

# NAČRTOVANJE IN IZDELAVA PROTOTIPA SOLARNEGA SLEDILNIKA

<sup>1</sup>Domen Gošek, <sup>1,2</sup>Amor Chowdhury, <sup>3</sup>Karl Gotlih, <sup>2</sup>Riko Šafarič

<sup>1</sup>MARGENTO R&D d.o.o., Turnerjeva ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija

<sup>2</sup>Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Koroška c. 46, Maribor, Slovenija

<sup>3</sup>Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Smetanova 17, Maribor, Slovenija

E-pošta: domen.gosek@margento.com

**Abstract.** The article presents the process of developing a solar tracker prototype mechanism on the machine, programming, and electrical level. Stages of development and solar tracking algorithms are described. The prototype is a physical system, which tracks sun trajectory by time reference with its algorithm. That means that for tracking it needs 4 inputs which are: number of days in a year, hours, minutes, and geographical latitude. After the development has ended collecting and analysis of result data were done. The results were given by experiments.

## 1 Uvod

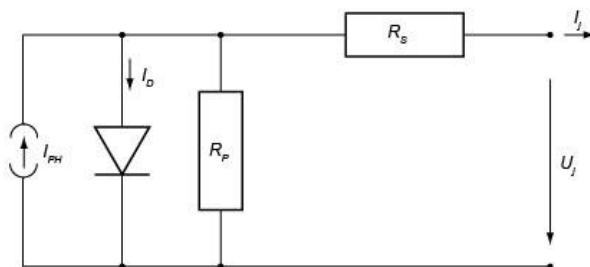
Izkoriščanje sončne energije je ena najbolj ekološko sprejemljivih oblik pretvorbe energije. Pri sončni energiji uporabljamo energijo svetlobe, ki jo pretvorimo v toploto v primeru termično solarne tehnike ali jo s pomočjo fotovoltaike neposredno pretvorimo v električno energijo [1]. Eden bistvenih problemov pri izrabi energije sonca so relativno nizki transformacijski izkoristki, če k temu dodamo še spremenljiv položaj sevanja na solarni panel, so izkoristki še slabši. Pridobljeno energijo iz sončnih panelov je po nekaterih ocenah mogoče povečati za 20 do 30 odstotkov z uporabo sledilnega sistema namesto fiksne namestitve [2]. Pri razvoju solarnih sledilnikov so se razvile različne metode sledenja soncu. Najbolj priljubljeni so astronomski ali časovni sistemi, poleg njih pa poznamo tudi optične sledilne metode, ki za pozicioniranje sončnega panela uporabljajo različne vrste fotosenzorjev. Cilj našega dela je izdelava cenovno sprejemljivega prototipa solarnega sledilnika, s katerim želimo zagotoviti kvalitetno in zanesljivo sledenje soncu na osnovi koledarja, ure in geografske širine na Zemlji. Projekt obsega zasnovno in trdnostno načrtovanje, izbiro komponent, sestavo, programiranje in testiranje delovanja. S testiranjem prototipa želimo preveriti ekonomičnost delovanja ter povzeti, kaj bi bilo potrebno izboljšati pri nadaljnjem razvoju.

## 2 Načrtovanje solarnega sledilnega sistema

Pri načrtovanju solarnega sistema je potrebno upoštevati učinkovitost sončnih celic. Učinkovitost sončnih celic je omejena s številnimi faktorji. Tako mora biti energija

fotonov zadostna za kreiranje parov vrzel-elektron. Sevanje z večjo valovno dolžino nad  $1,15 \mu\text{m}$  pri silicijevih fotocelicah povzroči le segrevanje celice. Ker lahko en foton kreira le en par vrzel-elektron, se tudi pri valovnih dolžinah manjših od mejne pojavlja višek fotonov, ki prav tako povzročajo le segrevanje celice, ne pa proizvodnjo električnega toka. Tako je zgornja meja pretvorbe sončnega sevanja s silicijevimi celicami približno 23% [3]. Z uporabo večslojnih celic z različnimi materiali je možno pretvoriti širši spekter sončnega sevanja. Take celice dosegajo v eksperimentalni fazi učinkovitosti večje od 30 %. Dodatne izgube predstavlja še zastrtost  $n$  in  $p$  sloja zaradi kontaktne mreže na zgornji strani sončne celice, notranja upornost celice in refleksija sončnega sevanja na površini sončne celice.

Karakteristiko sončne celice lahko primerjamo s karakteristiko diode, saj sta tok in napetost odvisna od energije sončnega sevanja in bremena. Na sliki 1 je prikazana poenostavljena električna shema solarnega modula.



Slika 1: Ekvivalentno vezje fotocelice

Solarni modul si lahko predstavljamo kot črno škatlo z dvema sponkama, ki proizvaja tok pri napetosti  $U$ . Ekvivalentno vezje se sestoji iz štirih komponent:

1. Izvor foto-toka izrazimo z enačbo:

$$I_{ph} = A_{cell} H \xi \quad (1)$$

kjer je  $A_{cell}$  površina celice,  $H$  intenziteta svetlobe in  $\xi$  odzivni koeficient v enotah  $A/W$ .

2. Dioda: nelinearni element, ki izraža odvisnost od širine zaporne plasti in izgub z rekombinacijami. Opredejen je z reverznim tokom, ki odraža prepuščanje elektrone in

rekombinacijo s faktorjem kvalitete  $q$  z vrednostmi od 1 do 2. Je empirični faktor.

3. Shunt-ov upor  $R_p$ : predstavlja izgube v polprevodniku.
4. Zaporedni upor  $R_s$ : prav tako predstavlja izgube neidealnega prevodnika.

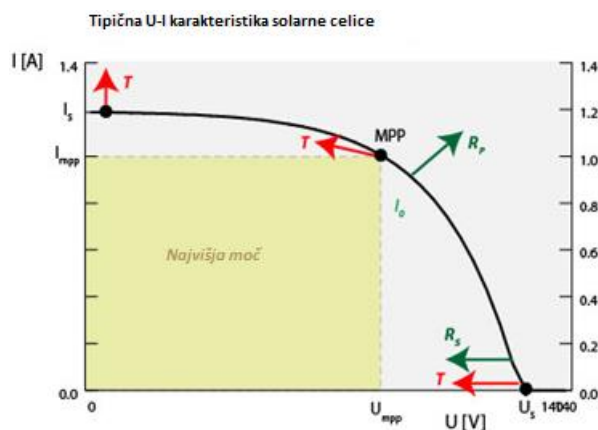
Odvisnost med tokom  $I$  in napetostjo  $U$  posamezne celice predstavimo z enačbo:

$$I_{Cell} = I_{Ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{U_{Cell} + I_{Cell}R_s}{U_T}\right) - 1 \right] - \frac{U_{Cell} + I_{Cell}R_s}{R_p} \quad (2)$$

kjer je  $U_T$  napetost zaradi toplote

$$U_T = \frac{qkT}{e} \quad (3)$$

Temperatura je izražena v Kelvinih,  $k$  je Boltzmannova konstanta in  $e$  je elementarni naboj. Z uporabo izraza 3 lahko izračunamo točke maksimalne moči pri različnih temperaturnih vplivih. V modulu je zaporedno povezanih mnogo celic, ki prispevajo k toku in napetosti. Tako moramo pri obravnavi modula upoštevati še število celic.



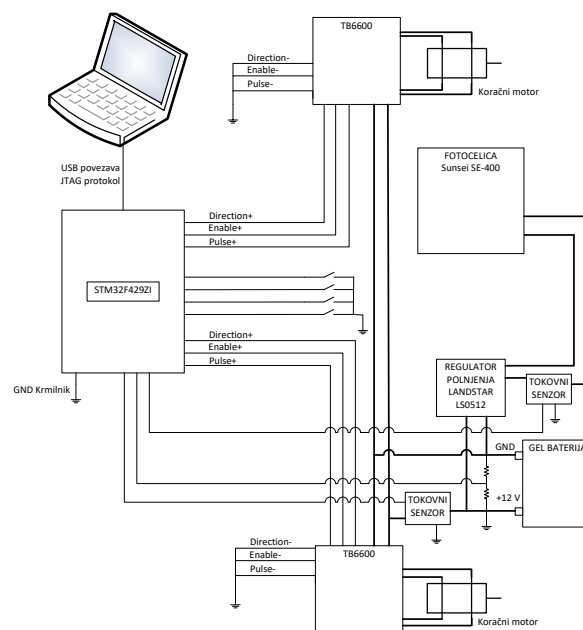
Slika 2: U-I karakteristika foto celice

Karakteristika prikazana na sliki 2 je precej občutljiva na spremembe v temperaturi, kar se odraža v nižji napetosti odprtih spenk in višjemu kratkostičnemu toku. Končni rezultat je prehod točke MPP na nižjo vrednost. Nasičenje reverznega toka se odraža v položnejši karakteristiki. Višja zaporedna upornost se odraža v večjih izgubah in manjši končni napetosti na bremenu [3].

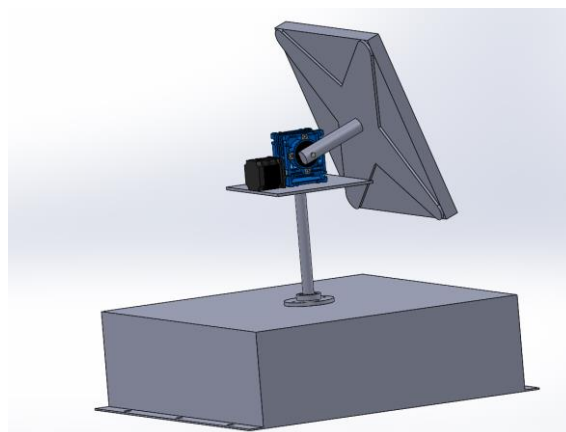
### 3 Pogonske komponente

Struktura sistema je prikazana na sliki 3, vizualni izgled pa na sliki 4. Struktura se deli na del z močnimi komponentami in del s signalnimi komponentami.

Signalni del se ločuje od močnostnega v gonilnikih, senzorjih in delilniku.



Slika 3: Blokovna shema sistem



Slika 4: Fizični izgled prototipa

V načrtovanem solarnem sledilniku so uporabljeni bipolarni korajni motorji Nema 23 z  $1,8^\circ$  korakom. Motor proizvede 2,83 Nm navora. Masa motorja je 1,3 kg. Dolžina gredi je 21 mm s premerom 6,35 mm. 2 motorja uporabljena v sledilniku sta odgovorna za izvedbo pozicioniranja nosilca panela glede na lego sonca. Napajamo ju s pomočjo baterije preko gonilnikov. Izbrani korajni motorji imajo možnost razširitve z dodatno gredjo, enkoderji, zavorami, reduktorji in multiplikatorji.



Slika 5: Koračni motor Nema 23

Mehanski prenos je zasnovan iz polža, ki oddaja moč, in iz zobnika, ki moč sprejema ter jo oddaja na izhodno gred. Je bistveno manjši od navadnega zobniškega prenosa. Njuni vrtilni osi sta zamaknjeni za 90°.

Razlog v samozapornosti je v naklonu zob zobnika na polž. Ta je tako majhen, da med apliciranjem navora na zobnik, trenje drži polž na mestu, kar je bil bistven razlog za izbiro polžastih gonil v sledilniku.



Slika 6: Polžasto gonilo

## 4 Sledilni algoritem

Zaradi rotacije in revolucije Zemlje se Sonce na nebu premika po svoji tirnici vsak dan v letu drugače. S pomočjo poznavanja gibanja Zemlje in njene rotacije okoli Sonca in lastne osi, je mogoče izpeljati enačbo, s katero izračunamo azimut in višinski kot Sonca.

Vemo, da glede na specifično lokacijo na Zemlji Sonce vzide na vzhodu in zaide na zahodu. Solarno sledilni mehanizem uporablja informacijo o položaju Sonca na tej lokaciji z namenom nenehnega usmerjanja panela proti Soncu. Shema nebesne oble predstavlja položaj Sonca izražen z azimutom in višinskim kotom glede na geografsko širino.

Algoritem, ki podaja informacijo o položaju Sonca v dveh podatkih, to sta azimut in višinski kot, v odvisnosti od položaja na zemlji, datuma in ure, se imenuje solarni pozicionirni algoritem (ang. Solar position algorithm - SPA). Pri izračunu moramo upoštevati naslednje podatke [4]:

1. geografska širina  $\varphi$  – kot severno ali južno od ekvatorja

2. deklinacija  $\delta$  – lok časovne krožnice od nebesnega ekvatorja do lege nebesnega telesa na časovni krožnici
3. dan v letu
4. ura – pretvorba v decimalno vrednost na primer 15,30 = 15,5
5. urin kot ( $t$ )

Za izračun sončnega vektorja so uporabljene naslednje enačbe:

$$\delta = -23,45 \cdot \cos\left(\frac{360}{365} \cdot \text{dan\_v\_letu} + 10\right) \quad (4)$$

$$t = 15 \cdot (\text{Ura} - 12) \quad (5)$$

$$\text{Višinski kot} = \arcsin(\sin(\delta) \cdot \sin(\varphi) + \cos(\delta) \cdot \cos(t)) \quad (6)$$

Azimut nato izračunamo, če je ura manj ali več kot 12. Če ura tisti dan še ni 12, se azimut izračuna po naslednji enačbi:

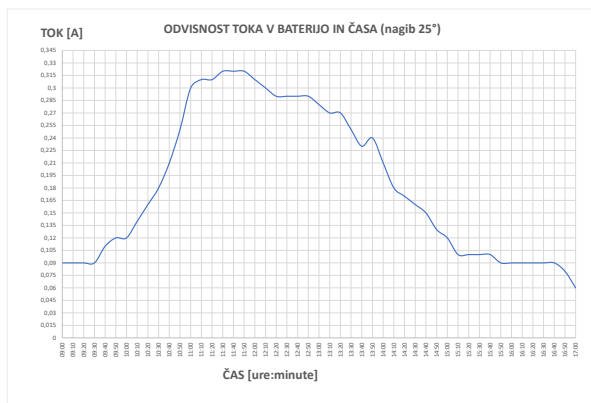
$$\text{Azimut} = \arccos\left(\frac{\sin(\delta) \cdot \cos(\varphi) - \cos(\delta) \cdot \sin(\varphi)}{\sin(90 - \text{Višinski kot})}\right) \quad (7)$$

V nasprotnem primeru, ko je ura več ali enaka kot 12, pa se azimut Sonca izračuna kot

$$\text{Azimut} = 360 - \arccos\left(\frac{\sin(\delta) \cdot \cos(\varphi) - \cos(\delta) \cdot \sin(\varphi)}{\sin(90 - \text{Višinski kot})}\right) \quad (8)$$

## 5 Eksperimentalni rezultati

Za korektno primerjavo rezultatov med fiksno nameščenim PV modulom in PV modulom s solarnim sledilnikom bi morali izvesti sočasne meritve ob enakih vremenskih pogojih. Žal zaradi določenih izvedbenih omejitev tega nismo izvedli in so meritve bile opravljene zgolj na prototipu v dveh režimih delovanja ob čim bolj identičnih vremenskih pogojih. Med izvajanjem meritev so bile vremenske razmere sončne z občasno oblačnostjo. Meritev s fiksno nameščenim PV modulom je potekala z namestitvijo sistema v točko, kjer je bilo Sonce vidno čez cel dan. Geografska širina, kjer je bila meritev izvajana je bila 46,55 stopinj. Nagib sončne celice je bil optimalen v zimskih mesecih in znaša 25 stopinj glede na horizont.



Slika 3: Polnilni tok  $I$  pri fiksno nameščenem PV

Tok v dopoldanskem delu strmo narašča in se približuje najvišji vrednosti, ki znaša okrog 300 mA. Po dosegu vrha opazimo nekoliko položnejše padanje toka  $I$ , ki se v zadnjem delu grafa še upočasni.

Skozi opazovani časovni interval lahko izračunamo pridobljeno energijo. Ta je enaka seštevku zmnožkov napetosti baterije  $U$ , toka  $I_{vbat}$  in časovnega intervala  $t_{med}$ . Energijo  $E$ , pridobljeno iz celice splošno zapišemo po naslednji enačbi:

$$E = \sum UI_{vbat}t_{med} \quad (9)$$

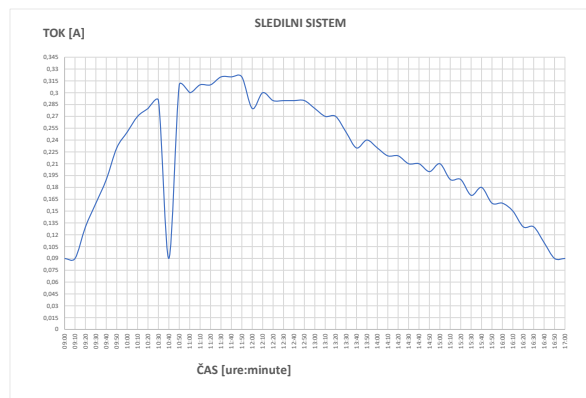
Število seštevkov je enako številu meritev. V danem primeru je bilo opravljenih 49 meritev, izračun posamezne meritve je;

$$E = 13,86 V * 0,32 A * 600 s$$

$$E = 2661 Ws = 0,74 Wh$$

Kumulativni rezultat meritev pri mirujočem sistemu pridobljene energije pa znaša 20,40 Wh.

Pri meritvi s sledilnim sistemom smo zaradi objektivnosti primerjave opravili meritve v istem tednu kot za mirujoč sistem ob približno podobnih vremenskih pogojih. Okoliščine, ki so prisostvovala pri meritvah, so opredeljene z opisom vremenskih razmer. Med izvajanjem meritev so bile vremenske razmere sončne z občasno oblačnostjo. Meritev je potekala z namestitvijo sistema v točko, kjer je bilo Sonce vidno čez cel dan. Geografska širina, kjer je bila meritev izvajana je bila 46,55 stopinj.

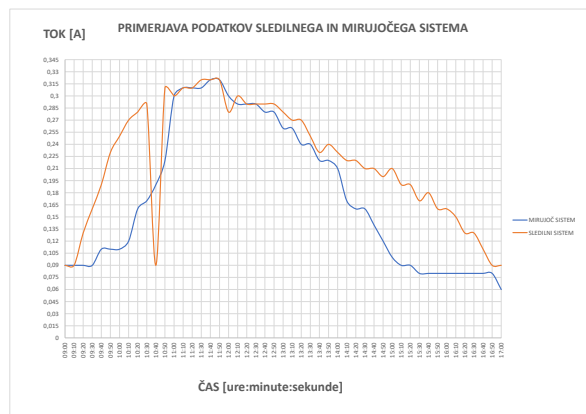


Slika 4: Polnilni tok  $I$  pri sledilno nameščenem PV

Iz grafa na sliki 8 je razvidno, da merjeni tok  $I$ , narašča hitreje in pada počasneje. Na grafu opazimo upad merjenega toka  $I$  med 10:40 in 10:50 uro, kar je posledica mimoidočega oblaka. Kumulativni izračun pridobljene energije  $E$  pokaže, da je pri sledilnem sistemu pridobljena skupna energija 24,22 Wh.

Pri izvajanju sledenja so energijo porabljali gonilniki motorjev, koračna motorja in mikrokrmilniška enota. Za poravnavo proti soncu je sistem porabil 0,5 s, saj je šlo za majhne premike, sistem pa je bil optimiziran tako, da če so bili potrebni premiki manjši kot 0,05 stopinje, je sistem počakal na naslednji interval. Tako se sistem ni zaganjal po nepotrebem. Med čakanjem na premik je najmanjšo možno energijo v režimu nizke porabe porabljala krmilniška enota in gonilniki v stanju pripravljenosti.

Sistem je za 49 premikov pri toku 1 A in napetosti 13,6 V pri času 0,5 sekunde porabil 0,0925 Wh, kar je 0,4 % pridobljene energije pri sledilnem sistemu.



Slika 5: Primerjalni graf mirujočega in sledilnega sistema

Kljub pogojno »objektivnim« meritvam, lahko iz dobljenih eksperimentalnih rezultatov pridemo do zaključka, da ob uporabi solarnega sledilnika pridobimo za dobrih 18% več energije v primerjavi s fiksno nameščenim oz. mirujočim PV sistemom.

Na sliki 9 je vidno območje med krivuljama, ki predstavlja dobiček energije zaradi sledenja Soncu.

## 6 Zaključek

Eksperimentalni projekt izvedbe prototipa solarnega sledilnika je pokazal, da so sledilno solarni sistemi precej učinkovitejši od mirujočih, slaba stran je njihova cena, ki kljub bistvenemu dvigu učinkovitosti vsaj pri manjših solarnih sistemih ne opravičuje dodatnega vložka. Kljub večjemu strošku pa lahko pričakujemo njihovo uporabo predvsem v primerih, ko smo omejeni s prostorom namestitev PV kot na primer med taborjenjem v naravi, kamp prikolicah, v odročnejših krajih za napajanje merilnih sistemov ipd.

### Literatura

- [1] S. Medved, Solarni inženiring, Ljubljana: Fakulteta za strojništvo, 1993.
- [2] S. A. Kalogirou, Solar energy engineering processes and systems, druga izdaja, Amsterdam: Elsevier, 2014.
- [3] Theory of solar cells [splet], Dosegljivo: [https://en.wikipedia.org/wiki/Theory\\_of\\_solar\\_cells](https://en.wikipedia.org/wiki/Theory_of_solar_cells) [Datum dostopa 6. 5. 2019].
- [4] G. Prinsloo, R. Dobson, Solar Tracking, Stellenbosch, 2015