

# Predlog rešenja dvo-osnog mobilnog solarnog tragača sa mogućnošću akumuliranja energije

## Solution Proposal for a Two-Axis Mobile Solar Tracker with the Possibility of Accumulating Energy

Marko S. Đurović \*, Željko V. Despotović \*\*,

\* Institut Mihajlo Pupin Projekt Inženjering d.o.o., Beograd, Srbija

\*\* Institut Mihajlo Pupin d.o.o., Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija

**Rezime** - Rad se odnosi na predlog rešenja solarnog tragača koji se može koristiti u sredinama bez stalno dostupnog konvencionalnog izvora električne energije, kao što je elektroenergetska mreža. Sam uređaj osmišljen je tako da bude veoma jednostavan za transport, montažu i demontažu. Suština rada je da se predstavi predlog rešenja koje treba da zadovolji potrebe za električnom energijom potrošača snage do 2 kW. U radu je predloženo rešenje koje omogućava lako i sigurno rukovanje i korišćenje. Takođe, dati su grafički prikazi, principske električne šeme uređaja solarnog tragača i predstavljeni su proračuni okreta uređaja. Na ovaj način u svakom trenutku dana paneli su u optimalnom položaju prema Suncu. Na osnovu prethodnog izvršen je izbor potrebnih mehaničkih i električnih komponenti. U okviru rada biće predstavljene mogućnosti instaliranja sistema za akumulaciju energije. Na ovaj način se omogućava autonomnost priključenog uređaja usled periodičnog nestanka Sunčevog zračenja. Kompletno rešenje omogućava dostupnost električne energije, a pri tome je mehanički pouzdano i ergonomski optimizovano. Rad se bazira prvenstveno na jednostavnosti same konstrukcije i prilagođavanju sistema akumulacije energije predloženoj konstrukciji. Buduća istraživanja biće usmerena u pravcu dobijanja jednostavnijeg rešenja mehaničkog sistema okreta.

**Ključne reči** - solarna energija, solarni tragač, solarni panel, skladište energije, mehatronika

**Abstract** - The paper refers to the proposal of a solar tracker technical solution that can be used in environments without a constantly available conventional source of electricity, such as power grid. The device is designed to be very easy to transport, assemble and disassemble. The essence of the paper is to present a proposal for a solution that should meet the needs of electricity consumers up to 2 kW. The paper presents a proposal for a technical solution that enables easy and safe handling and use. Also, graphical representations, principle electrical diagrams of the solar tracker device are given, and calculations of the device's revolutions (in the two axes) are presented. In this way, at every moment of the day, the solar panels are in the optimal position towards the Sun. Based on the above, the necessary mechanical and electrical components were selected. The paper will present

the possibilities of installing energy storage systems. In this way, the autonomy of the connected device is enabled due to the periodic disappearance of solar radiation. The complete solution enables the availability of electricity, while being mechanically reliable and ergonomically optimized. The paper is based primarily on the simplicity of the construction and the adaptation of the energy accumulation system to the proposed construction. Future research will be directed in the course of obtaining a simpler solution for the mechanical turning system.

**Index Terms** - Solar energy, Solar tracker, Solar panel, Energy storage, Mechatronics

### I UVOD

N nezavisno od lokacije na Zemlji potreba za energijom je u stalnom porastu. Konvencionalni izvori energije kao najzastupljeniji izvori za dobijanje željenog oblika energije, nisu uvek pogodni za eksploataciju. Konvencionalni izvori su izvori koji zahtevaju propisane uslove za dobijanje željenog oblika energije. Ako govorimo o električnoj energiji, onda se ti uslovi još više pooštavaju. Termoelektre, nuklearne elektrane, elektrane na gas i sl. su stacionarni izvori električne energije, objekti velikih površina izgrađeni na lokacijama bez mogućnosti izmeštanja. U ovu grupu mogu se svrstati i hidroelektrane. Najveći nedostatak ovih izvora je to što su ograničeni u distribuciji energije. Potreban je distributivni elektroenergetski sistem kako bi se proizvedena električna energija iz ovakvih izvora dostavili krajnjem korisniku. Najzastupljeniji sistem distribucije električne energije predstavljaju dalekovodne mreže visokog napona. Konvencionalni izvori energije učestvuju sa ukupno 95,6% u proizvodnji električne energije u svetu [1]. Otuda i ne čudi podatak da je čak 13% površine u svetu bez mogućnosti snabdevanja električnom energijom [2]. Udeo u površinama bez dostupne energije ne predstavljaju samo mesta sa ekstremnim vremenskim i lokacijskim uslovima, već u tu grupu spadaju i lokacije koje su mnogo pristupačnije tradicionalnom mrežnom sistemu distribucije električne energije. Takve površine jesu velike poljoprivredne površine, planinske površine, pašnjaci, itd. Te površine imaju stalnu potrebu za električnom energijom. Zahtevana električna energija na ovim površinama treba da zadovolji potrebu za navodnjavanjem, vodom za pojenje stoke,

potrebe za električnom energije uređaja koji vrše koristan rad, itd. Izvori koji imaju mogućnost da zadovolje potrebe ovakvih i sličnih terena su obnovljivi izvori energije (OIE). Najpogodniji OIE za ovu svrhu su solarna energija i energija vetra. Nedostatak OIE jeste nedostatak kontinuiteta u proizvodnji energije. Lokacija na kojoj se nalazi vetroelektrana u određenim periodima može biti bez vetra, dok lokacija na kojoj je instalirana solarna elektrana u određenom vremenskom periodu može ostati bez Sunčevog zračenja. Zbog toga ovakvi izvori moraju imati dopunski izvor napajanja za potrošače u vidu nekog konvencionalnog izvora električne energije ili sistema za akumuliranje energije (najčešće baterijski sistem) koji bi omogućio autonomnost sistema tokom perioda sa smanjenom ili nultom proizvodnjom električne energije.

U ovom radu je prikazan predlog rešenja solarnog tragača, odnosno uređaja, koji u toku obdanice prati kretanje Sunca. Uređaj treba da omogućiti pristup električnoj energiji na lokacijama koje imaju potrebu za njom, a bez mogućnosti su snabdevanja iz konvencionalnih izvora energije.

Pored proizvodnje električne energije uređaj ima mogućnost akumuliranja električne energije koja bi u periodima male ili intenzivne oblačnosti, potrebno zadovoljiti potrebe korisnika za električnom energijom.

Tragač je projektovan tako da postoje dva zasebna sistema rotacije implementirana na uređaj koja u toku dana prate Sunce i to po *azimutu* i po *elevaciji*. Ovakva konfiguracija solarnog tragača omogućava optimalan rad i uređaja za proizvodnju električne energije u toku dana.

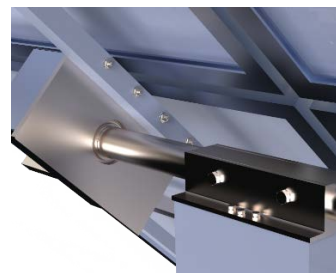
## II UPOZNAVANJE SA PREDLOŽENIM REŠENJEM

Solarni tragač predstavljen u ovom radu zamišljen je kao modularna konstrukcija (Slika 1.). Takva konstrukcija omogućava da se solarni tragač može premeštati sa lokacije na kojoj je postavljen u tom trenutku na lokaciju na kojoj postoji veća potreba za električnom energijom.



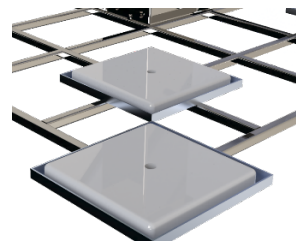
**Slika 1.** Slika sklopa solarnog tragača

Da bi se zadovoljili uslovi lakog premeštanja uređaja na različita radna mesta, konstrukcija tragača treba da bude jednostavna za montažu i demontažu. Svi segmenti predstavljenog rešenja solarnog tragača, osim sklopova rotacija (horizontalne i vertikalne) su izrađeni tako da su međusobno vezani vijčanom vezom (Slika 2). Takva veza između elemenata uređaja zadovoljava lake montažne, odnosno demontažne osobine uređaja.



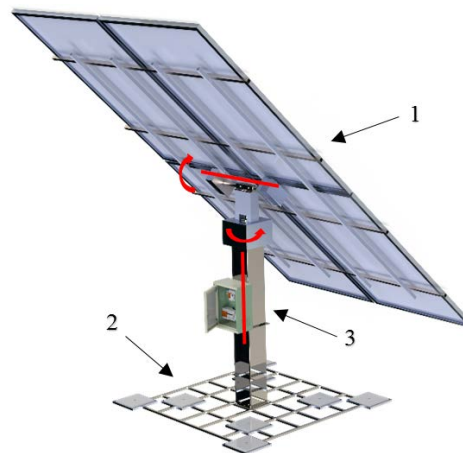
**Slika 2.** Prikaz načina međusobne veze elemenata uređaja

Zbog osobine da je uređaj zamišljen kao montažno/demontažna konstrukcija, nije planirano da uređaj bude fiksiran u zemlju dodatnom metalnom ili betonskom konstrukcijom u cilju stabilnosti usled uticaja sila okoline na sam uređaj. Za savladavanje uticaja okoline na postolju uređaja postavljaju se betonski balasti na tačno određenim položajima (Slika 3). Ovakav raspored balasta na konstrukciji predstavlja optimalan položaj balasta koji treba da omogućí dovoljnu težinu za savladavanje sila okoline ovako projektovanog uređaja. Masa i dimenzije balasta se biraju na osnovu proračuna sila okoline koje deluju na solarni tragač. Sile okoline koje deluju na uređaj najviše zavise od lokacije na kojoj je planirano postavljanje uređaja. Proračun uticaja tih sila izvršice se u poglavlju V ovog rada.

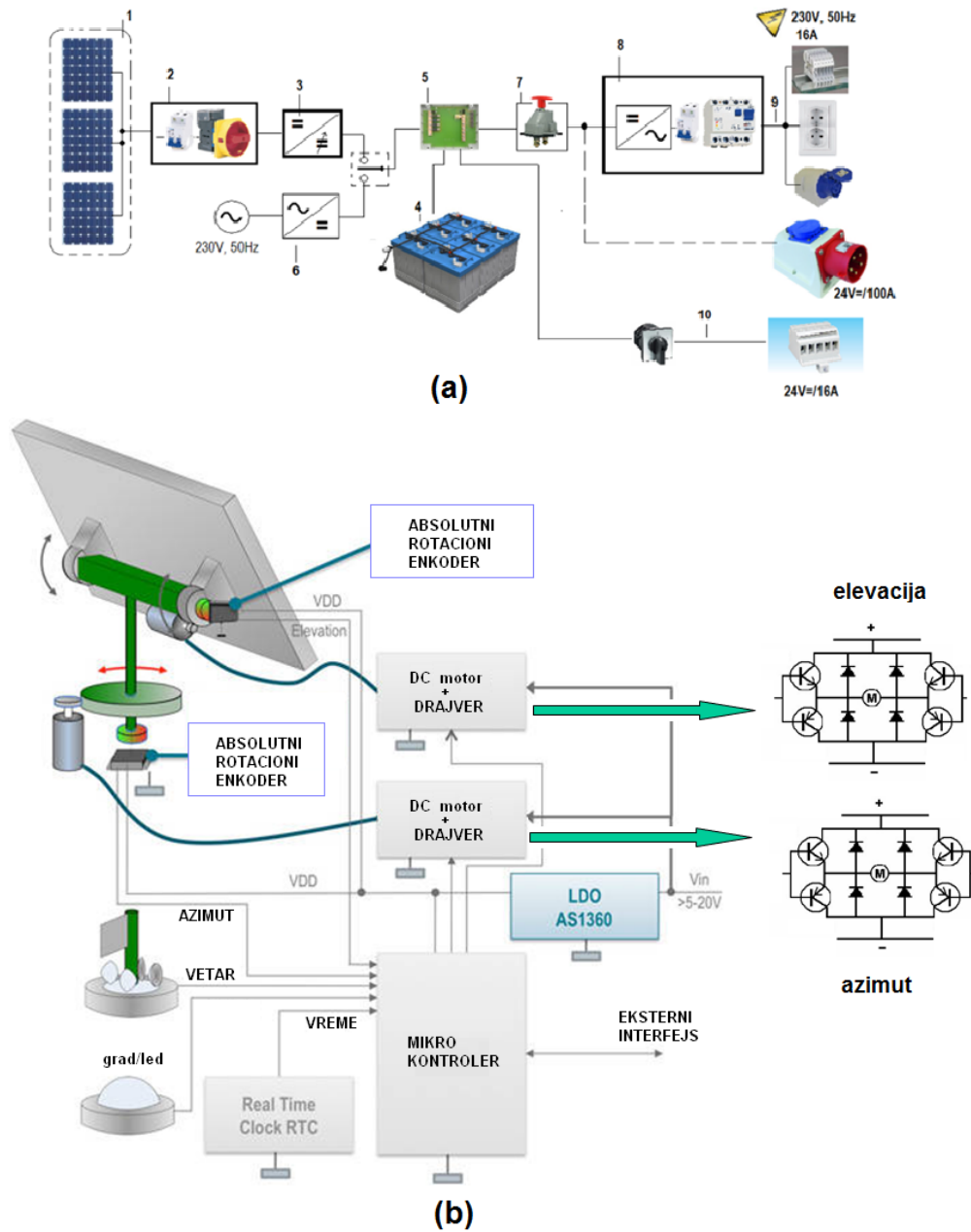


**Slika 3.** Mesta za postavljanje balasta na postolju solarnog tragača

Solarni tragač je osmišljen tako da ima mogućnost rotacije u odnosu na azimut i odnosu na elevaciju Sunca u toku dana (Slika 4). Za obe rotacije predviđena su dva zasebna elektromotorna pogona.



**Slika 4.** Zadnji pogled na solarni tragač, prikaz osa rotacije uređaja; 1 - ram solarnog tragača sa solarnim panelima, 2 - postolje solarnog tragača, 3 - stub solarnog tragača



**Slika 5.** Principijska blok šema solarnog sistema sa implementiranim solarnim tragačem; (a) Energetski i pretvarački deo: 1 - sistem PV panela, 2 - prekidač u PV kolu (uključenje/isključenje), 3 - MPPT punjač, 4 - baterijska “banka”, 5 - “DC link” priključna kutija, 6 - punjač baterije iz mreže, 7 - glavni prekidač na DC strani, 8 - monofazni DC/AC pretvarač-invertor, (b) sistem za dvo-osno praćenje sunčeve putanje

### III ELEMENTI SOLARNOG TRAGAČA

Na Slici 5 je prikazana principijska blok šema solarnog sistema u okviru koga je implementiran solarni tragač. Na Slici 5(a) je prikazan energetski i pretvarački deo sistema, dok je na Slici 5(b) prikazana principijska blok upravljačka šema solarnog tragača. U nastavku rada će biti dati detaljniji opisi pojedinih sklopova sistema. Oprema solarnog tragača sadrži sledeće sklopove:

1. sklop konstrukcije - svi čelični delovi i betonski balasti koji obezbeđuju stabilnost tragača,
2. sklop koji čine električni uređaji proizvodnje i

akumuliranja električne energije, kao i energetski pretvarači: solarni paneli, regulator punjenja baterije (DC/DC pretvarač), skladište električne energije (baterija), DC/AC pretvarač-invertor, zaštitna elektro oprema.

3. sklop rotacije solarnog tragača, odnosno dvo-osni sistem za praćenje sunčeve putanje: osnovni mašinski elementi, prenosni elementi sistema snage, drajveri za pobudu elektromotora i ostala mehatronička oprema koja omogućava rotacije uređaja po dve ose.

Konstrukcija solarnog tragača sastoji se iz tri dela:

1. ram solarnog tragača - čine ga standardizovane čelične kutije 30x30x1,5 mm. Na ram solarnog tragača postavljaju se solarni paneli. Ram solarnog tragača je prilagođen tako da se direktno u čelične kutije mogu postaviti spojnice koje solarne panele pričvršćuju za konstrukciju,
2. postolja uređaja - čine ga standardizovane čelične kutije 40x40x2mm. Na postolju uređaja ostavljeni su tačno određeni položaji da postavljanje betonskih balasta,
3. noseći stub solarnog tragača - dve vijčano vezane čelične kutije prilagodljivih dimenzija izrade.

Oblik i dimenzije baterije zavisi od potrebnog kapaciteta baterije koji može da zadovolji zahtevanu autonomiju solarnog sistema, uključujući i pogon solarnog tragača. Planirano je postavljanje sistema za akumulaciju energije unutar konstrukcije solarnog tragača u kutiji stuba solarnog tragača. Potrebni strujni kablovi uređaja takođe prolaze kroz stub solarnog tragača.

Osnovnu opremu koja omogućava rotaciju uređaja čine:

1. osnovni mašinski elementi prenosa snage (ležajevi, osovine, čaure, itd.),
2. pogonski motori okreta i kočnica solarnog tragača - projektovana su četiri motora jednosmerne struje. Dva motora se koriste za potrebe rotacije uređaja oko svoje dve ose. Preostala dva se koriste kao kočnice položaja, imaju ulogu da omogućе da uređaj zadrži zahtevanu poziciju u dve ose rotacije u odnosu na Sunce usled uticaja sila okoline na uređaj,
3. reduktori pogonskih motora i motora pogona kočnica - služe za dostizanje zadovoljavajuće brzine i momenta sile na osovinama osa rotacije solarnog tragača prilikom promene pozicije u odnosu na Sunce.

Dimenzionisanje motora i reduktora biće deo budućeg istraživanja.

Uređaj je projektovan tako da solarni paneli u optimalnim uslovima rada proizvode snagu na strani jednosmerne struje od 2,2 kW. Zbog postojanja gubitaka energije usled transformacije jednosmerne u naizmjeničnu struju u pretvaraču, otpornosti kablova, gubitka u sistemu skladištenja energije, uređaj je predimenzionisan na strani jednosmerne struje. Uzimajući u obzir sve pomenute gubitke energije, maksimalna proračunska snaga na izlazu iz uređaja ka korisniku u optimalnim uslovima rada je 2 kW. Uređaj ka korisniku obezbeđuje monofaznu struju. U sklopu sistema je predviđen energetska DC/AC pretvarač-invertor. Njegova uloga je da jednosmernu struju koja dolazi iz baterija za skladište energije pretvori u monofaznu naizmjeničnu struju.

Osnovnu elektro opremu u energetskom delu čine po označenim pozicijama na Slici 5(a) sledeći elementi:

1. četiri solarna panela snage 550 W,
2. glavni prekidač u DC kolu solarnih panela,
3. regulator punjenja (DC/DC pretvarač) sistema skladišta električne energije,
4. baterija kao sistem za skladištenje proizvedene električne energije,
5. DC link čvorište, odnosno „DC link bus“,
6. pomoćni ulaz za mrežno napajanje 230V, 50Hz ( u

slučaju da u sistemi postoji mrežno napajanje),

7. glavni prekidač na DC izlaznoj strani baterije,
8. energetska DC/AC pretvarač - invertor,
9. AC potrošači sa pripadajućim konektorima,
10. DC potrošači (pomoćna oprema i LED svetiljka).

Kao što se vidi na principskom blok dijagramu sa Slike 5(b) ceo sistem je mikroprocesorski koncipiran i upravljani. Kao bazni sistem upravljačke strukture koristi se odgovarajući mikrokontrolerski uređaj. Ovaj hardverski i softverski programabilni i rekonfigurabilni uređaj omogućava laku implementaciju mernih pristupnih tačaka tako da je putem ovog uređaja moguće lako i jednostavno električno prilagoditi razne vrste senzora (pozicije po azimutu i elevaciji, senzori sunčeve insolacije i brzine vetra, senzori nagiba i sl.) ali i perifernih uređaja, da komuniciraju sa mikroprocesorom ali i međusobno.

U sistemu je predviđen opcionalno i veliki broj ostalih raznovrsnih senzora (JK temperaturna sonda, senzor grmljavine, senzori pokreta, senzori vlažnosti i temperature okoline). Jedan od najbitnijih senzora koji se predviđa na uređaju je senzor globalnog položaja uređaja baziran na GPS komunikaciji. Ovaj senzor je direktno odgovoran da uz pomoć satelita koji se nalaze u orbiti zemlje primi odredi globalnu poziciju sistema. Globalna pozicija sistema se očitava u vidu informacija o geografskoj širini, geografskoj dužini i nadmorskoj visini, koju ovaj senzor direktno očitava sa satelita u geostacionarnoj orbiti zemlje. Ovaj senzor je sa glavnim mikrokontrolerskim sistemom povezan putem RS232 veze i glavni mikroprocesor po potrebi očitava globalnu poziciju celog uređaja. Ovo očitavanje se u principu ostvaruje uglavnom prilikom inicijalizacije sistema i na zahtev korisnika po potrebi. Digitalni kompas je poseban senzorski sistem koji je predviđen za integraciju u upravljačku strukturu i koji daje apsolutni azimut prednje ose uređaja u odnosu na geografski sever. Senzor u principu komunicira sa mikroprocesorom putem I2C Bus-a i očitavanjem podataka sa ovog senzora može se odrediti azimut uzdužne ose celog uređaja. Ovaj podatak zajedno sa podatkom o globalnoj poziciji se koristi u cilju praćenja položaja Sunca na nebu.

Algoritam hronološkog praćenja koji je u ovom slučaju predviđen je zasnovan na prirodnoj opservaciji Sunčeve pozicije za datu lokaciju, u datom periodu i za dato godišnje doba. Praćenje Sunčeve trajektorije je ustvari moguće ostvariti hronološki, tj. na osnovu unetih podataka o datumu i vremenu kao i podataka o geografskoj dužini i geografskoj širini i azimutu u odnosu na geografski sever postavljenog uređaja. Kontroler u svojoj internoj memoriji poseduje tabelu podataka o položaju Sunca u zavisnosti od geografske koordinate, doba dana kao i godišnjeg doba. Poređenjem ovih podataka iz tabele sa unetim podacima o mestu uređaja, kontroler proračunava zahtevani ugao rotacije oko vertikalne ose (elevaciju) i ugao rotacije oko horizontalne ose (azimut).

Na osnovu ovoga se kontroliše pozicija panela tako da upadni zraci uvek padaju pod pravim uglom na površinu solarnih panela. Ovaj metod je nezavisan od oblačnog vremena pošto paneli prate sunce u svakom trenutku vremena. Jedino što je potrebno, to je uzeti u obzir orijentaciju lokalnog koordinatnog sistema solarnih panela u odnosu na globalni koordinatni sistem (Zemlju).

#### IV DIMENZIONISANJE SISTEMA SKLADIŠTA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Zahtevani izlazni parametri koje uređaj mora da obezbedi ka korisniku, a za koje je potrebno definisati ostale komponente elektroenergetskog sistema uređaja su sledeći:

- izlazna snaga ka potrošaču treba da bude 2 kW,
- izlazni napon uređaja 230 V, 50 Hz, (monofazna naizmjenična struja),
- autonomnost napajanja potrošača usled nedostatka Sunčevog zračenja minimalno 2 h.

Prema principskoj blok šemi na Slici 5(a) i izlaznim uslovima koje uređaj treba da obezbedi ka potrošaču izvršeno je dimenzionisanje zadovoljavajućeg kapaciteta skladišta energije prema sledećim relacijama:

$$P_b = P_p + P_p \cdot \gamma = 2200 \text{ W} \quad (1)$$

$$P_b = V_b \cdot I_b \quad (2)$$

gde su:

$P_b$  - snaga koju je potrebno obezbediti iz baterijskog akumulatora energije,

$P_p$  - snaga koju zahteva potrošač na izlazu; usvojeno je da je  $P_p = 2000 \text{ W}$

$\gamma$  - faktor gubitaka energije; empirijski usvojeno da je  $\gamma = 0,1$  (odnosno 10%)

$V_b$  - napon baterije; usvojeno je da je  $V_b = 24 \text{ Vdc}$

$I_b$  - struja baterije,

$t$  - vreme rada koje je potrebno obezbediti potrošaču isporuku električne energije usled nedostatka sunčevog zračenja; usvojeno je da je  $t = 2 \text{ h}$ .

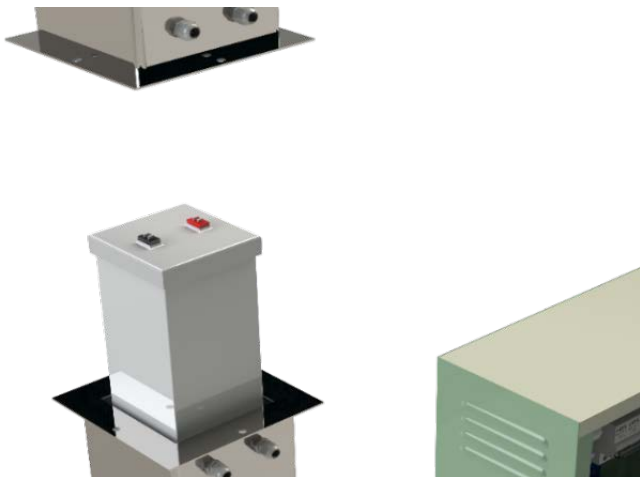
$\varepsilon$  - minimalni dozvoljeni stepen napunjenosti baterije ( tzv. „state of charge“ - SOC); usvojeno je da je  $\varepsilon = 0,3 = 30\%$ .

Za usvojene vrednosti iz jednačine (2) sledi da je struja baterije  $I_b = 91,6 \text{ A}$ . Na osnovu dobijene struje baterije, na osnovu vremena  $t = 2 \text{ h}$  i na osnovu minimalne napunjenosti baterije (SOC) od 30 %, dobija se da je zahtevani kapacitet baterije:

$$C_b = t \cdot I_b + t \cdot I_b \cdot \varepsilon = 238,16 \text{ Ah} \quad (3)$$

Usvojena vrednost kapaciteta baterije je:

$$C_{b*} = 240 \text{ Ah}$$



Slika 6. Prikaz sklopa stuba solarnog tragača. Položaj baterije unutar konstrukcije stuba uređaja

Usvojena su dve baterije AGM VRLA 12Vdc/120Ah specijalizovane za solarne aplikacije (sa dubinom pražnjenja do 70%), vezane u paraleli.

Uređaj je projektovan da se baterija postavlja unutar nosećeg stuba kao što prikazano na dispozicionom crtežu na Slici 6.

Stub solarnog tragača izrađen je iz dva pojedinačna stuba koji su međusobno povezani vijčanom vezom. Ovakav sklop omogućava lako sklapanje i rasklapanje uređaja usled potrebe za transportom ili intervencijom usled kvara električnih komponenti.

#### V PRORAČUN DEJSTVA SILE VETRA NA SOLARNE PANELE

Zbog uslova da solarni tragač bude lako prenosiv, u vidu montažno/demontažne konstrukcije, za stabilnost samog uređaja i otpor silama dejstva okoline koriste se betonski balasti. U zavisnosti od lokacije na kojoj se tragač postavlja, dejstva sile okoline se menjaju. Najveće opterećenje na solarne panele pravi sila vetra. Zbog toga je neophodno veoma precizno da se izračuna dejstvo vetra na solarni panel. U ovom poglavlju prikazaće se primer izračunavanja sile vetra na izabrani solarni panel u ovom sistemu.

Početni uslovi su sledeći:

- dimenzija solarnog panela - 2280x1134x35 mm,
- solarni tragač čija je lokaciji grada Beograda,
- teren na koji se postavlja tragač je potpuno otvoren, bez prepreka na koje vetar može da naiđe,
- fundamentalna osnovna brzina vetra-  $v_{b,0} = 21 \text{ m/s}$ ,
- teren kategorije I,
- visina uređaja je  $h = 4 \text{ m}$ ,
- za referentnu visinu iznad terena uzima se najviša tačka uređaja, koja iznosi  $z = 0,6 \cdot h = 2,4 \text{ m}$ .

Proračun sile dejstva vetra izračunava se na sledeći način:

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} = v_{b,0} \cdot c_{dir} \cdot c_{season} \cong 1 \quad (4)$$

gde su:

$c_{dir}$  - koeficijente pravca delovanja vetra,

$c_{season}$  - koeficijent delovanja vetra u toku različitih godišnjih doba.

Koeficijent hrapavosti terena i srednja brzina vetra se izračunavaju iz relacija (5) i (6), respektivno:

$$c_r(z) = k_r \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 1,02, \quad (5)$$

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b = 21,87 \text{ m/s} \quad (6)$$

gde su:

$c_r(z)$  - koeficijent hrapavosti terena [3],

$k_r$  - koeficijent u zavisnosti od kategorije terena [4],

$c_0(z)$  - koeficijent topografije terena [5], pošto topografija terena na utiče na povećanje brzine vetra usvaja se vrednost 1,

$v_m(z)$  - srednja brzina vetra.

Osnovni pritisak vetra ( $q_b$ ) i udarni pritisak vetra  $q_p$  računaju se na sledeći način:

$$q_b = \frac{1}{2} \rho \cdot v_b^2 = 295,4 \text{ Pa} \quad (7)$$

$$q_p(z) = (1 + 7I_V(z)) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho v_m^2 = c_e(z) \cdot q_b = 702,57 \text{ Pa} \quad (8)$$

$$I_V(z) = \frac{k_I}{c_0(z) \ln(z/z_0)} = 0,182 \quad (9)$$

$$c_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b} = 2,38$$

gde su:

$\rho = 1,29 \text{ kg/m}^3$  gustina vazduha,

$I_V(z)$  - intenzitet turbulencije,

$k_I$  - koeficijent turbulencije.

Spoljašnji pritisak vetra  $w_e$  se izračunava iz relacije (10):

$$w_e = q_p(z) \cdot c_{pe} = 702,57 \text{ Pa} \quad (10)$$

gde je  $c_{pe} = 1$  - koeficijent spoljašnjeg pritiska vetra. Usvaja se vrednost 1, obzirom da je objekat direktno izložen udaru vetra.

Na kraju se dobija sila opterećenja usled dejstva vetra:

$$F_{w,e} = c_s \cdot c_d \cdot \sum c_{pe} \cdot q_p(z) \cdot A_{ref} = 1816,5 \text{ N} \quad (11)$$

gde su :

$c_s \cdot c_d = 1$  - koeficijenti konstrukcije. Za objekte visine do 15 m usvaja se njihova vrednost 1,

$A_{ref}$  - referenta površina razmatranog elementa (površina jednog solarnog panela).

Na osnovu dobijenog rezultata ukupna sila vetra koja deluje na konstrukciju od četiri solarna panela uređaja je:

$$F_{w,e,u} = 4 \cdot F_{w,e} = 7266 \text{ N} = 7,266 \text{ kN.}$$

Ukoliko usvojimo najnepovoljniji slučaj da vetar deluje upravno na horizontalnu ravan, potrebno je obezbediti ukupnu masu uređaja ( $m_u$ ) od:

$$m_u = \frac{F_{w,e,u}}{g} \cdot s = 850,7705 \text{ kg}, \quad (12)$$

gde su:

$g$  - ubrzanje usled delovanja Zemljine gravitacije,

$s = 1,15$  - usvojeni stepen sigurnosti u proračunu.

Za dimenzionisanje potrebnih pogonskih motora osovina rotacija uređaja i pogonskih motora kočnica istih, uz sopstvene sile otpora uređaja, dobijeni rezultat sile vetra koristi se kao dodatni otpor pri rotacionom kretanju sistema za praćenja Sunca.

#### IV POTREBNE BRZINE ROTACIJE POGONA I UTICAJ NA ENERGETSKU EFIKASNOST

U zavisnosti od doba godine, osunčanost ne traje jednako u toku dana. Takođe elevacija Sunca se u toku godine menja shodno godišnjem dobu na Zemlji. Od ta dva parametra zavise brzine rotacije na osovina rotacije solarnog tragača. Primer za proračun brzine okretanja daće se za najkraći dan u godini. Prema podacima sajta [6] najkraći dan u 2021. godini za teritoriju Beograda je 23.12.2021. godine. Dnevna svetlost koja se može iskoristiti za stvaranje solarne energije traje u periodu od 7 h 58 min do 15 h 23 min. Ukupno trajanje dostupne obdanice je 7 h 25 min. Potrebno je da u tom periodu solarni uređaj napravi po azimutu rotaciju od  $153^\circ$ . Gledano u odnosu na azimut, položaj sunca u odnosu na sever, sunce izlazi na  $104^\circ$ , a zalazi na  $257^\circ$ . Solarno podne je tačno na  $180^\circ$  u 11 h 37 min. Prema pomenutim informacijama izračunava se ugaona brzina osovine ( $\omega$ ) i potreban broj obrtaja osovine ( $n$ ):

$$n = \frac{\omega}{2\pi} \approx 0,001 \frac{\text{obr}}{\text{min}}, \quad (13)$$

$$\omega = \frac{\theta}{t} = 0,0064 \frac{\text{rad}}{\text{min}}. \quad (14)$$

gde su:

$t = 7 \text{ h } i \text{ 25 min} = 445 \text{ min}$  - trajanje obdanice 23.12.2021.,

$\theta = 153^\circ \approx 2,7 \text{ rad}$  - ugao rotacije po azimutu.

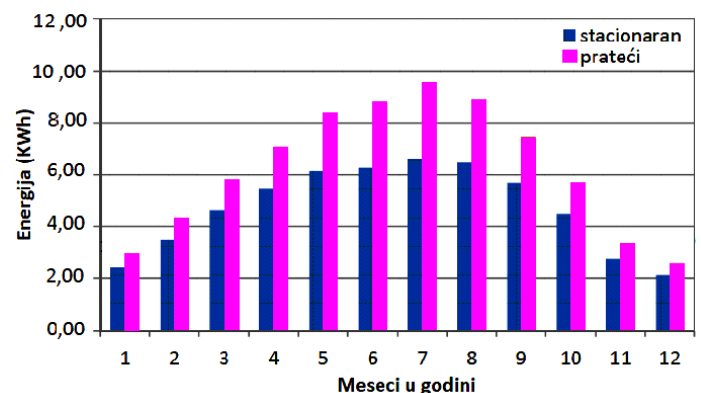
Međutim, zbog maksimalnog iskorišćenja Sunčeve energije prema krajnjem potrošaču usvaja se motor jednosmerne struje koji bi omogućio rotaciju uređaja po tačno određenim pozicijama u toku dana (tzv. sistem za *hronološko praćenje sunčeve putanje*) [7-12].

Algoritam hronološkog praćenja je zasnovan na prirodnoj opservaciji Sunčeve pozicije za datu lokaciju, u datom periodu i za dato godišnje doba. Praćenje Sunčeve trajektorije je ustvari ostvareno hronološki, tj. na osnovu unetih podataka o datumu i vremenu kao i podataka o geografskoj dužini i geografskoj širini i azimutu u odnosu na geografski sever postavljenog uređaja. Kontroler u svojoj internoj memoriji poseduje tabelu podataka o položaju Sunca u zavisnosti od geografske koordinate, doba dana kao i godišnjeg doba. Poređenjem ovih podataka iz tabele sa unetim podacima o mestu uređaja, kontroler proračunava zahtevani ugao elevacije i rotacije horizontalne ose.

Ovakvim principom rada uređaja praćenje putanje Sunca se ostvaruje aktiviranjem elektromotornih pogona po elevaciji i azimutu u diskretnim vremenskim trenucima. Pod pretpostavkom da se pogoni uključuju na svakih 15 min, to bi na početku i na kraju dana imali pomeranja oko  $2^\circ - 3^\circ$ , a sredinom dana  $5^\circ - 8^\circ$  po azimutu, dok bi po elevaciji skokovi bili umereniji od  $1^\circ - 2^\circ$  [7, 8].

Preciznije praćenje putanje Sunca bi moglo biti ostvareno pozicioniranjem po azimutu i elevaciji u svakom trenutku, ali ovaj način praćenja bi zahtevao značajnu potrošnju energije iz baterije i ne bi doveo do povećanja energetske efikasnosti sistema.

Mana prethodno opisanog načina dvo-osnog praćenja je što se njime ostvaruje značajna potrošnja električne energije iz sopstvenog napajanja, koje je inače ograničenog kapaciteta jer se radi o autonomnim sistemima. Servo pogoni koji se koriste u ovom slučaju troše električnu energiju čak i kada kretni sistem miruje (mora se obezbediti moment odnosno odgovarajuća struja pogonskih motora) [9].



**Slika 7.** Izmerene prosečna dnevna proizvodnja električne energije jedne mobilne solarne jedinice u zavisnosti od meseca u godini za stacionarni sistem i za prateći dvo-osni sistem [9]

Solarni sistemi sa jednim fiksnim i jednim pokretnim sistemom obezbeđuju povećanje iskorišćenja između 27 i 32% dok sistemi sa oba pokretna sistema povećavaju proizvodnju energije između 35 i 40% [8, 9].

Na Slici 7 je prikazan snimljeni dijagram prosečne dnevne proizvodnja električne energije mobilnog solarnog generatora pri stacionarnom položaju solarnih panela (fiksni azimut i fiksna elevacija - okrenut ka jugu) i pri dvo-osnom praćenju Sunčeve putanje, za interval jedne godine i po mesecima.

Solarni treker je primenjen u sklopu sistema za zalivanje ratarskih useva. Interesantno je uočiti da se najveća ušteda 35-45% se postiže u mesecima jun-septembar, a to su upravo meseci kada se vrši intenzivno navodnjavanje [13-16].

Predloženo rešenje solarnog tragač je deo razvoja mobilnih solarnih jedinica koje se tradicionalno razvijaju u Institutu Mihajlo Pupin. Ovaj uređaj je konceptijski zamišljen kao moderni automatizovan uređaj za proizvodnju električne energije koja se bazira na korišćenju OIE sunca i praćenju njegove putanje. Ciljni korisnici bi mogli biti individualni mali i srednji potrošači električne energije.

Kao samostalni izvor bez priključenja na električnu mrežu tzv. „off-grid“, predloženi uređaj ne zahteva nikakvu specijalnu građevinsku konstrukciju i energetske infrastrukturu. Pogodan je za korišćenje na različitim tipovima terena (ruralnim i urbanim) gde postoje povoljni uslovi za eksploataciju sunčeve energije, a naročito u oblastima sa visokom dnevnim insolacijama (4-6kWh/m<sup>2</sup> i preko). Dimenzionisan je za različite vremenske uslove i udare vetra do 80km/h, ali i za podnošenje velikih vrednosti vibracionog ubrzanja.

## VII ZAKLJUČAK

U radu je dat prikaz i opis idejnog rešenja solarnog solarnog tragača koji bi omogućio dostupnost električne energije iz OIE na lokacijama na kojima povremeno ne postoji isporuka napajanja iz elektroenergetske mreže ili u slučajevima kada ona nije uopšte dostupna.

U radu je opisan način funkcionisanja uređaja - solarnog dvo-osnog tragača i dati su osnovni proračuni koji se odnose na uticaja vetra na solarni uređaj. Princip rada solarnog tragača je da prati putanju Sunca po dve ose rotacije. Jedna osa prati azimut, dok druga prati elevaciju. Ovakvim radom uređaj je u optimalnom položaju u odnosu na Sunce u toku cele obdanice. Treba napomenuti da je konstrukcija uređaja zamišljena da se sa lakoćom uređaj može montirati i demontirati radi transporta na željenu lokaciju.

Osnovna svrha uređaja je da na lokacijama bez mogućnosti snabdevanja električnom energijom zadovolji potrebe napajanja različitih tipova potrošača koji su na tim lokacijama prisutni. Pod tim se prvobitno podrazumevaju sledeće primene:

- velike poljoprivredne površine - potrebe za navodnjavanjem, isporuka električne energije za pogon različitih vrsta pumpi u sistema navodnjavanja,
- prostrani pašnjaci - isporuka električne energije za pogon pumpi za pojila stoke,
- sistemi za navodnjavanja tipa „kap-po-kap“, u kojem

slučaju se obezbeđuje potrebna električna energija za pogon vodenih pumpi koje obezbeđuju punjenje vodenih skladišta (tankova sa vodom),

- za napajanje svih ostalih električnih uređaja i potrošača koji se imaju u svakodnevnom životu (vikendice, kampovi, sistemi LED rasvete i sl.),
- za napajanje električnom energijom potrošača i medicinskih terenskih centara u vanrednim situacijama (poplave, požari, zemljotresi i sl.),
- primene u turizmu i napajanje raznih turističkih atrakcija (vodoskoka, fontana, ribnjaka i sl.),
- vojne aplikacije (napajanje logora, vojnih bolnica i drugih vojnih objekata u pozadini).

Dalji razvoj predloženog uređaja vodi u pravcu kompletnog dimenzionisanja i izbora elektromotornih pogona, kao i proračuna svih gubitaka električne energije usled otpora u provodnicima, električnim komponentama uređaja i usled utroška električne energije za sopstvene potrebe. Sledeća istraživanja biće usmerena ka konačnom definisanju konstrukcije uređaja kao jedne važne celine. Na osnovu svih dobijenih rezultata izvršiće se tehno ekonomska analiza i poređenje sa postojećim sistema koji se danas koriste.

## ZAHVALNICA/ACKNOWLEDGEMENT

Istraživanje u ovom radu je delom podržano od strane *Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija*, Republike Srbije kroz u krovni projekat pod Ugovorom br. 451-03-47/2023-01/200103.

## LITERATURA/REFERENCES

- [1] United Nations Publications - Department of Economic and Social Affairs, *Energy Statistics Pocketbook*, Series E, No. 5, New York, 2022. <https://unstats.un.org/unsd/energystats/pubs/documents/2022pb-web.pdf> [pristupljeno 20.04.2023]
- [2] Panos, E., Densing, M., Volkart, K. Access to electricity in the World Energy Council's global energy scenarios: an outlook for developing regions until 2030, *Energy Strategy Reviews*, Vol. 9, pp. 28-49, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2015.11.003>
- [3] Lakshmi, V., Satyanarayana, M.V.R, Vindra, V. Study on performance of 220 kV M/C MA tower due to wind, *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, Vol. 3, No. 3, pp. 2474 - 2485, 2011.
- [4] Chin, M.W., Buron, C.L., Faccioli, E., Calvi, G.M., Gutierrez, J., Santanam, G. *Model building code for wind loads*, ACS - AEC, St. Clair, Trinidad and Tobago, 2003. <https://www.humanitarianlibrary.org/sites/default/files/2014/02/WindCode.pdf> [pristupljeno 22.04.2023]
- [5] Mehta, K.C., Coulbourne, W-L. *Wind Loads: guide to the wind load Provisions of ASCE 7-10*, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, 2010. <https://doi.org/10.1061/9780784412756>
- [6] Kalkulator za poziciju sunca - Online baze podataka, <http://sunce.5deg.com/> [pristupljeno 04.07.2023]
- [7] Jovanović, M.D., Despotović, Ž.V., Urukalo, Dj. The chronological system of solar tracking implemented on mobile solar generator - IMP MSEG, in *Proc. V International Conference on Renewable Electrical Power Sources*, Belgrade, Vol. 5, No. 1, pp. 107-113, 12-13th October 2017. <https://izdanja.smeits.rs/index.php/mkoiece/article/view/2948> [pristupljeno 25.04.2023]
- [8] Rodić, A., Despotović, Z.V., Jovanovic, M., Popic, S., Stevanovic, I. Mobile robotic solar generator MobiSun Pro Energy™ - Application in New Energy Technologies, in *Proc. VIII International Forum for Clean Energy Technologies 2014 ENERGY CHARTER = SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF SERBIA*, Novi Sad, 30th September - 1st October 2014. <https://doi.org/10.13140/2.1.4459.5208>

- [9] Despotović, Ž.V., Jovanović, M.D., Rodić, A., Stevanović, I. Praktične realizacije sistema za dvo-osno praćenje sunčeve putanje, in Proc. VII *Sajam energetske efikasnosti i obnovljivih izvora energije 2019*, Požarevac, Srbija, 25.-26. Oktobar 2019.
- [10] Al-Mohamad, A. Efficiency improvements of photo-voltaic panels using a sun-tracking system, *Applied Energy*, Vol. 79, No. 3, pp. 345-354, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2003.12.004>
- [11] Barsoum N. Fabrication of dual-axis solar tracking controller project, *Intelligent Control and Automation*, Vol. 2, pp. 57-68, 2011. <https://doi.org/10.4236/ica.2011.22007>
- [12] Abouzeid, M. Use of a reluctance stepper motor for solar tracking based on a programmable logic array (PLA) controller, *Renewable Energy*, Vol. 23, No.3-4, pp. 551-560, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(00\)00133-6](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(00)00133-6)
- [13] Majstorović, M., Despotović, Ž.V., Ristić, L. Application of mobile solar OFF-grid generator in irrigation system - Case study, in Proc. 2017 *International Symposium on Power Electronics (Ie)*, Novi Sad, Serbia, pp. 1-6, 19-21. October, 2017. <https://doi.org/10.1109/PEE.2017.8171710>
- [14] Despotović, Ž.V., Stevanović, I.R. Hibridni besprekidni sistem napajanja za navodnjavanje povrtarskih kultura na parceli "Grabovac"- Obrenovac, *Energija, Ekonomija, Ekologija*, Vol. 23, No. 2, pp. 17-25, 2021. <https://doi.org/10.46793/EEE21-2.17D>
- [15] Despotović, Ž.V., Rodić, A., Stevanović, I.R. Sistem napajanja i pametno upravljanje poljoprivrednim zemljištem korišćenjem obnovljivih izvora energije, *Energija, Ekonomija, Ekologija*, Vol. 24, No. 1, pp. 28-39, 2022. <https://doi.org/10.46793/EEE22-1.28D>
- [16] Despotović, Ž.V., Jovanović, M.D., Stevanović, I.R., Majstorović, M. Regulacija pritiska u mobilnom "OFF-GRID" fotonaponskom sistemu za navodnjavanje useva, in Proc. VI *Sajam Energetske efikasnosti 2018*, Požarevac, 30-31. Oktobar 2018.

## AUTORI/AUTHORS

**msr Marko S. Đurović** - master inž. mašinstva, Institut Mihajlo Pupin - Projektingeniering, d.o.o., Beograd, marko.djurovic@impprojekt.com, ORCID [0009-0001-7461-8044](https://orcid.org/0009-0001-7461-8044)

**dr Željko V. Despotović** - naučni savetnik, Institut Mihajlo Pupin, zeljko.despotovic@pupin.rs, ORCID [0000-0003-2977-6710](https://orcid.org/0000-0003-2977-6710)