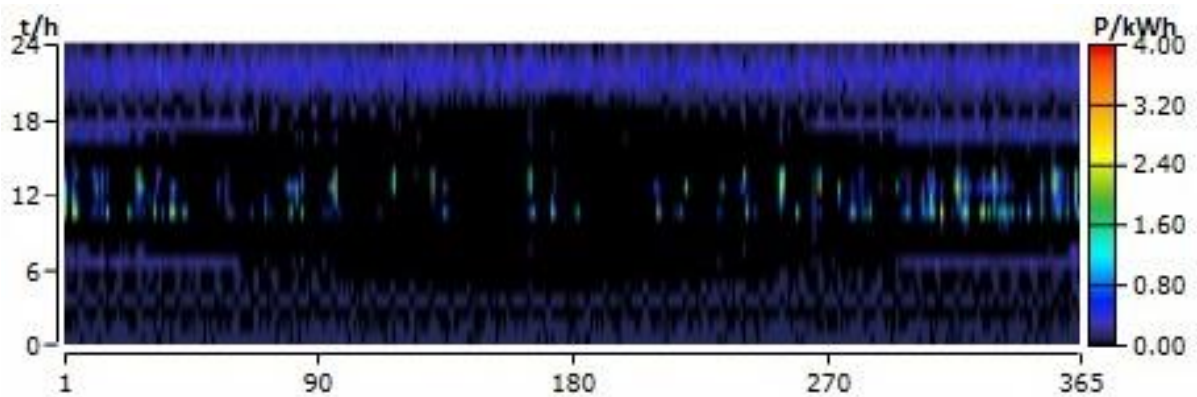
Svi uvjeti za niz od 9 modula su zadovoljeni, što znači da je ovakav sustav ostvariv.

Na slici 4.8. je prikazana shema takvog mrežnog fotonaponskog sustava sa 36 modula i 2 mrežna pretvarača.



**Slika 4.8.:** Shema mrežnog fotonaponskog sustava

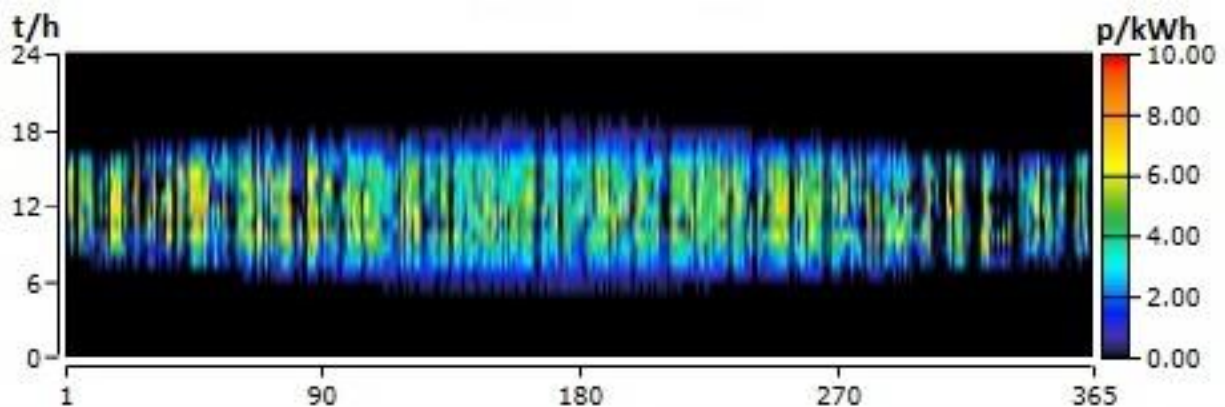
Na slici 4.9. je prikaz kupovine električne energije iz mreže tokom cijele godine i u ovisnosti o dobu dana za ovaj sustav.



**Slika 4.9.:** Graf kupovine električne energije iz mreže

Kupovina električne energije se vrši kada fotonaponski sustav ne može pokriti potrošnju stambenog objekta, pa se vidi da je najveći udio kupnje i nadoknade električne energije u noćnim satima kroz cijelu godinu, jer tada nema sunca (svjetlosti) pa nema proizvodnje. Analogno tome, vidi se da je tokom dana većinu godine kupovina energije ravna nuli.

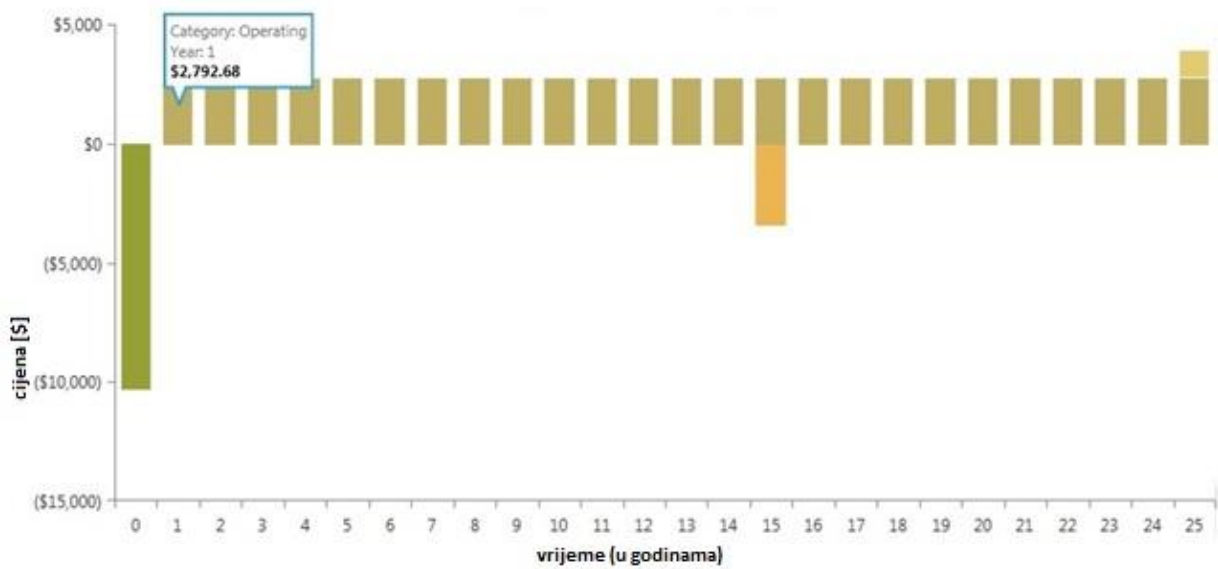
Na slici 4.10. prikazan je graf prodaje električne energije mreži.



*Slika 4.10.: Graf prodaje električne energije mreži*

Na grafu prodaje električne energije mreži vidimo da se prodaja vrši samo preko dana, što je očekivano jer se višak energije može stvoriti samo dok ima dnevnog svjetla. Ti grafovi su naročito korisni pri dimenzioniranju sustava sa više vrsta izvora električne energije kako bi se moglo optimizirati isplativost cijelog sustava.

Na slici 4.11. je prikazan graf toka novca za ovakav fotonaponski sustav kroz period od 25 godina.



**Slika 4.11.:** Graf toka novca za mrežni fotonaponski sustav

Ovaj graf nam prikazuje kako se ponaša naš fotonaponski sustav kao investicija, površnim izračunom dođemo do izračuna da se sustav počinje isplaćivati već nakon 4. godine, s vidljivom zamjenom mrežnih pretvarača nakon 15 godina. Graf je prikazan za razdoblje od 25 godina jer nakon toga bi trebala slijediti promjena fotonaponskih modula.

## 5 ZAKLJUČAK

U zadnje vrijeme svjetska potrošnja električne energije se konstantno povećava, a još uvijek najveći udio u proizvodnji električne energije imaju konvencionalni izvori energije koji zagađuju okoliš u kojem živimo. Iz tog razloga se u posljednje vrijeme intenzivno radi na razvoju sustava koji pretvaraju energiju obnovljivih izvora energije u električnu energiju, a naročito iz energije Sunca. U svijetu trenutno postoji trend da se elektroenergetska mreža „opameti“ odnosno da se kod potrošača uvedu „pametna“ brojila koja bi analizirali potrošnju te tako prilagođavali proizvodnju energije, odnosno davali prednost obnovljivim izvorima energije nad ostalima. Veliki dio te energije iz obnovljivih izvora bi se proizvodio iz Sunčeve svjetlosti na fotonaponskim modulima smještenim upravo na krovovima stambenih objekata, o čemu je u ovome radu najviše i riječ. Kada se odluči za fotonaponske module, postoje 2 rješenja; rješenje da je kućanstvo samostalno, odnosno nije spojeno na mrežu nego koristi energiju Sunca pohranjenu u obliku električne energije pohranjene u baterijama, te rješenje da je kućanstvo (zajedno sa fotonaponskim sustavom) spojeno na elektroenergetsku mrežu, s tim da proizvedenu energiju prodaje vlasniku mreže uz povlaštenu cijenu. Proračunom u Homer programu donešen je zaključak da se između ova dva rješenja bolje odlučiti za drugo rješenje, odnosno spojiti sustav sa mrežom, iz razloga što nakon nekog vremena ovaj sustav počinje stvarati profit, a isto tako nema troškova kupnje baterija koje iznose i do 40 % cijene cijelog sustava.



## LITERATURA

- [1] Paul A. Lynn, **Electricity from sunlight: An introduction to photovoltaics** John Wiley & Sons, Ltd, 2010.
- [2] Slika preuzeta s interneta,  
[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/e7/Fotoelektricna\\_konverzija\\_PN\\_spoju.jpg/400px-Fotoelektricna\\_konverzija\\_PN\\_spoju.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/e7/Fotoelektricna_konverzija_PN_spoju.jpg/400px-Fotoelektricna_konverzija_PN_spoju.jpg), posjećeno dana 26. Lipnja 2017.
- [3] Slika preuzeta s interneta, <https://www.solarquotes.com.au/img/mono-vs-polycrystalline.jpg> , posjećeno dana 26. Lipnja 2017.
- [4] Slika preuzeta s interneta,  
<https://3c1703fe8d.site.internapcdn.net/newman/gfx/news/hires/2011/15173.jpg> ,  
posjećeno dana 26. Lipnja 2017.
- [5] Slika preuzeta s interneta, [http://solarcellcentral.com/images/cigs\\_cell.jpg](http://solarcellcentral.com/images/cigs_cell.jpg), posjećeno dana 26. Lipnja 2017.
- [6] Slika preuzeta s interneta, <http://www.space.com/images/i/000/018/631/original/iss-solar-panels-shine.jpg?1340142370> , posjećeno dana 26. Lipnja 2017.
- [7] Slika preuzeta iz preuzetih predavanja s loomen-a, posjećeno dana 26. Lipnja 2017.
- [8] Slika preuzeta s interneta,  
[http://www.solarwindme.com/upload//editor\\_upload/image/Solar%20Wind%20M\\_E\\_-On-grid%20Solar%20System.jpg](http://www.solarwindme.com/upload//editor_upload/image/Solar%20Wind%20M_E_-On-grid%20Solar%20System.jpg), posjećeno dana 29. Lipnja 2017.
- [9] Slika preuzeta s interneta, <http://energyinformative.org/wp-content/uploads/2012/05/off-grid-solar-system.png>, posjećeno dana 29. Lipnja 2017.
- [10] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Fotonaponska\\_plo%C4%8Da](https://hr.wikipedia.org/wiki/Fotonaponska_plo%C4%8Da), posjećeno dana 26. Lipnja 2017.
- [11] Slika preuzeta s interneta, <http://www.astena.ru/PRIBORS/fluke-1745.jpg>, posjećeno dana 10. rujna 2017.

[12] Slika preuzeta s interneta, [http://www.bisol.com/images/EN/Modules-pictures/XL\\_pv-modules.jpg](http://www.bisol.com/images/EN/Modules-pictures/XL_pv-modules.jpg), posjećeno dana 12. Rujna 2017.

[13] Slika preuzeta s interneta, [http://www.mg-solar-shop.de/images/product\\_images/original\\_images/image\\_10009\\_1.jpg](http://www.mg-solar-shop.de/images/product_images/original_images/image_10009_1.jpg), posjećeno dana 12. Rujna 2017.

[14] Slika preuzeta s interneta, [http://asel.hr/woocommerce/wp-content/uploads/2017/07/VICGEL165\\_001.jpg](http://asel.hr/woocommerce/wp-content/uploads/2017/07/VICGEL165_001.jpg), posjećeno dana 12. rujna 2017.

## SAŽETAK

### DIMENZIONIRANJE FOTONAPONSKOG SUSTAVA ZA POKRIVANJE VLASTITE POTROŠNJE STAMBENOG OBJEKTA

U prvom dijelu rada ukratko je objašnjen način rada fotonaponskog sustava, od čega se fotonaponski modul sastoji te koji je princip rada. Zatim je iz rezultata mjerenja potrošnje stambenog objekta analizirana potrošnja električne energije, posebno radni dani, a posebno vikend. Izvršen je proračun i simulacija rada dviju vrsta fotonaponskih sustava te su uspoređeni po njihovoj isplativosti. Također su nacrtane sheme spajanja i provjerena je mogućnost rada takvog sustava.

**Ključne riječi:** fotonaponski modul, vlastita potrošnja, stambeni objekt, mrežni pretvarač, solarne baterije

## ABSTRACT

### DIMENSIONING OF THE PHOTOVOLTAIC SYSTEM FOR COVERING OWN ENERGY CONSUMPTION

The first part of this graduate thesis describes the way photovoltaic system works, which parts from it consists and its working principle. Then, there is energy consumption explained from the measuring results; the working days and weekend consumption separately. The calculation and simulation for both off-grid and on-grid photovoltaic systems are done and compared to their profitability. Also, the schemes of these systems are drawn and the possibility of that system works is checked.

**Key words:** photovoltaic system, house consumption, household, inverter, solar battery

## ŽIVOTOPIS

Tomislav Čabrajac rođen je u Osijeku, 1. lipnja 1994. godine. Završio je opći smjer Gimnazije A.G. Matoša u Đakovu. Upisuje preddiplomski sveučilišni studij elektrotehnike u Osijeku 2012. kojeg završava 2015. godine i stječe zvanje sveučilišnog prvostupnika elektrotehnike.

Iste godine upisuje diplomski studij elektroenergetike, usmjerenja DEB - održiva elektroenergetika na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija na kojem se trenutno nalazi.

Dobitnik je stipendije Hrvatske elektroprivrede za 2017. godinu.

Član IEEE organizacije studentskog ogranka Osijek. U slobodno vrijeme rekreativno se bavi biciklizmom, streljaštvom, nogometom i mnogim drugim sportovima.

U Osijeku, rujan 2017.

Tomislav Čabrajac

---