

DOI: [10.46793/CIGRE37.B4.04](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.B4.04)**B4.04****DVOOSNI ELEKTROMOTORNI POGON NOSAČA SOLARNIH PANELA ZA
PRAĆENJE SUNČEVE PUTANJE****TWO-AXIS ELECTRIC MOTOR DRIVE OF SOLAR PANELS CARRIER FOR
TRACKING THE SUN'S TRAJECTORY****Željko V. Despotović, Ilija R. Stevanović, Aleksandar Rodić, Jelena Ilić***

Kratak sadržaj: U radu je predstavljena realizacija regulisanog elektromotornog pogona nosača solarnih panela u cilju praćenje sunčeve putanje po dve ose. Četiri solarna panela, svaki snage od 375W su montirana na preklopivim nosačima. Svaki od pogona sadrži IGBT drajvere za pogon grupe elektromotor-reduktor i odgovarajuće enkodere za pozicioniranje. Algoritmom upravljanja je obezbeđeno hronološko praćenje sunčeve putanje, odnosno intermitentan rad elektromotornog pogona, čime se obezbeđuje značajna ušteda u potrošnji električne energije. U solarnom sistemu između ostalog postoje i MPPT punjač, baterijska banka 48V/720 Ah i inverter 48 Vdc/3x230V, 50Hz izlazne snage 5.5 kW. Napon napajanja pokretačkih elektromotora i pripadajućih uređaja energetske elektronike je 24 Vdc. Na kraju je dat prikaz realizovanog elektromotornog pogona i neki ključni eksperimentalni rezultati.

Ključne reči: *PV paneli, praćenje sunčeve putanje, dvoosni pogon, energetska elektronika, upravljanje*

Abstract: The paper presents the implementation of a regulated electric motor drive of the solar panel carrier in order to track the sun's path along two axes. Four solar panels, each with a power of 375W are mounted on a folding carrying construction. Each of the drives contains IGBT power drivers for driving the electric motor with gear box and corresponding encoders for positioning. The control algorithm provides chronological tracking of the sun's path, that is, intermittent operation of the electric drive, which ensures significant savings in electricity consumption. The solar system includes, among other things, an MPPT charger, a 48V/720 Ah battery bank and a 48 Vdc/3x230 V, 50 Hz inverter with output power of 5.5 kW. The power supply voltage of the driving electric motors and corresponding power electronics devices is 24 Vdc. At the end, a physical representation of the realized electric motor drive and some key experimental results are given.

Key words: *PV panels, solar tracking, two-axes drive, power electronics, control*

* Željko V. Despotović, Institut Mihajlo Pupin, zeljko.despotovic@pupin.rs

Ilija R. Stevanović, Institut Mihajlo Pupin, ilija.stevanovic@pupin.rs

Aleksandar Rodić, Institut Mihajlo Pupin, Univerzitet u Beogradu, aleksandar.rodic@pupin.rs

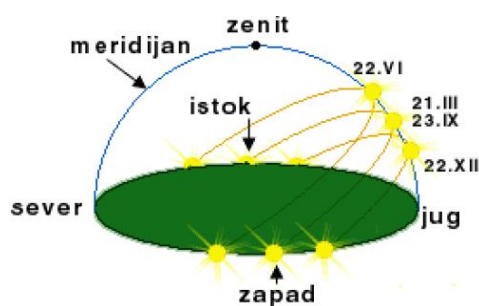
Jelena Ilić, Institut Mihajlo Pupin, Univerzitet u Beogradu, jelena.ilic@pupin.rs

1 UVOD

Pozicioniranje fotonaponskih panela je jedna od mogućih metoda za optimalno iskorišćenje i prikupljanje maksimalno moguće sunčeve energije. Pozicioniranje je bazirano na održavanje orijentacije površine fotonaponskog panela prema suncu i to normalno u odnosu na upadno sunčevo zračenje. Po uzoru na prirodne procese orijentisanja biljaka ka suncu (tipičan primer je suncokret), moguće je sličan princip primeniti u optimizaciji kompletnog fotonaponskog sistema. Neka istraživanja su ustanovila razliku i do maksimalno 40% u korist sistema sa inteligentnim praćenjem Sunca u odnosu na sisteme sa fiksnim nagibom [1]-[4].

Sistem za solarno praćenje Sunčeve putanje, popularno nazvan „solarni tragač” (eng. *solar tracker*) je ustvari elektro-mehanički uređaj koji obezbeđuje na posmatranoj lokaciji na Zemlji, orijentisanje aktivne površine fotonaponskog panela obzirom na relativni položaj Sunca na nebu. Relativni položaj Sunca iznad posmatrane lokacije zavisi od njene geografske širine, dana u godini i od vremenskog trenutka u datom danu. Pri ovom treba napomenuti da je od veoma bitnog značaja godišnje doba.

Za praktične primene koje se odnose na maksimalno iskorišćenje energije sunčevog zračenja je veoma bitna Sunčeva putanja gledano sa određene pozicije na površini Zemlje. Ovaj prikaz je dat na Slici 1.

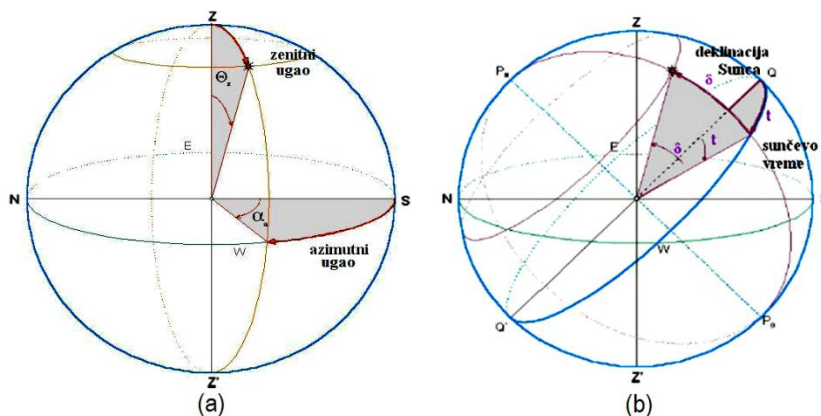


Slika 1: Sunčeva putanja gledano sa pozicije na Zemlji

Prividno izgleda da se Sunce kreće a da Zemlja miruje. Posle 22. decembra Sunce je svaki dan sve bliže zenitu. To traje do 22. juna posle čega je kulminacija Sunca sve bliža horizontu. Za godinu dana Sunce načini pun krug oko Zemlje što znači da ono po nebu putuje srednjom brzinom nešto manjom od $1^\circ/\text{dan}$ ($360^\circ: 365 \text{ dana}$).

Od veoma bitnog značaja za praćenje Sunčeve putanje je izbor koordinatnog sistema. U primenama praćenja Sunčeve putanje se obično koriste dva tipa koordinatnih sistema: (1) horizontski nebeski i (2) lokalni ekvatorski. Svaki od njih ima određene prednosti za konkretnu aplikaciju. Prikaz ovih koordinatnih sistema je dat na Slici 2 [6]-[7].

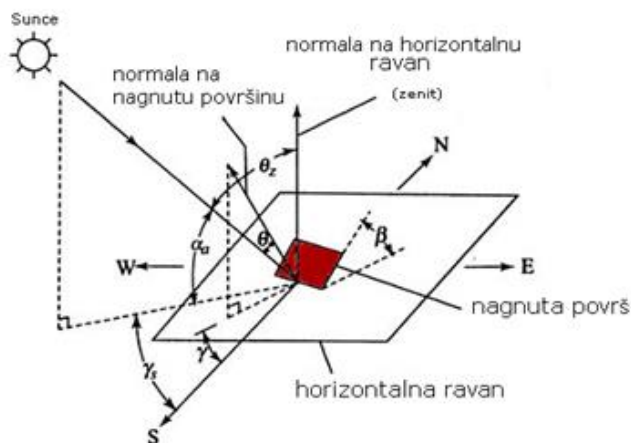
Horizontski nebeski koordinatni sistem je prikazan na Slici 2(a). Ovaj se nebeski koordinatni sistem može upotrebljavati za praćenje bilo kojeg nebeskog tela na veoma jednostavan način. Za razliku od drugih nebeskih koordinatnih sistema ovaj sistem je fiksiran u odnosu na Zemlju, a ne na nebeska tela (obično su to zvezde). Iz ovog razloga se zenitni ugao Θ i azimutni ugao α menjaju tokom Zemljine revolucije. Ovaj slučaj odgovara relativnom položaju Sunca na nebu koji pratimo u toku godine. Zbog činjenice da je ovaj koordinatni sistem definisan proizvoljno odabranom ravni lokalnog horizonta, u jednako vreme na različitim tačkama posmatranja definisani zenitni i azimutni ugao imaju različite vrednosti za isto nebesko telo. Ovaj sistem je jako sličan sa geografskom koordinatnom sistemom.



Slika 2: Nebeski koordinatni sistemi; (a) horizontski , (b) lokalni ekvatorski

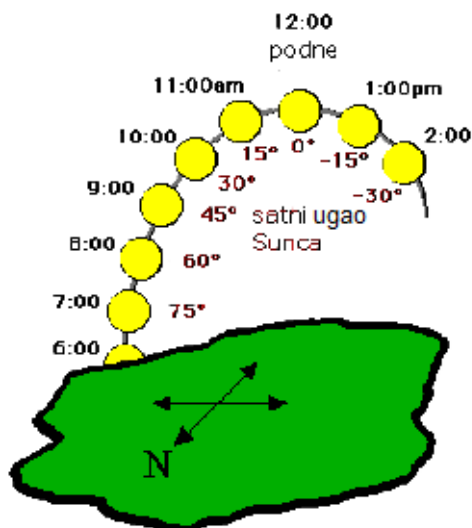
Lokalni ekvatorski koordinatni sistem je prikazan ba Slici 3(b). Primarna osa P_n-P_s je definisana tzv. *krugom nebeskog ekvatora*, dok je sekundarna osa definisana tzv. *krugom lokalnog nebeskog meridijana* Q-Q', kao i kod horizontskog nebeskog sistema. Ovaj sistem je fiksiran za zvezde i uz pomoć njegovih koordinata može se jednoznačno definisati trenutni položaj Sunca u odnosu na Zemlju. Dve koordinate koje definišu takav položaj su: deklinacija Sunca δ i pravo Sunčevo vreme t .

Na Slici 3 je dat prikaz upadnog Sunčevog zračenja na nagnutu površinu fiksiranu na zemlji. Posmatrajući trigonometrijske odnose na Slici 3, lako se može doći do zaključka da za zadovoljen uslov normalnosti Sunčevih zraka (normalni na nagnutu površinu), ugao β postaje jednak uglu θ_z . Drugim rečima, posmatranu površinu potrebno je nagnuti za zenitni ugao Sunca: $\beta = \theta_z$.



Slika 3: Upadno Sunčevo zračenje u odnosu na nagnutu površinu

Praćenje Sunca fotonaponskih panela ne zahteva naročitu preciznost. I kada su paneli nagnuti za 5° u odnosu na normalu prema Suncu, njihova izlazna snaga je u okviru 0,5 % od maksimalne snage koja bi se imala za direktno usmereni solarni panel. Za realizaciju sistema praćenje Sunčeve putanje je od veoma velike važnosti odnos pravog sunčevog vremena i satnog ugla. Kao što prikazuje Slika 4, na svakih 1h, satni ugao se promeni za 15° , odnosno $15^\circ/60 \text{ min} = 0.25^\circ/\text{min}$. Na 15 min je potrebno zakrenuti panel po azimutu (elevacija je fiksirana) za približni inkrement ugla od 3.75° . Treba napomenuti da je za razna godišnja doba ovaj inkrement promenljiv.



Slika 4 : Odnos pravog Sunčevog vremena i satnog Sunčevog ugla

2 NAČINI PRAĆENJA SUNČEVE PUTANJE

Prednosti koje se postižu sistemima za praćenje sunčeve putanje postaju aktuelne. Cena servo pogona i pripadajućih elektronskih sklopova su u stalnom padu. Umesto fiksnih sve više koriste manje solarne jedinice od na primer 4 - 6 panela bilo sa sopstvenim pogonom, bilo sa prenosnim sistemima koji pomeraju nekoliko nezavisnih jedinica. Postoje takođe i podele koje uzimaju u obzir masu pokretnih solarnih sistema, kinematiku pogonskih sistema (kinematsku strukturu), vrste pogona (elektromotorni: AC, DC, koračni, hidraulički, pneumatski) i sl. Prema načinu praćenja putanje Sunca, ovi sistemi mogu biti: (1) pasivni, (2) aktivni i (3) hronološki [8].

2.1 Pasivno praćenje putanje Sunca

Najjednostavniji sistem za pasivno praćenje je zasnovan na ručnom podešavanju nagiba solarnog panela prema Suncu, pri čemu je solarni panel okrenut ka južnoj strani (dakle ugao po azimutu je fiksiran). Obično je za dato godišnje doba i za lokaciju na Zemljinoj površini ovaj nagibni ugao poznat. Stoga se podešavanje nagiba standardno vrši četiri ili u nekim slučajevima, dva puta u toku godine. Sistem ne zahteva nikakvu potrošnju energije u bilo kojem vidu (električnom, termičkom, hidrauličkom i sl.). Sistem je jeftin i ne zahteva neki veći materijalni izdatak. Potrebno je jedino obezbediti jednostavan ručni kretni mehanizam sa mogućnošću fiksiranja u nekoliko položaja. Za ovaj sistem se koristi metalni ram u obliku mreže. Solarni paneli mogu biti prikačeni tako da budu fiksirani ili da se njihov ugao može prilagođavati. Za ovaj tip montaže panela, površina zemlje se mora pripremiti na određeni način.

Napredniji sistemi za pasivno praćenje Sunca su bazirani na postojanju određene ne električne potencijalne razlike (termičke, pritisne, i sl.) koja se meri u krajnjim tačkama panela.

Zbog postojanja nagiba u odnosu na zrake, jedna tačka na primer može biti više zagrejana u odnosu na drugu, tako da se korigovanjem položaja solarnog panela ta razlika poništava. Može se koristiti neki medijum, npr. komprimovani gas pod pritiskom sa niskom tačkom ključanja (tipično *freon*), čiji se pritisak menja usled različite temperaturne zagrejanosti, pa se izjednačavanjem pritiska tj. promenom položaja panela izjednačava temperatura. Osnovno pitanje je kako se može vršiti korigovanje položaja u ovom slučaju [9].

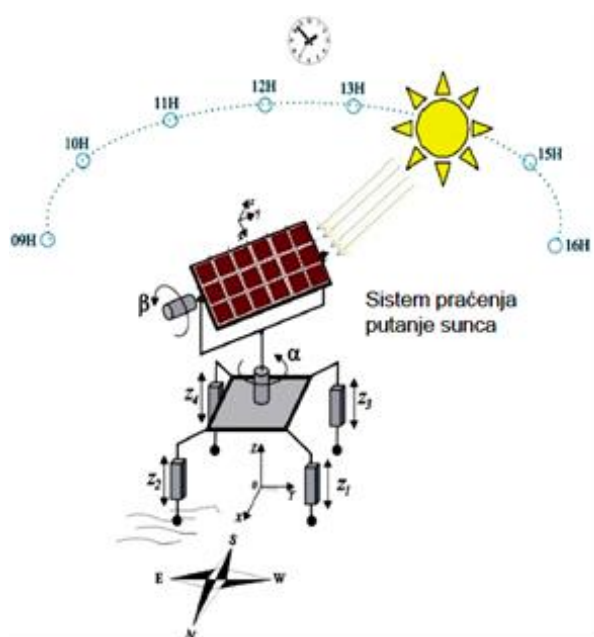
2.2 Aktivno praćenje putanje Sunca

Kod aktivnog praćenja, položaj Sunca na nebu tokom dana se prati kontinualno pomoću odgovarajućih senzora. Takav senzor aktivira aktuator (motor) solarnog sistema u trenutku kada izmerena veličina izađe izvan okvira (podešenih) vrednosti i uvodi solarni sistem u novi maksimum, tj. podešava solarni panel normalno u odnosu na Sunčeve zrake. Ovaj način je pouzdan izuzev za vreme visoke oblačnosti ili kada se na neki drugi način izazove pojava senke na solarnom panelu.

Mana ovog načina je što on ostvaruje značajnu potrošnju 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).

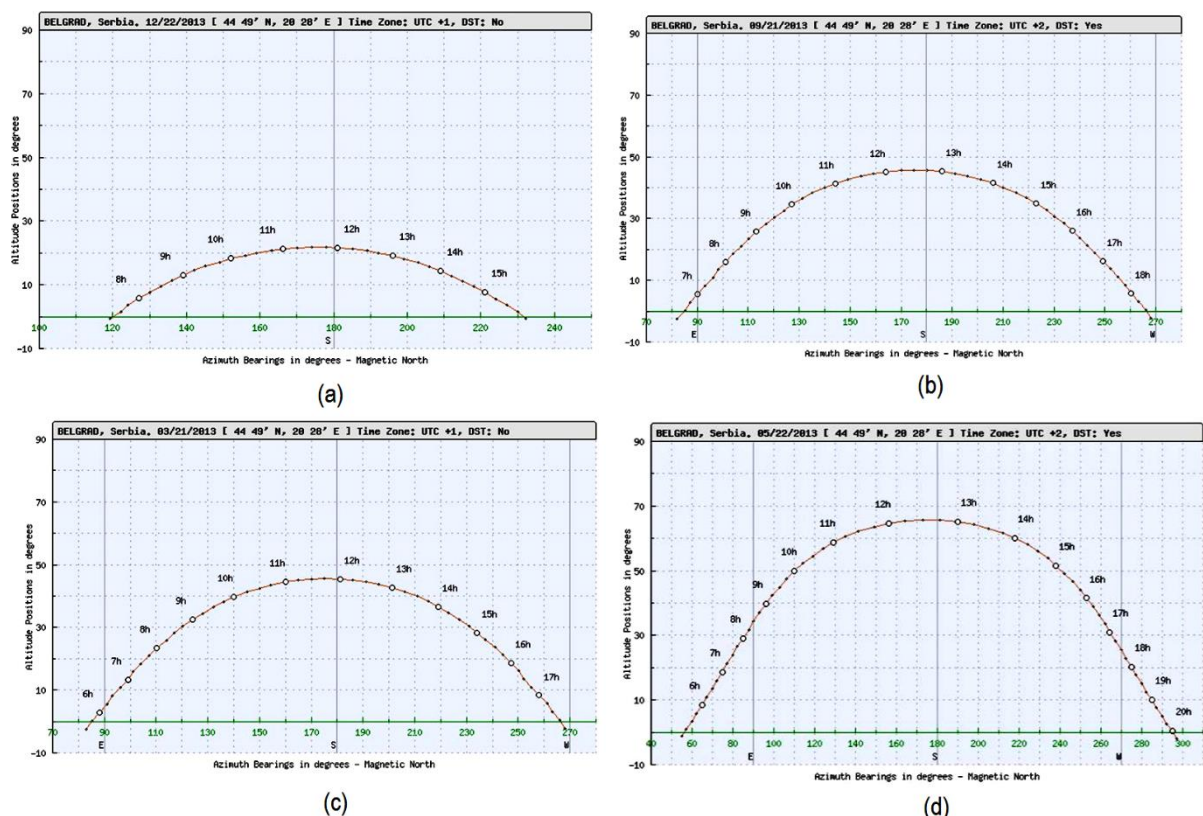
2.3 Hronološko praćenje putanje sunca

U cilju praktične realizacije sistema za praćenje putanje sunca u Institutu „Mihajlo Pupin“ – Centar za robotiku, posebna pažnja je posvećena na istraživanju i projektovanju sistema sa hronološkim praćenjem. Rezultati ovih istraživanja i realizacija su dati u referencama [10]-[16]. Rad implementiranog sistema, koji će kasnije biti opisan detaljnije, se zasniva na prirodnom opažanju položaja Sunca za dato područje i dati vremenski period tokom godine. Principski prikaz je dat na Slici 5.



Slika 5: Principski prikaz hronološkog praćenja Sunčeve putanje[10]

To praktično znači da se za određene geografske koordinate i određeni vremenski period može programski odrediti položaj Sunca tokom obdanice i da se u skladu sa programom može upravljati položajem solarnog panela tokom dana, tokom perioda korišćenja. Ovaj sistem se može koristiti i u brdovitim predelima. Ovakav način pozicioniranja ne zavisi od oblačnosti jer se u svakom trenutku zna položaj Sunca. Jedino o čemu treba da se vodi računa je orijentacija lokalnog koordinatnog sistema solarnog panela u odnosu na globalni koordinatni sistem (Zemlja). Na Slici 6 su prikazane snimljene tipične trajektorije Sunca od izlaska do zalaska, za lokaciju grada Beograda i za četiri godišnja doba.



Slika 6 : Trajektorija Sunca za lokaciju grada Beograda i za četiri karakteristična slučaja ; (a) 22 Decembar , (b) 21 Septembar , (c) 21 Mart , (d) 22 Maj[10]

Za svaku geografsku lokaciju i za svaki vremenski period se može programirati položaj solarnog panela, tj. optimizovati njegov položaj. Analizom dijagrama sa Slike 6 uočava se da se tokom obdanice od 05:00 do 20:15 Sunce kreće po azimutu između 55° i 297° dok se po elevaciji taj ugao kreće između -2° do maksimalnih 65° .

Pod pretpostavkom da za azimut i elevaciju koriste dva nezavisna stepena slobode (dva elektromotorna pogona) kretanja za zakretanje nosača solarnih panela i da se pogoni svakog od pogona uključuju na svakih 15 minuta to bi značilo da bi se na početku i na kraju dana imali pomeranja oko 2° - 3° , a sredinom dana 5° - 8° po azimutu, dok bi po elevaciji skokovi bili umereniji od 1° - 2° . Solarni sistemi sa jednim fiksni i jednim pokretnim sistemom obezbeđuju povećanje iskorišćenja između 20 % i 32 %, dok sistemi sa oba pokretna sistema povećavaju proizvodnju energije između 30 % i 40 % [1]-[5].

3 PRAKTIČNA REALIZACIJA I KARAKTERISTIKE DVOOSNOG ELEKTROMOTORNOG POGONA

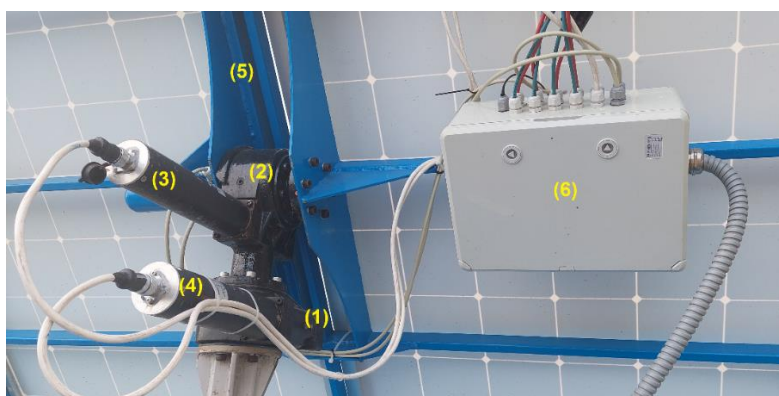
U Institutu Mihajlo Pupin u *Centru za robotiku* je razvijen mobilni *dvoosni* fotonaponski sistem, tzv. *mobilni solarni generator* (MSG), kojim je obezbeđeno pretvaranje solarne energije u električnu. Prikaz realizovanog sistema je dat na Slici 7. Na Slici 7(a) je dat prikaz MSG gledano sa prednje frontalne strane, gde se jasno uočava konstrukcija nosača solarnih panela ($4 \times 375 \text{ W} = 1500 \text{ W}$), dok je na Slici 7(b) dat prikaz konstrukcije gledano sa zadnje strane gde se uočava *dvoosni* elektromotorni pogon koji obezbeđuje nezavisno pomeranje noseće konstrukcije i rama fotonaponskih panela po azimutu i elevaciji.

MSG je ustvari automatizovan uređaj za proizvodnju električne energije koja se bazira na korišćenju obnovljive energije sunca i praćenju njegove putanje. Namijenjen je individualnim korisnicima, malim i srednjim potrošačima električne energije, kao samostalni izvor bez priključenja na električnu mrežu tzv. „off-grid”. Univerzalne je primene: kućne aplikacije, poljoprivreda, turizam, itd. Ne zahteva nikakvu specijalnu građevinsku konstrukciju i energetska 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 koje se kreću u opsegu $(4\div 6)$ kWh/m². MSG je dimenzionisan za različite vremenske uslove i udare vetra do 80km/h, ali i za podnošenje velikih vrednosti vibracionih ubrzanja koje se javljaju tokom transporta sistema putem transportne auto prikolice.



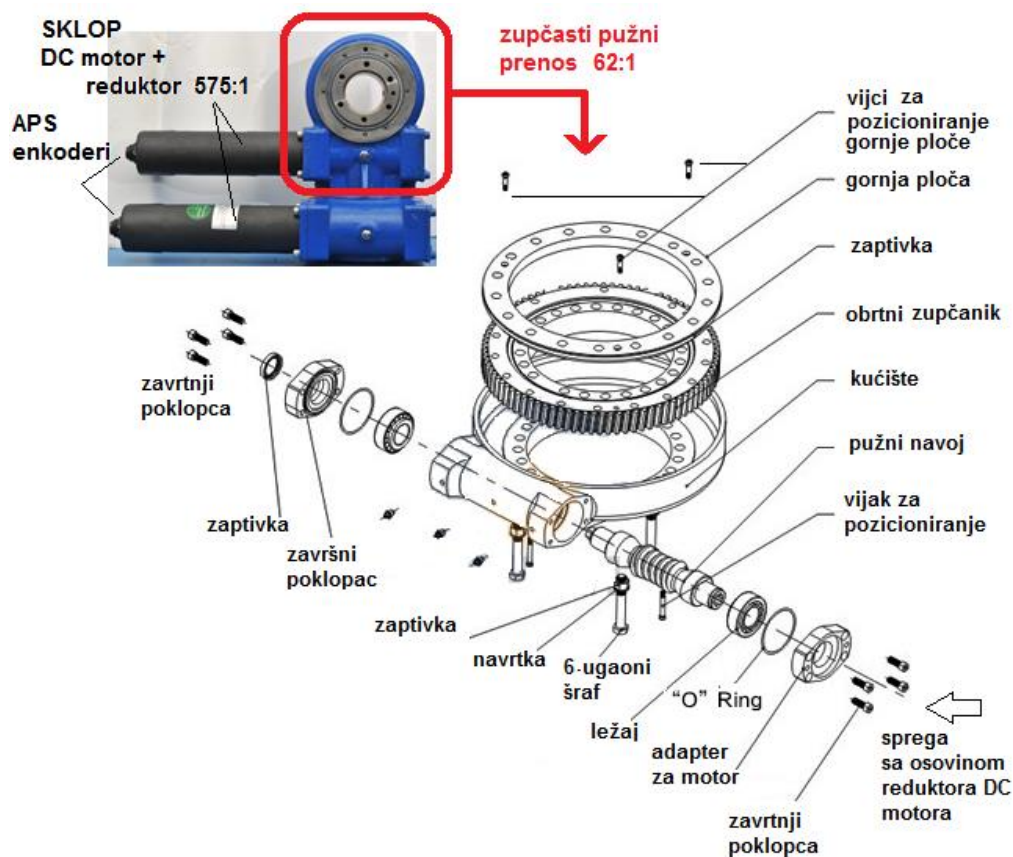
Slika 7: Izgled dvoosnog fotonaponskog mobilnog solarnog generatora (MSG); (a) izgled prednje strane, (b) izgled zadnje strane sa elektromotornim pogonom

Na Slici 8 je prikazan obrtni *dvoosni* pogon (tzv. „*slewing drive*”) nosača solarnih panelu u okviru MSG. Konstrukcija je bazirana na dva obrtna aktuatora. Svaki od ovih aktuatora se sastoji od DC motora sa planetarnim reduktorom i pužnog prenosnika. Na Slici 8 pozicija (1) prikazuje obrtni pogon po azimutu, dok pozicija (2) prikazuje obrtni pogon po elevaciji. Svaki od ovih pogona sadrži i pripadajuće magnetne apsolutne enkodere bazirane na Holovom efektu, kojima je obezbeđeno merenje pozicije i brzine. Na Slici 8 pozicija (3) pokazuje mesto ugradnje apsolutnog enkodera po elevaciji, dok pozicija (4) pokazuje apsolutni enkoder po azimutu. Oba pogona su mehanički spregnuta sa konstrukcijom rama, odnosno sa konstrukcijom nosača solarnih panela, koji je prikazan na poziciji (5), dok su drajveri za DC motore, merni pretvarači i prilagodna elektronska kola, upravljački i napojni deo smešteni u razvodnom ormariću označenom sa pozicijom (6).

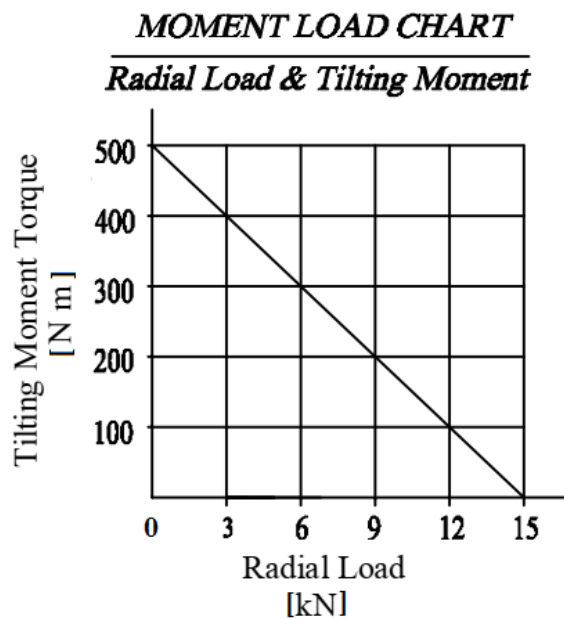


Slika 8 : Izgled i dispozicija dvoosnog obrtnog pogona („*slewing drive*”) mobilnog solarnog generatora (MSG)

Na Slici 9 je dat prikaz složenog mehaničkog prenosnika koji se sastoji od pužnog i zupčastog prenosa. Na Slici 10 je data zavisnost nagibnog momenta u funkciji radijalnog opterećenja.



Slika 9 : Prikaz pužno-zupčastog prenosa



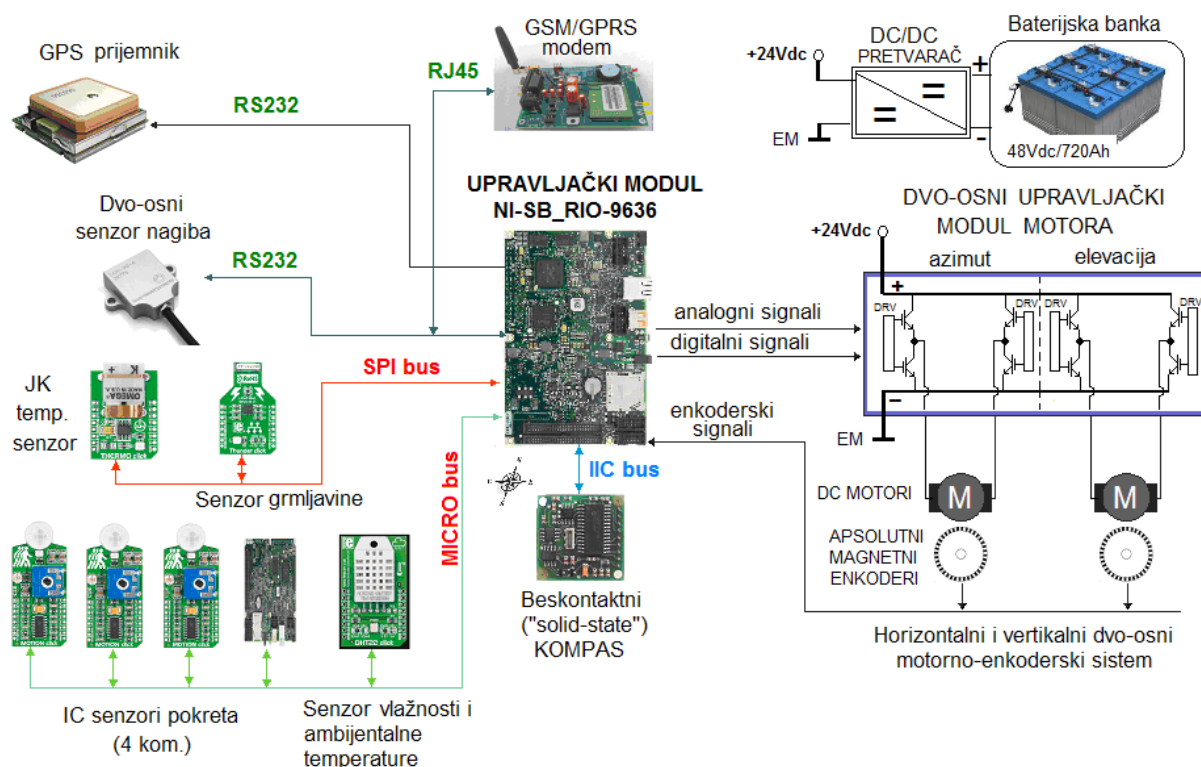
Slika 10: Karakteristika nagibnog momenta u zavisnosti od radijalnog opterećenja

Obrtni zupčanik je smešten i zaptiven u specijalnom kućištu koje je zatvoreno sa gornje strane pločom putem odgovarajućih vijaka. Pužni navoj je takođe smešten u zaptivenom kućištu, pri čemu je mehanički spregnut sa obrtnim zupčanikom. Ovaj sklop je opremljen „O”- ringom i adapterom za mehaničko sprezanje sa osovinom planetarnog reduktora DC motora.

U nastavku su date neke osnovne elektro-mehaničke karakteristike primenjenih pogona sa DC motorima (azimut i elevacija). DC pogonski motori za obe ose su nominalnog napona 24 Vdc, nominalne struje 1,2A, nominalne brzine obrtanja od 1800 ob/min. Prenosni odnos planetarnog motornog reduktora je 575:1, dok je prenosni odnos pužnog reduktora 62:1. Nominalna vrednost obrtnog momenta na samom vratilu izlaznog aktuatora, za svaku od osa je 400 Nm, dok je izlazna brzina obrtanja 0.048 ob/min. Maksimalni zakretni moment je 500 Nm. Moment držanja za obe ose je 2000 Nm. Maksimalno aksijalno opterećenje na svakom od prenosnika je 30 kN, dok je maksimalno radijalno opterećenje 15 kN. Tačnost pozicioniranja za obe ose je $\leq 0.2^\circ$. Stepenn mehaničke zaštite sklopa je IP65, dok je temperaturni opseg -40°C do $+80^\circ\text{C}$.

4 MERNO-UPRAVLJAČKI SISTEM DVOOSNOG POGONA ZA PRAĆENJE SUNČEVE PUTANJE

Na Slici 11 je prikazana principna blok šema realizovanog sistema za dvoosno praćenje. Sistem je baziran na hronološkom praćenju Sunčeve putanje koje je opisano u poglavlju 2.3. Sistem za hronološko praćenje se sastoji od sledećih modula: (1) DC/DC napajanje sistema 48 Vdc/24 Vdc (2) Upravljački mikroprocesorski modul NI-SB RIO 9636 proizvodnje *National Instruments*, (3) GPS prijemnik, (4) GSM/GPRS modem, (5) beskontaktni „solid state” kompas, (6) dvoosni senzor nagiba (inklinometar), (7) pobudni sistem DC motora baziran na H-mostu sa IGBT prekidačima, (8) primarni merni sistem (apsolutni magnetni enkodери za merenje pozicije po azimuti i po elevaciji), (9) sekundarni sigurnosni i pomoćni merni sistem (JK temperaturni senzor, senzor grmljavine, senzori pokreta, senzor vlažnosti i sl.)



Slika 11: Blok šema implementiranog sistema za dvoosno praćenje u sklopu uređaja MSG

GPS prijemnik služi za određivanje pozicije objekta MSG, odnosno poziciju u globalnom koordinatnom sistemu (daje informaciju o geografskoj širini, dužini i nadmorskoj visini). Beskontaktni „*solid state*” kompas određuje relativnu orijentaciju uređaja u odnosu na pravac magnetnog severa. Dvoosni senzor nagiba (inklinometar) određuje nagib uređaja po dve ose u odnosu na horizontalnu ravan.

Kao što se vidi na blok dijagramu na Slici 11, ceo sistem je mikroprocesorski koncipiran i upravljan. Kao bazni sistem upravljačke strukture koristi se mikrokontrolerski modul SBRIO NI 9636 firme *National Instruments*. Posebna karakteristika ove mikroprocesorske ploče je snažan 32 bitni mikroprocesor na bazi ARM arhitekture kao i vrlo robusni i snažni hardverski programabilni i rekonfigurabilni elektronski uređaj FPGA firme XILINX, koji omogućava laku implementaciju najsloženijih softverskih algoritama. Stoga je putem ovog uređaja moguće lako i jednostavno obezbediti prilagođenje raznih vrsta senzora i perifernih uređaja za komuniciraju sa mikroprocesorom, ali i međusobno.

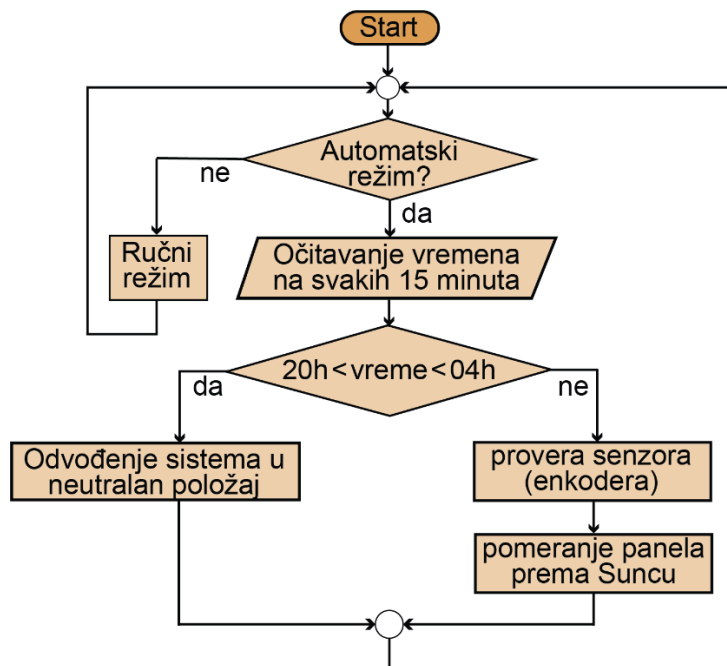
U sistemu je implementiran veliki broj namenskih senzora (JK temperaturna sonda, senzor grmljavine, senzori pokreta, senzori vlažnosti i temperature okoline). Tu se između ostalih izdvaja GPS komunikacioni senzor pozicije uređaja. Ovaj senzor je direktno odgovoran da uz pomoć satelita koji se nalaze u orbiti zemlje odredi globalnu poziciju sistema. Globalna pozicija sistema se očitava u vidu geografske širine, geografske dužine i nadmorske visine koju ovaj senzor direktno očitava od satelita u geo-stacionarnoj orbiti zemlje. Ovaj senzor je sa mikrokontrolerom povezan putem RS232 veze (RJ 45) i 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 integrisan u upravljačku strukturu, koji daje apsolutni azimut prednje ose uređaja u odnosu na geografski sever. Senzor komunicira sa mikroprocesorom putem I²C Bus-a i očitavanjem podataka ovog senzora se određuje azimut uzdužne ose celog uređaja. Ovaj podatak zajedno sa podatkom o globalnoj poziciji se koristi u cilju praćenja položaja Sunca na nebu.

5 ALGORITAM HRONOLOŠKOG PRAĆENJA PUTANJE SUNCA

Algoritam hronološkog praćenja koji je u ovom slučaju primenjen, 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 azimuta. Na osnovu ovoga se kontroliše pozicija solarnih panela, tako da upadni zraci uvek padaju pod pravim uglom u odnosu na njihovu površinu. 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).

Dijagram toka (tzv. „*flow-chart*”) osnovnog programa dvoosnog praćenja koji je implementiran u programu C je dat dijagramom na Slici 12.



Slika 12 : Dijagram toka osnovnog programa koji je implementiran u sistemu dvoosnog praćenja

U okviru softverski implementiranog upravljanja pogonima po azimutu i elevaciji su obezbeđeni ručni i automatski režim rada sistema. Kada se izabere ručni režim, ukoliko su bili aktivirani, pogonski DC motori se zaustavljaju, čime se omogućava ručno upravljanje sistemom. Ručno upravljanje se obezbeđuje odgovarajućim tasterima koji se nalaze na pultu rukovaoca. Automatski režim omogućava konzistentno praćenje sunca tokom dana, dok se tokom noći sistem prevodi u neutralni (tzv. „*homing*”) položaj. Softver se oslanja na informacije o tačnom vremenu koje dobija uz pomoć opisanog GPS uređaja, a koji podatke dobija satelitski. U okviru dnevnog režima rada, sistem nakon 20.00 h odlazi u neutralni položaj, koji podrazumeva okretanje i postavku orijentacije sistema na gore, tj. do vertikalnog limita. Ovim se takođe smanjuje verovatnoća narušavanja stabilnosti u slučaju jakog vetra. U neutralnom položaju ostaje do jutra u 04.00 h, odnosno do onog trenutka kada algoritam proračuna da je sunce izašlo, kada se sistem okreće ka istoku, u adekvatan položaj za dalje praćenje sunca tokom dana. U automatskom režimu se u toku dana na svakih 15 minuta vrše očitavanja, tj. provere trenutnog položaja sunca. Sistem prati položaj sunca od istoka, preko juga, ka zapadu, uz odgovarajuću elevaciju, tj. nagib po vertikali, kako bi sunčevi zraci upravno padali na fotonaponski panel, a sve u cilju maksimalnog iskorišćenja energije sunčevih zraka.

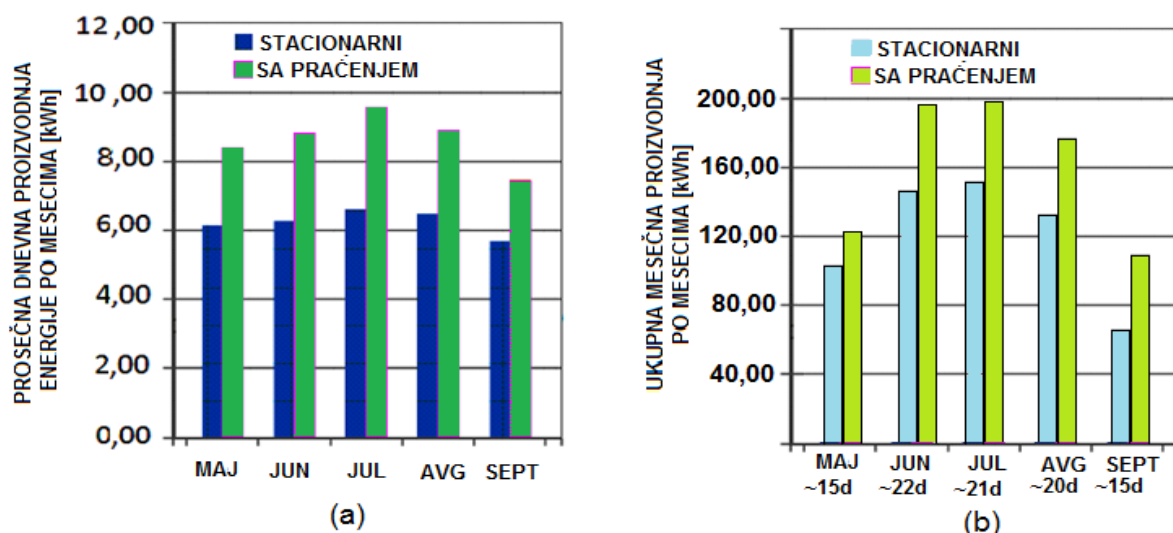
U automatskom režimu, algoritam se za planiranje kretanja rekurentno oslanja na očitavanja pozicije sa apsolutnih enkodera, jednog za vertikalno, drugog za horizontalno kretanje. Kretanje se zasniva na proračunu i kompenzaciji greške, odnosno razlike između zadate vrednosti pozicije i trenutne vrednosti očitane sa enkodera. Ujedno se proverava da li je kretanjem dostignut softverski limit, zadat na osnovu maksimalni graničnih vrednosti pozicija sistema. U konkretnom slučaju, granice do kojih se kreće implementirani kretni sistem su : od -90° (azimut ka istoku) do $+90^{\circ}$ (azimut ka zapadu) oko vertikalne ose i od 18° (minimalna elevacija) do 78° (maksimalni ugao elevacije) po horizontalnoj osi.

6 EKSPERIMENTALNI REZULTATI

U ovom poglavlju su dati neki karakteristični eksperimentalni rezultati dobijeni tokom testiranja MSG na poljoprivrednoj parceli neposredno u blizini reke Dunav u mestu Belegiš.

Na ovoj parceli je razvijen pametni sistem navodnjavanja baziran na energiji sunca i vetra u kome je ju jednom segmentu primenjen i MSG sa 4 fotonaponska panela od 375 W i baterijskom bankom 48 Vdc/720 Ah. Sistem takođe poseduje i invertorski deo za napajanje frekventnog regulatora snage 5,5 kW kojim se obezbeđuje navodnjavanje. Sistem za navodnjavanje poseduje i solarne panele na zemlji sa fiksnim nagibom. Detaljan opis ovog sistema se može naći u referencama [12],[14]. U sklopu ovog sistema je izvršeno testiranje dvoosnog elektromotornog pogona fotonaponskog sistema na MSG i izvedeni su odgovarajući zaključci o energetsom dobitku sistema za dvoosno praćenje Sunčeve putanje.

Izvršeno je poređenje proizvodnje fotonaponskog sistema MSG pri fiksnom uglu zakretanja fotonaponskih panela (ugao elevacije je fiksiran na 30° i ugao azimuta je fiksiran na -5°) i proizvodnje kada je primenjen sistem za dvoosno praćenje. Merenja su sprovedena za period navodnjavanja maj-septembar. Tokom 2022. godine su izvršena merenja na sistemu sa fiksnim nagibom fotonaponskih panela (nije bio implementiran sistem za dvoosno praćenje), a tokom 2023. godine za isti period i sa približno istim insolacijama i režimima navodnjavanja su vršena merenja sa dvoosnim sistemom. Rezultati merenja su dati na Slici 13.



Slika 13: Poređenje proizvedenih električnih energija stacionarnog sistema fotonaponskih panela MSG i sistema sa hronološkim praćenjem sunčeve putanje; (a) dijagram prosečne dnevne proizvodnje energije po mesecima u periodu maj-septembar 2022. godine , (b) ukupna mesečna proizvodnja po mesecima u periodu maj-septembar 2023. god.

Na Slici 13(a) je dato poređenje dijagrama prosečne dnevne proizvodnje sistema od 4 solarna panela ukupne snage 1,5 kW po mesecima (period maj-septembar). Uočava se da se najveća dobit ostvaruje u mesecima jun, jul i avgust kada je navodnjavanje najintenzivnije. Dobit u ovom periodu je oko između 35% i 40% (u mesecu julu 9,5 kWh/6,6 kWh $\approx$ 1,43; u mesecu junu 8,5 kWh/6,2 kWh $\approx$ 1,37; u mesecu avgustu 8,8 kWh/6,4 kWh $\approx$ 1,37). Na slici 13(b) je dato poređenje ukupnih mesečnih proizvodnji za oba posmatrana sistema. Pri ovome treba napomenuti da je broj dana tokom kojih je vršeno navodnjavanje (a tada su vršena i merenja) po mesecima iznosilo približno: 15 dana u maju i septembru, 22 dana u junu, 21 dan u julu i 20 dana u avgustu. Uočava se da je za sistem sa praćenjem, najveća proizvodnja mesecima jun i jul od oko 200 kWh/mesecu. Za fiksni sistem ova proizvodnja je oko 150 kWh. Tako da i u ovom slučaju upotrebom sistema za hronološko praćenje sunčeve putanje, dolazimo do dobitka od oko 33%. Takođe treba napomenuti da je realizovani sistem sa veoma niskom sopstvenom potrošnjom električne energije iz baterije, obzirom da se radi o intenzivno intermitentnim

elektromotornim pogonima, kako po azimutu, tako i po elevaciji (praktično se pogoni svaki snage od 50W aktiviraju u razmacima od 15 min, dok se trajanje pokretanja (tzv. „soft-start”), pogona i zaustavljanja ostvaruje u intervalu od oko 5s). Takođe dvoosni sistem praćenja ne zavisi od oblačnosti već sledi dnevnu putanju Sunca i u tom slučaju. U noćnom periodu sistem je isključen sa napajanja i ne troši uopšte nikakvu energiju.

7 ZAKLJUČAK

U radu je predstavljen realizovani sistem za dvoosno hronološko praćenje sunčeve putanje. Istaknute prednosti ovog tipa praćenja sa aspekta minimizacije potrošnje električne energije i povećanje prinosa sakupljene energije iz sunca. Sistem je primenjen na mobilnom solarnoj jedinici koju čine četiri solarna panela ukupna snage 1500 W. Primenjeni elektromotorni pogoni po azimutu i elevaciji su bazirani na DC motorima sa planetarnim reduktorom i odgovarajućim pužno/zupčastim prenosom ostvarenim u okviru obrtnog pogona (tzv. „*slewing drive*”). Ostvareni maksimalni momenti pri zakretanju nosača solarnih panela su oko 500 Nm, maksimalne brzine obrtanja od 0.046 ob/min. Eksperimentalna verifikacija fiksnog sistema solarnih panela i dvoosnog sistema za praćenje je izvršena na konkretnoj mobilnoj solarnoj jedinici koja se koristi u sistemu navodnjavanja na pametnoj parceli u mestu Belegiš. Na osnovu merenja je utvrđeno da se upotrebom sistema za praćenje ostvaruje dobitak u ukupnoj proizvedenoj energiji iz MSG u iznosu od oko 35 %. Najveći efekti se postižu u mesecima jul i avgust, kada je navodnjavanje i najintenzivnije, tako da je u ovom periodu moguće ostvariti dobitak u proizvodnji energije u iznosu i do 40 %.

8 ZAHVALNICA

Istraživanje u ovom radu je podržano finansiranjem od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija, za period 2024.-2025., Ugovor pod evidencionim brojem 51-03-136/2025-03/200034 od 04.02.2025.

9 LITERATURA

- [1] J.E.Braun, J.C. Mitchell , Solar Geometry for Fixed and Tracking Surfaces, Solar Energy, 31(5):439–444, 1983.
- [2] N.Barsoum, Fabrication of Dual-Axis Solar Tracking Controller Project, Intelligent Control and Automation, 2011, 2, 57-68.
- [3] E.F.Camacho E.F., M. Berenguel, F.R. Rubio, D.Martínez, Control of Solar Energy Systems, Springer, 2012.
- [4] H.Shang, W.Shen, Design and Implementation of a Dual-Axis Solar Tracking System, Energies 2023, 16(17), 6330; <https://doi.org/10.3390/en16176330>
- [5] E.K.Mpodi, Z.Tjiparuro, O.Matsebe, Review of dual axis solar tracking and development of its functional model, Procedia Manufacturing, Volume 35, 2019, Pages 580-588, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.05.082>.
- [6] Deger Energie. Deger Energie Solar Tracking, 2013. , <http://www.degerenergie.de/en/solar-tracking.html>
- [7] Solar Tracker, “Sun Path Diagram Image”, 2010., <http://www.gaisma.com/en/location/miri.html>

- [8] Ž.V.Despotović, M.D.Jovanović, A.Rodić, I.Stevanović, Praktične realizacije sistema za dvoosno praćenje sunčeve putanje, VII Sajam Energetske Efikasnosti i Obnovljivih Izvora energije 2019, Požarevac, Srbija, 25.10-26.10.2019.
- [9] MOTHER's super-simple solar tracker created by Dennis Burkholder improves on Steve Baer's solar tracker design using freon, November/December 1977, <http://www.motherearthnews.com/diy/solar-tracker-zmaz77ndzgoe>
- [10] M.D.Jovanović, Z.V.Despotović, Dj. Urukalo, The Chronological System of Solar Tracking Implemented on Mobile Solar Generator - IMP MSEG, V International Conference on Renewable Electrical Power Sources, Belgrade, 12-13th October 2017.
- [11] I.Stevanović, S.Popić, A.Rodić, Ž.Despotović, M.Jovanović, Pokretni robotizovani solarni generator, primer konstruktivnog rešenja mehaničke strukture, 57.Konferencija za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku-ETRAN, Zlatibor, 3-6. Jun 2013.
- [12] Ž.V.Despotović, I.R.Stevanović, J.Šumarac, Daljinski nadzor i kontrola hibridnog postrojenja za navodnjavanje useva na poljoprivrednoj parceli u mestu Belegiš, Energija Ekonomija Ekologija 25(1), pp. 59-66, DOI: 10.46793/EEE23-1.59D, Novembar 2023.
- [13] Željko.V. Despotović, Ilija.R Stevanović, Aleksandar Milenković, Sistem energetske pretvarača za hibridno napajanje sistema za navodnjavanje useva, 36 Simpozijum CIGRE 2023, Zlatibor, Srbija, 22-26.05.2023.
- [14] Ž.V.Despotovic, Hybrid "OFF-grid" Power Supply Systems and Their Applications in Agriculture: Practical Realisations, 10th International Conference on Renewable Electrical Power Sources-ICREPS 2022, 17-18 October, 2022, Belgrade, Serbia (Keynote lecture)
- [15] Z.V.Despotovic, M.Majstorovic, M.D.Jovanovic, I.Stefanovic, The Pressure Control in Irrigation "OFF-grid" Photovoltaic System Based on Mobile Solar Genarator, 5th International Conference of Renewable Electrical Power Sources-ICREPS 2017, 12-13 October, Belgrade, Serbia, 2017.
- [16] M.Majstorović, Ž.Despotović, L.Ristić, Application of Mobile Solar OFF-grid Generator in Irrigation System-a case study", Session:Renewable and Distributed Energy Sources,Paper T7.2-2,19th International Symposium Power Electronics - Ee2017,18-21. October 2017, N. Sad, Serbia.