

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

ZAVRŠNI RAD br. 2999

**Upravljanje fotonaponskim
sustavom za dvoosno praćenje
Sunca**

Dražen Nikolić

Zagreb, srpanj 2013.

Zahvaljujem se doc. dr. sc. Mariju Vašku te mag. ing. Marku Gulinu na pomoći i savjetima pri izradi rada, bratu prof. Davoru Nikoliću na podršci te lektorskim ispravkama, doc. dr. sc. Juraju Havelki na savjetima pri radu u LabVIEW okruženju i prijateljima kolegama dipl. ing. Filipu Melinščaku te dipl. ing. Danijeli Krekešić na pomoći pri radu u LaTeX okruženju

SADRŽAJ

Popis slika	v
Popis tablica	vi
1. Uvod	1
2. Solarna geometrija	3
3. Algoritam za slijeđenje Sunca	14
3.1. Formule	14
3.2. LabVIEW aplikacija	17
4. Način izvedbe fotonaponskog sustava	21
4.1. Razvod napajanja i baterije	21
4.2. CompactRIO	22
4.3. Trekeri	22
4.4. Solarni moduli	22
5. Zaključak	24
Literatura	25

POPIS SLIKA

1.1. Podsustavi fotonaponskog izvora	2
2.1. Sunčeva putanja na ljetni suncostaj, 21. lipnja 2013.	4
2.2. Sunčeva putanja na zimski suncostaj, 21. prosinca 2012.	4
2.3. Sunčeva putanja na proljetnu ravnodnevnicu, 20. ožujka 2013.	5
2.4. Sunčeva putanja na jesensku ravnodnevnicu, 22. rujana 2012.	5
2.5. Karakteristični položaji Zemaljske kugle tijekom revolucije oko Sunca	6
2.6. Godišnje putanje Sunca u Kartezijevim koordinatama	7
2.7. Horizontski nebeski koordinatni sustav	8
2.8. Mjesni ekvatorski nebeski koordinatni sustav	9
2.9. Godišnji hod deklinacije Sunca	9
2.10. Mapa UTC vremenskih zona tijekom ljetnog računanja vremena	10
2.11. Upadno Sunčevo zračenje na nagnutu plohu	12
2.12. Odnos pravog Sunčeva vremena i satnog kuta Sunca	13
3.1. Primjer tablice za računanje rednog broja dana u godini	14
3.2. Funkcija jednadžbe vremena kroz godinu	16
3.3. Blok-dijagram očitavanja sistemskog sata	19
3.4. Blok-dijagram računanja pravog Sunčeva vremena i Sunčeva sata	19
3.5. Centralni blok-dijagram	20
3.6. Sučelje algoritma za slijeđenje Sunca	20
4.1. Izgled mehaničke konstrukcije s instaliranim trekerom SF-20	23

POPIS TABLICA

3.1. Funkcija Format Date/Time String	18
---	----

1. Uvod

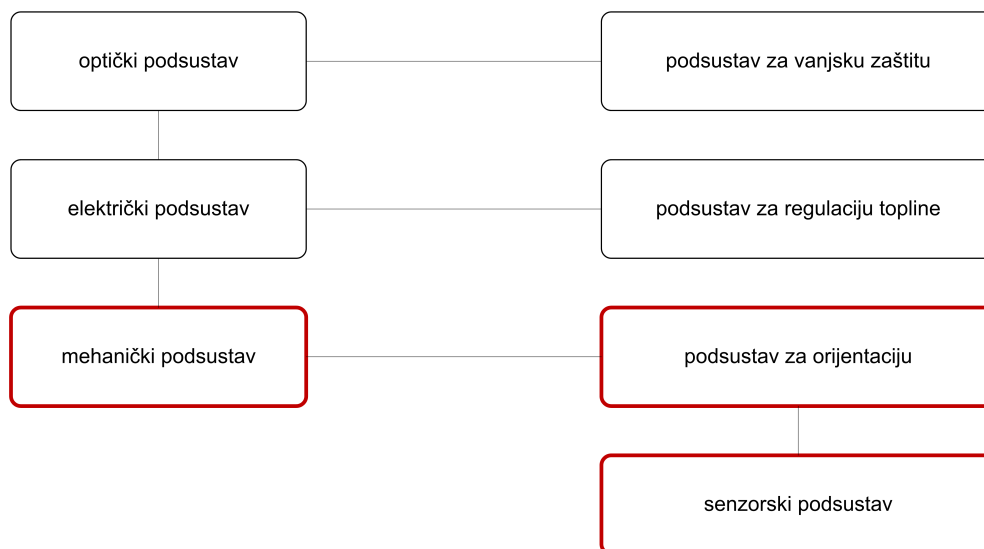
Upravljanje fotonaponskim sustavom sastoji se od regulacije pozicije fotonaponskih panela na način da se konstantno nastoji prikupljati maksimalna moguća Sunčeva energija. Pojednostavljeno, može se reći da je cilj sustava regulacije konstantno održavanje kolektorske plohe orijentirane prema Suncu i okomitom na upadno Sunčevo zračenje, što zahtijeva učestalu regulaciju pozicije u vremenu.

Iako je fotonaponski faktor efikasnosti pretvorbe energije značajno poboljšavan posljednjih godina, može se reći da je praktični maksimum efikasnosti pretvorbe energije danas ostvaren. Po uzoru na prirodne procese orijentiranja biljaka ka Sunčevim zrakama (npr. suncokret), moguće je analogan princip primjeniti u inovaciji i unaprjeđenju učinkovitosti kompletnog fotonaponskog sustava. Istraživanja su dokazala razliku i do 46% u korist sustava s inteligentnim praćenjem Sunca u odnosu na fiksirane sustave (Deger Energie, 2013).

Solarni sustav za praćenje ili treker (engl. *solar tracker*) jest uređaj koji omogućava orijentiranje kolektorskog mehanizma s obzirom na relativni položaj Sunca na nebu ovisno o točki promatranja sa Zemlje. Relativni položaj Sunca iznad fiksne točke promatranja ovisi o zemljopisnoj širini lokacije, danu u godini te vremenu u danu.

U horizontskom nebeskom koordinatnom sustavu, dvije kutne koordinate određuju položaj Sunca: azimutna udaljenost te zenitna udaljenost. Ishodišne osi ovih koordinata ujedno su i osi koje definiraju pojam *dvoosno praćenje Sunca*, odnosno, to su osi oko kojih je moguća rotacija fotonaponskog panela. Može se reći da nagnuta ploha prati Sunce po azimutnom i zenitnom kutu, za razliku od jednoosnog praćenja gdje je zastupljena rotacija panela oko samo jedne osi.

Općenito, za upravljanje solarnim sustavima veoma je bitno poznavati trenutnu vrijednost ozračenja (engl. *solar irradiance*). Stoga je potrebno imati instalirane odgovarajuće senzore (najčešće piranometre i pirheliometre). Upravljanje pretvorbom solarne energije u električnu uključuje kontrolu nad učinkom elektronikom zaduženom za DC/AC pretvorbu i praćenje maksimalne točke snage.



Slika 1.1: Podsustavi fotonaponskog izvora

Na razini mikromreže određuje se koliko se energije predaje u mrežu, a koliko sprema u akumulatore. Budući da je Sunčeva energija stohastičke prirode, integracija solarnih sustava u širu gradsku mrežu predstavlja zahtjevno pitanje (Camacho et al., 2012).

Na slici 1.1 naglašen je podsustav fotonaponskog izvora o kojem je riječ u ovome radu. Mehanički podsustav čini posebni mehanički sklop koji omogućuje automatsku optimalnu orijentaciju s obzirom na upadno Sunčevo zračenje. Zajedno s toplinskim pretvaračima i sensorima za daljinsko upravljanje i daljinska mjerenja on čini podsustav za orijentaciju (Kulišić et al., 1994).

Nadalje, u ovom je radu proučen i tehnički dokumentiran način izvedbe fotonaponskog sustava za dvoosno praćenje Sunca u Laboratoriju za sustave obnovljivih izvora energije Fakulteta elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu (u daljnjem tekstu LARES).

U drugom poglavlju, *Solarna geometrija*, objašnjeni su pojmovi i veličine od interesa te ostali nužni parametri za pozicioniranje sustava kroz cijelu godinu.

U trećem poglavlju, *Algoritam za slijeđenje Sunca*, dokumentirana je izrada aplikacije za izračun svih parametara obrađenih u prvom poglavlju. Korišteno programsko okruženje jest LabVIEW.

U četvrtom poglavlju, *Način izvedbe fotonaponskog sustava*, tehnički je opisana izvedba sustava i njegovih komponenti, s naglaskom na način komunikacije s frekvencijskim pretvaračem te na način rada frekvencijskog pretvarača kojim se osigurava slijeđenje.

2. Solarna geometrija

Pri razmatranju mogućnosti energetskog iskorištavanja Sunčeva zračenja, pogodno je promatrati prividno gibanje Sunca u odnosu na nepomičnu površinu Zemlje. Promatrač na Zemlji svakodnevno prati putanju Sunca koje izlazi na istoku i putuje nebom u ravnini nagnutoj za neki kut manji ili jednak 90° u odnosu na horizont te naposljetku zalazi na zapadu. Ako je taj kut jednak 90° , kaže se da je Sunce u *zenitu*, odnosno okomito iznad promatrača.¹

Ravnina kojom se Sunce kreće siječe horizontsku ravninu pravcem paralelnim sa spojnicom istok-zapad. Za lokaciju u sjevernoj polutki taj se pravac nalazi južno od spojnice istok-zapad za vrijeme zime, a sjeverno od iste za vrijeme ljeta, dok se na dane ravnodnevnice pravac podudara sa spojnicom istok-zapad.

Na slikama 2.1 i 2.2 vidi se razlika u duljini i položaju Sunčeve putanje u odnosu na horizont, respektivno za ljetni i zimski suncostaj. Odabrana je lokacija C zgrade FER-a, odnosno LARES-a, određena preko geografskih koordinata $45^\circ 48' 5,58''$ N, $15^\circ 58' 16,3''$ E (Google, 2013).

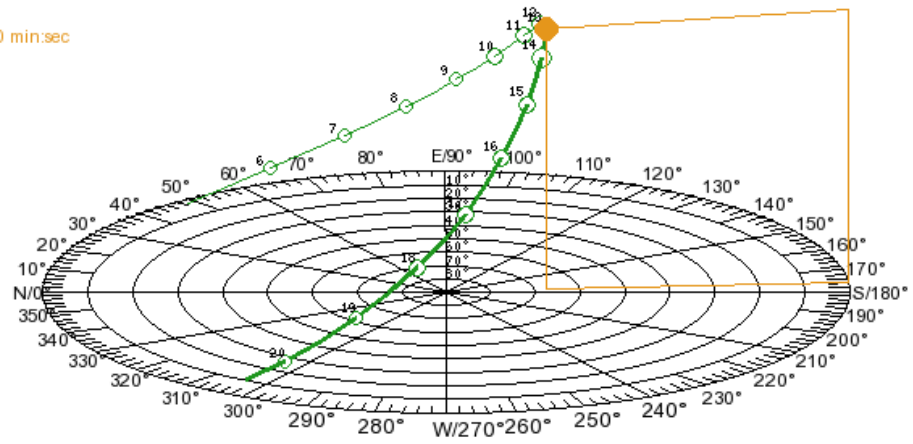
Na slikama 2.3 i 2.4 vidljiva je podudarnost spojnice istok-zapad sa sjecištem ravnine Sunčeve putanje i horizonta te, naravno, jednaka duljina dana za proljetnu i jesensku ravnodnevnicu.

Razlike u promatranoj Sunčevoj putanji kroz godinu proizlaze iz činjenice da je os oko koje se Zemlja rotira oko Sunca (polarna os) nagnuta za $23,45^\circ$ u odnosu na okomicu na ravninu ekliptike.

Na slici 2.5 prikazani su položaji zemaljske kugle u odnosu na Sunce za dane ravnodnevnice i suncostaja. Na ljetni suncostaj, na sjevernoj polutki na $+23,45^\circ$ zemljopisne širine (sjeverna obratnica), Sunce je točno okomito iznad promatrača. Analogno tomu, na zimski suncostaj sunce je okomito iznad promatrača na $-23,45^\circ$, odnosno na južnoj polutki (južna obratnica). Za sve ostale dane u godini vrijednost zemljopisne širine Sunca u zenitu između je navedene dvije vrijednosti. Ova se vrijednost naziva *deklinacija Sunca*, označava se sa δ i definira

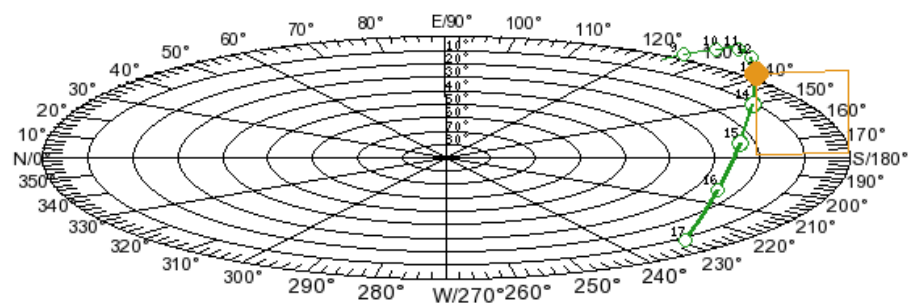
¹Zenit je zamišljena točka koja se nalazi točno okomito iznad promatrane lokacije.

Sun:
 Local Time: 12:59 6/21/2013:
 Azimuth = 176°
 Elev. = 67.49
 Equ. of Time = -1:50 min:sec
 Sunrise: 5:17:25
 Sunset: 20:53:58



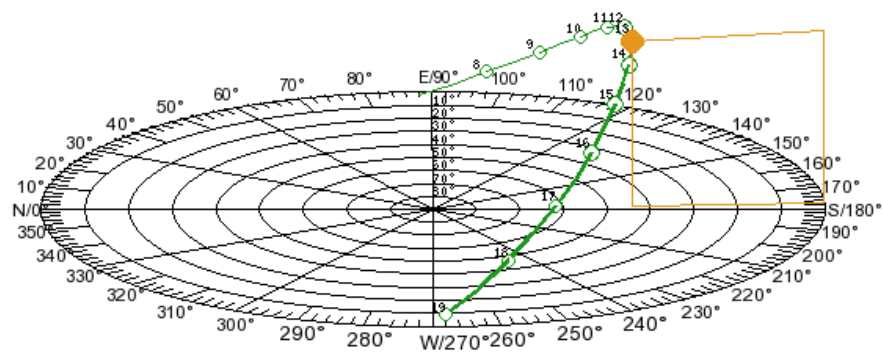
Slika 2.1: Sunčeva putanja na ljetni suncostaj, 21. lipnja 2013.

Sun:
 Local Time: 12:55 12/21/2012:
 Azimuth = 178.2°
 Elev. = 20.68
 Equ. of Time = 1:41 min:sec
 Sunrise: 8:45:39
 Sunset: 17:18:42



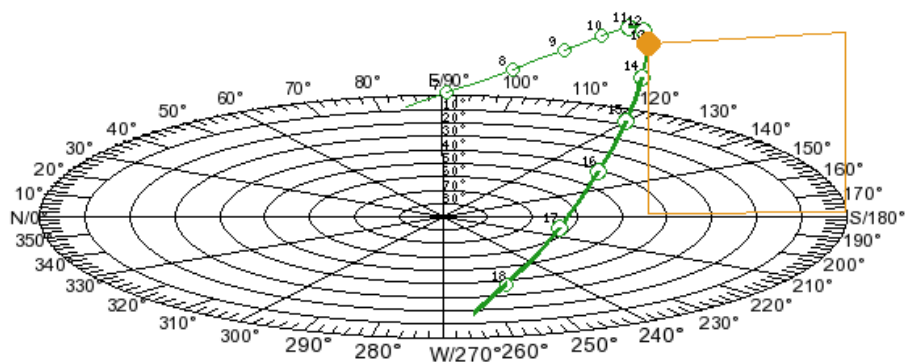
Slika 2.2: Sunčeva putanja na zimski suncostaj, 21. prosinca 2012.

Sun:
 Local Time: 13:04 3/20/2013:
 Azimuth = 177.5°
 Elev. = 44.11
 Equ. of Time = -7:23 min:sec
 Sunrise: 7:09:41
 Sunset: 19:13:39

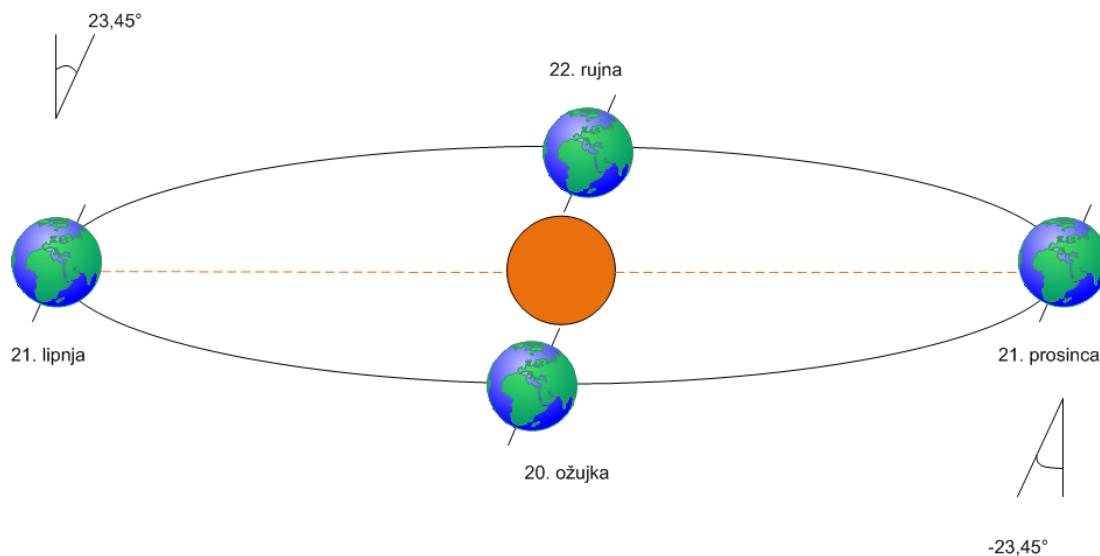


Slika 2.3: Sunčeva putanja na proljetnu ravnodnevnicu, 20. ožujka 2013.

Sun:
 Local Time: 12:50 9/22/2012:
 Azimuth = 177.8°
 Elev. = 44.12
 Equ. of Time = 7:25 min:sec
 Sunrise: 6:54:04
 Sunset: 18:57:57



Slika 2.4: Sunčeva putanja na jesensku ravnodnevnicu, 22. rujana 2012.



Slika 2.5: Karakteristični položaji Zemaljske kugle tijekom revolucije oko Sunca

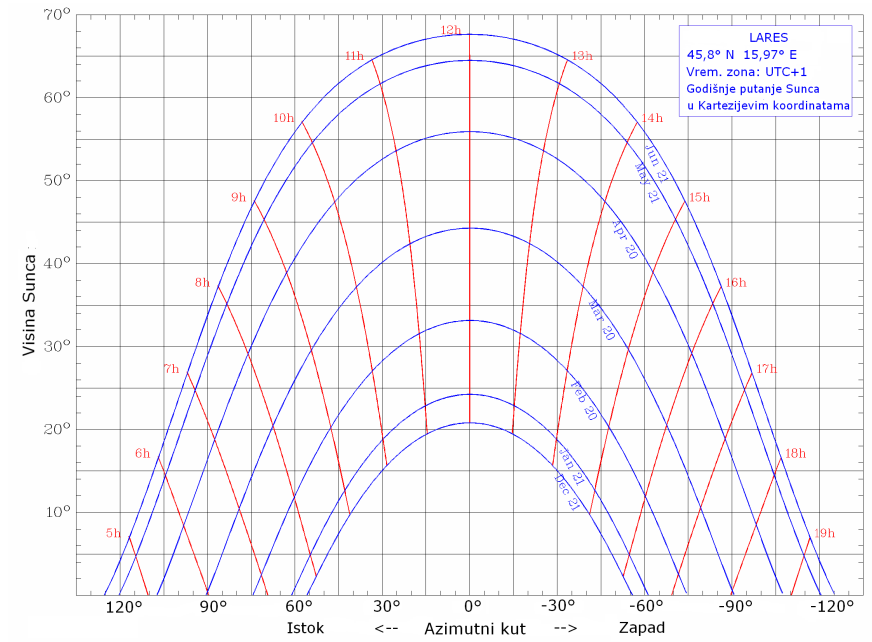
kao kut koji zatvara spojnica centar Zemlje-centar Sunca sa ekvatorijalnom ravninom Zemlje. Može se reći i da je to kutna mjera između Sunčevih zraka i ekvatora te da je jednaka zemljopisnoj površini na kojoj zrake Sunca u podne padaju točno okomito na promatrača. Na dan suncostaja, Sunce je okomito točno na lokacijama na sjevernoj i južnoj obratnici, dok je za vrijeme ravnodnevnica okomito iznad ekvatora. Na svim geografskim lokacijama na Zemlji koje su između ekvatora i obratnica Sunce je jednom godišnje u zenitu, dok se udaljavanjem od obratnica prema polovima kut između zenita i stvarnog položaja Sunca na nebu smanjuje za dane suncostaja.

Kut koji označava tu razliku zove se *zenitni kut* i označava se sa θ_z . Njemu komplementaran kut jest visina Sunca (engl. *solar altitude angle* ili *solar elevation angle*) i označava se sa α_a .

Drugi kut koji je nužan za određivanje položaja Sunca jest azimutni kut Sunca i označava se sa γ_s . Definira se kao kut između projekcije Sunčeve zrake na ravninu horizonta i smjera sjever-jug. Konvencija do koje se drži u ovom radu definira pravac sjevera kao nulti stupanj, a mjerenje se vrši u smjeru kazaljke na satu, gdje je pravac istoka na 90° , pravac juga na 180° te pravac zapada na 270° . To znači da položaji Sunca do podneva imaju negativan azimutni kut, a oni nakon podneva pozitivan azimutni kut (Olson, 2009).

Korisno je osvrnuti se natrag na slike 2.1-2.4 nakon prethodnog definiranja svih kutova koji su navedeni u njihovim legendama. Vidljiv je azimutni kut približan 180° za sve četiri pozicije jer one prikazuju podnevno Sunce, odnosno najvišu

točku prividne kretnje Sunca. Visina Sunca (engl. *Elevation*) najveća je u godini za Sunčevo podne² ljetnog suncostaja ($75,6^\circ$), jednaka za obje ravnodnevnice (cca. $44,11^\circ$) te naposljetku najmanja na zimski suncostaj ($20,66^\circ$). Također su vidljiva vremena izlaska i zalaska Sunca za navedene datume.



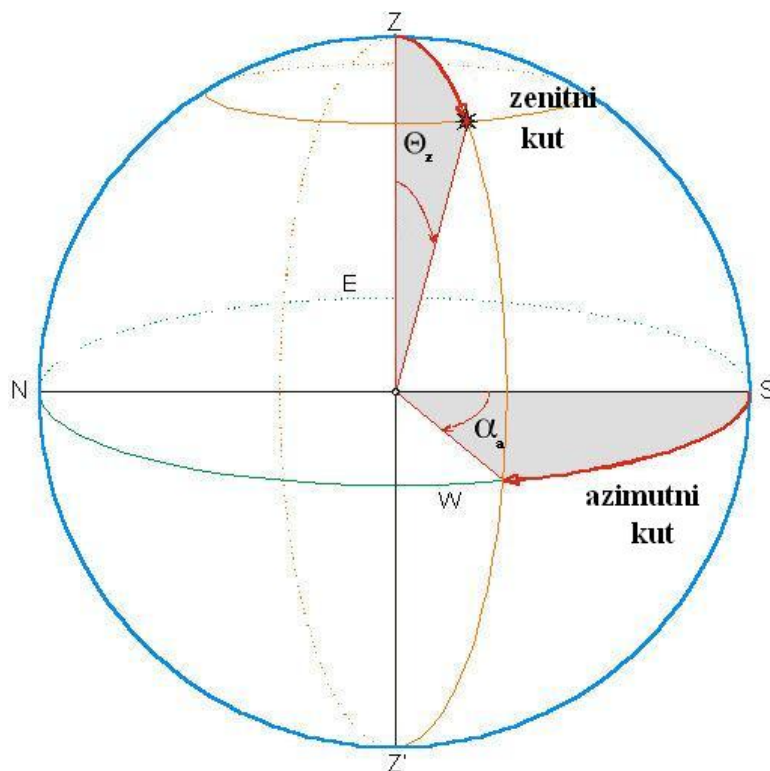
Slika 2.6: Godišnje putanje Sunca u Kartezijevim koordinatama

U uvodu već spomenut, horizontski nebeski koordinatni sustav prikazan je na slici 2.7. Primarna os tog sfernog sustava jest krug prividnog horizonta, odnosno ravnina na kojoj se nalazi promatrač. Sekundarna os je krug mjesnog nebeskog meridijana s točkom zenita Z. Sustav je u potpunosti definiran s dvjema koordinatama, zenitnim te azimutnim kutom.

Za položaj LARES-a na slici 2.6 prikazane su putanje Sunca u Kartezijevu koordinatnom sustavu kroz sedam mjeseci u godini. Ovaj prikaz jasan je zapis Sunčevih putanja varijablama horizontskog koordinatnog sustava, prilagođen za jednostavno i izravno očitavanje vrijednosti (University of Oregon, 2013).

Za razliku od drugih nebeskih koordinatnih sustava ovaj sustav fiksiran je u odnosu na Zemlju, a ne na zvijezde. Zbog toga se zenitni i azimutni kut Sunca mijenjaju u vremenu kako Zemlja radi revoluciju, što odgovara relativnom položaju Sunca na nebu koji pratimo kroz godinu. Ovaj se nebeski koordinatni sustav stoga može upotrebljavati za praćenje bilo kojeg nebeskog tijela na intuitivan i

²Trenutak kad je Sunce okomito nad zemljopisnom dužinom promatranja, odnosno nebeskim meridijanom.



Slika 2.7: Horizontski nebeski koordinatni sustav

jednostavan način.

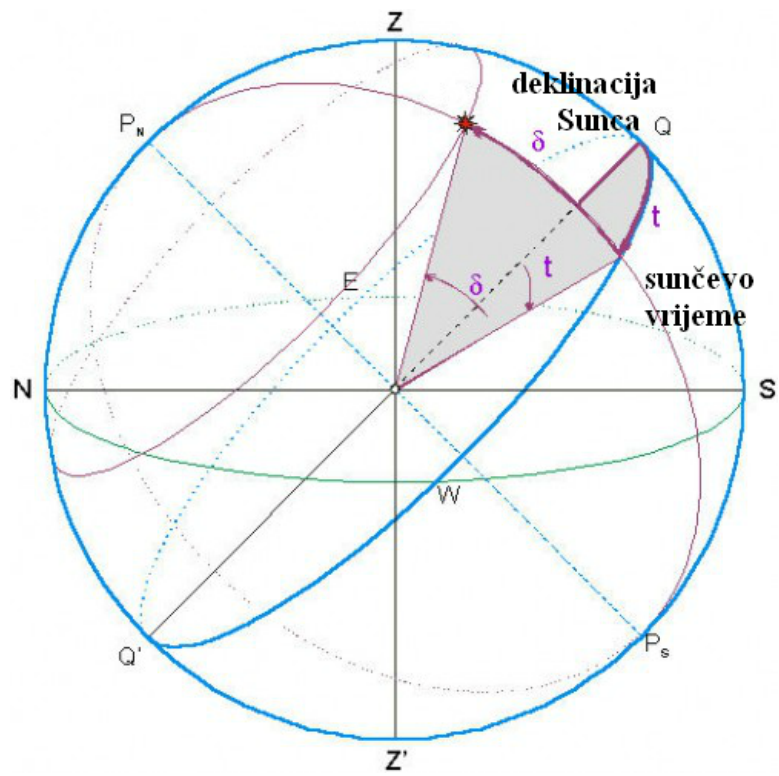
No zbog činjenice da je ovaj koordinatni sustav definiran proizvoljno odabranom ravninom lokalnog horizonta, u jednako vrijeme na različitim točkama promatranja, zenitni i azimutni kut imaju različite vrijednosti za isto nebesko tijelo.

Korisno je stoga uvesti mjesni ekvatorski koordinatni sustav (slika 2.8). Ovaj je nebeski sustav u najširoj uporabi zbog njegove sličnosti sa zemljopisnim koordinatama jer je primarna os definirana krugom nebeskog ekvatora³, a sekundarna os krugom mjesnog nebeskog meridijana, kao i kod horizontskog sustava. No ovaj je sustav za razliku od horizontskog fiksiran u odnosu na zvijezde i uz pomoć njegovih koordinata može se jednoznačno definirati trenutni položaj Sunca u odnosu na Zemlju.

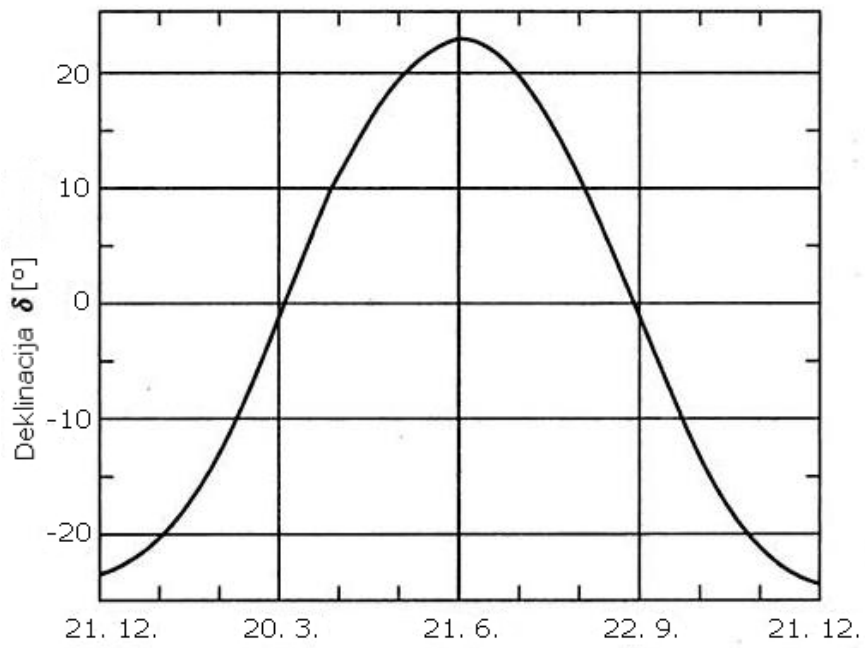
Sa slike 2.8 vide se dvije koordinate koje definiraju takav položaj i to su deklinacija Sunca δ te pravo Sunčevo vrijeme t .

Radi prikladne analogije s horizontskim sustavom, obično se u mjesni ekvatorski koordinatni sustav ucrtava ravnina u kojoj se nalazi promatrač, sa stranama svijeta i točkom zenita. Ova proizvoljno dodana ravnina ovisi o geografskoj širini

³Krug koji leži u ravnini okomitoj na rotacijsku os Zemlje.



Slika 2.8: Mjesni ekvatorski nebeski koordinatni sustav



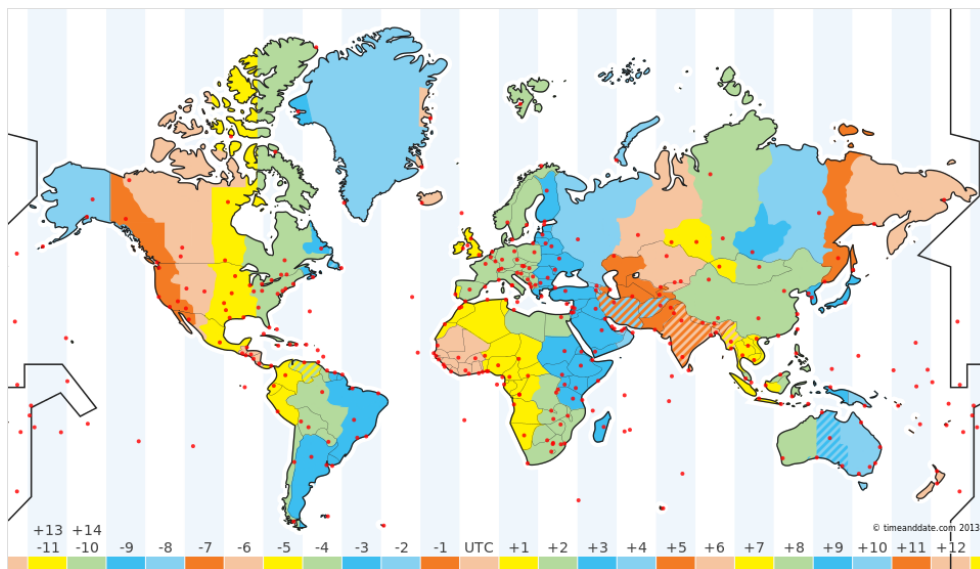
Slika 2.9: Godišnji hod deklinacije Sunca

promatranja. Na slici 2.8 geografska širina odgovara onoj na kojoj se nalazi grad Zagreb (oko $45,8^\circ$ N) i to se može zaključiti po tome što zenitni kut za promatranu točku iznosi oko $75,6^\circ$, kako je i definiran slikom 2.1.

Deklinacija Sunca i njezin raspon vrijednosti već je prethodno definiran, a u ovom se koordinatnom sustavu koristi radi definiranja trenutnog položaja Zemlje tijekom revolucije. Slika 2.9 prikazuje graf s vrijednostima deklinacije kroz godinu dana. Posebno su označeni suncostaji i ravnodnevnicе te njihove pripadne karakteristične vrijednosti deklinacije (Sukhatme i Kayak, 1996).

Sunčevo vrijeme t mjeri se od najviše točke nebeskog ekvatora (točka Q na slici 2.8), koja je zapravo točka Sunčeva podneva.

Bitno je napomenuti da se sva mjerenja i proračuni Sunčeva zračenja provode prema pravom Sunčevom vremenu t (engl. *apparent solar time*), koje je ustanovljeno na pojmu Sunčeva dana.⁴ Duljina Sunčeva dana varira kroz godinu ponajprije zbog činjenice da je Zemljina putanja eliptična, što uvjetuje brže gibanje kada je najbliže Suncu, a sporije kada je najdalje od Sunca. Drugi razlog jest nagnutost Zemljine osi rotacije u odnosu na ravninu ekliptike. U astronomskim terminima definirana je *jednadžba vremena*, vremenska funkcija koja opisuje navedene razlike.



Slika 2.10: Mapa UTC vremenskih zona tijekom ljetnog računanja vremena

Da bi se u svakodnevnom životu radi lakšega praćenja vremena izjednačile razlike u duljini Sunčevog dana, definiran je pojam srednjeg Sunčeva dana čija je

⁴Sunčev dan je interval između dvaju uzastopnih prolazaka Sunca kroz isti nebeski meridijan.

duljina konstantna kroz cijelu godinu i iznosi 24 sata. Na tom je principu definirano koordinirano svjetsko vrijeme (engl. *Coordinated Universal Time*, **UTC**), međunarodno prihvaćeni standard u računanju vremena. Po ovom standardu svijet je podijeljen na 24 vremenske zone, od kojih je svaka duljine 15° zemljopisne dužine unutar kojih je promatrano vrijeme jednako. UTC vrijeme jest ono koje se na osnovi srednjeg Sunčeva dana promatra u vremenskoj zoni nultog meridijana (0° , Greenwich), a vremena ostalih vremenskih zona računaju se kao ± 12 sati od UTC vremena. Dodatno, UTC vrijeme definirano je neovisno o ljetnom računanju vremena (engl. *DST*, *Daylight Saving Time*). Za primjer, Hrvatska je zbog geografskog položaja u UTC+1 zoni i za vrijeme ljetnog računanja vremena⁵ razlika na satu između UTC-a i promatranog vremena iznosi 2 sata, dok je u drugom dijelu godine razlika 1 sat. Na slici 2.10 prikazana je politička karta svijeta podijeljena na vremenske zone u različitim bojama ispod kojih je vidljiva ovisnost o UTC-u. Vidi se da je Hrvatska u zoni razlike +2 sata u odnosu na UTC jer mapa prikazuje ovisnosti za vrijeme ljetnog računanja vremena.

Za bilo kakvo modeliranje sustava vezano uz sistemske satove, sinkroniziranje funkcija te komunikacijske mreže na raspolaganju nam je najčešće samo UTC vrijeme. Stoga je potrebno uz određene modifikacije UTC vremena dobiti pravo Sunčevo vrijeme koje nam je od koristi za praćenje Sunca. Postupak računanja pravog Sunčeva vremena iz trenutnog srednjeg vremena bilo koje vremenske zone pojašnjen je u sljedećem poglavlju.

Nakon uvođenja mjesnog ekvatorskog koordinatnog sustava, definirane su veličine koje određuju trenutačni položaj Sunca neovisno o točki promatranja. Iz njih se mogu izračunati koordinate horizontskog koordinatnog sustava, odnosno zenitni i azimutni kut Sunca za bilo koju točku promatranja na Zemlji.

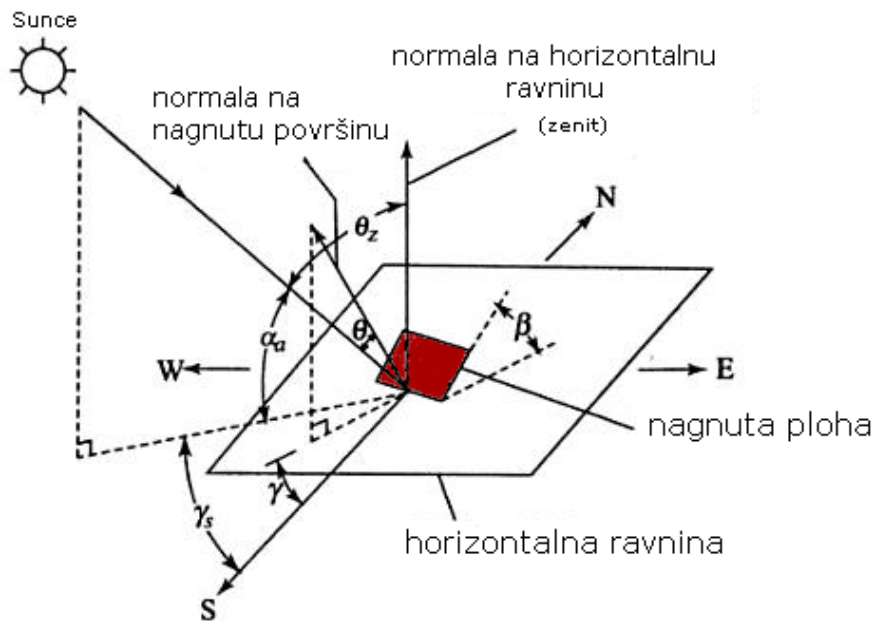
Poželjno je uvesti i veličinu koja se naziva satni kut Sunca ω . Ona označava razliku između pravog Sunčeva vremena i Sunčeva podneva za promatranu točku. Izražava se u stupnjevima (od -180° do 180°). Podnevna vrijednost od 0° pripada najvišoj dnevnoj poziciji Sunca na nebu, dok se pozitivnim vrijednostima kutova označavaju pozicije prije podneva, a negativnim one iza podneva, kako je vidljivo na slici 2.12. Budući da se satni kut izražava u stupnjevima, prikladan je za razne trigonometrijske proračune o kojima će kasnije biti riječ.

Kao što je već spomenuto, cilj sustava upravljanja jest održavanje upadnog kuta Sunčevih zraka na fotonaponski panel okomitim. Stoga je prikladno pri-

⁵U Europi je ljetno računanje vremena definirano pomakom za jedan sat unaprijed i određeno za razdoblje od posljednje nedjelje u ožujku do posljednje nedjelje u listopadu.

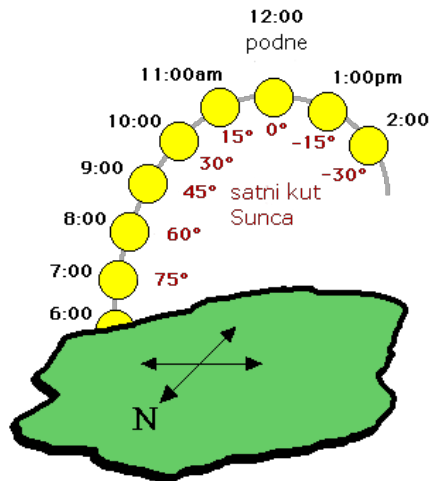
kazati općeniti slučaj upadnog zračenja na nagnutu plohu i definirati dodatne kutove od interesa.

Na slici 2.11 prikazan je slučaj proizvoljno nagnute i u prostoru orijentirane plohe s označenim karakterističnim kutovima. Općenito se sa θ označava kut između upadnih Sunčevih zraka i normale na nagnutu plohu. Također, sa γ se označava orijentacija plohe u prostoru po pravilima računanja azimutnog kuta. Cilj algoritma za slijeđenje Sunca je postići i održavati jednakost ovih dviju veličina sa zenitnim te azimutnim kutem Sunca respektivno. Za slučaj kad je zadovoljen uvjet na okomitost upada Sunčevog zračenja na fotonaponski panel, te veličine se označavaju s θ_z i γ_s . Za općenito nagnutu plohu koristi se i veličina nagnutost plohe β , koja se definira kao kut koji ravnine nagnute plohe zatvara s horizontalnom ravninom. Promatrajući trigonometrijske odnose, lako se može doći do zaključka da za zadovoljen uvjet okomitosti, kut β postaje jednak kutu θ_z , što znači da je panel potrebno nagnuti za zenitni kut Sunca (Sukhatme i Kayak, 1996).



Slika 2.11: Upadno Sunčevo zračenje na nagnutu plohu

Postoji mnogo literature na temu proračuna pozicije Sunca. Formule koje se mogu naći u takvim radovima su navedene uz napomenu da su prikladne za većinu inženjerskih primjena. Praćenje Sunca fotonaponskim panelima ne zahtjeva iznimnu preciznost. I kada su paneli nagnuti za 5° u odnosu na normalu prema Suncu, njihova izlazna snaga je unutar 0,4% maksimalne snaga koja bi



Slika 2.12: Odnos pravog Sunčeva vremena i satnog kuta Sunca

se generirala za direktno usmjeren panel (Michalsky, 1988). Instalirani trekeri u promatranom fotonaponskom sustavu imaju preciznost od $\pm 1^\circ$, zbog čega je preciznost svih korištenih formula od $\pm 0,06^\circ$ u ovom radu prihvatljiva.

3. Algoritam za slijeđenje Sunca

U ovom poglavlju su navedene sve korištene formule te je dokumentirana izrada algoritma za slijeđenje Sunca s pomoću programskog okruženja LabVIEW.

3.1. Formule

Izraz (3.1) prikazuje jednostavnu jednadžbu za određivanje deklinacije Sunca kroz čitavu godinu:

$$\delta [^\circ] = 23,45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + n) \right] \quad (3.1)$$

gdje je n redni broj dana u godini (npr. za 11. srpnja 2013., $n = 192$). Na slici 3.1 prikazan je primjer tablice za računanje rednog broja dana u godini.

DANI U M.	SIJ	VELJ	OZU	TRA	SVI	LIP	SRP	KOL	RUJ	LIS	STU	PRO	DANI U M.
1	1	32	60	91	121	152	182	213	244	274	305	335	1
2	2	33	61	92	122	153	183	214	245	275	306	336	2
3	3	34	62	93	123	154	184	215	246	276	307	337	3
4	4	35	63	94	124	155	185	216	247	277	308	338	4
5	5	36	64	95	125	156	186	217	248	278	309	339	5
6	6	37	65	96	126	157	187	218	249	279	310	340	6
7	7	38	66	97	127	158	188	219	250	280	311	341	7
8	8	39	67	98	128	159	189	220	251	281	312	342	8
9	9	40	68	99	129	160	190	221	252	282	313	343	9
10	10	41	69	100	130	161	191	222	253	283	314	344	10
11	11	42	70	101	131	162	192	223	254	284	315	345	11
12	12	43	71	102	132	163	193	224	255	285	316	346	12
13	13	44	72	103	133	164	194	225	256	286	317	347	13
14	14	45	73	104	134	165	195	226	257	287	318	348	14
15	15	46	74	105	135	166	196	227	258	288	319	349	15

Slika 3.1: Primjer tablice za računanje rednog broja dana u godini

Izrazi za zenitni kut (3.2) te azimutni kut (3.3) Sunca su sljedeći:

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \quad (3.2)$$

$$\cos \gamma_s = \frac{\sin \phi \cos \theta_z - \sin \delta}{\sin \theta_z \cos \phi} \quad (3.3)$$

gdje su ϕ zemljopisna širina izražena u stupnjevima (pozitivna za sjevernu polutku, negativna za južnu polutku) te ω satni kut Sunca.

Izraz za satni kut Sunca glasi:

$$\omega = (12 - t) \cdot 15 [^\circ] \quad (3.4)$$

gdje je t pravo Sunčevo vrijeme.

S pomoću sljedećeg izraza, moguće je izračunati pravo Sunčevo vrijeme za odabranu točku promatranja na Zemlji.

$$t = t_{lok} + (\lambda - \lambda_{lok}) \cdot 4 [min] + E [min] - c [h] \quad (3.5)$$

gdje su t_{lok} lokalno vrijeme, odnosno srednje Sunčevo vrijeme izraženo u UTC satima koje se promatra u vremenskoj zoni odabrane točke, λ zemljopisna dužina točke, λ_{lok} zemljopisna dužina lokalnog meridijana¹, E jednadžba vremena, ovisna o danu u godini, c korekcija za ljetno računanje vremena (0 ili 1).

Prva korekcija koju je potrebno napraviti na lokalnom vremenu jest razlika između vremena lokalne vremenske zone i lokalne zemljopisne dužine. Radi usklađivanja satova unutar jedne vremenske zone, na cijeloj površini koristi se srednje Sunčevo vrijeme promatrano duž lokalnog meridijana. Stoga se za svaki stupanj razlike zemljopisne dužine točke promatranja i lokalnog meridijana dodaju ili oduzimaju četiri minute, ovisno o tome je li se točka promatranja nalazi istočno ili zapadno od lokalnog meridijana, respektivno. S obzirom da Zemlja napravi punu rotaciju oko svoje osi za 24 sata, odnosno 15° po jednom satu ($24 \cdot 15 = 360$), iz toga proizlazi da razlika u jednom stupnju zemljopisne dužine predstavlja vremensku razliku od 4 minute (15° za 60 minuta, 1° za $60/15 = 4$ minute). Ako izraz za navedenu korekciju izdvojimo iz izraza (3.5) te zapišemo kao:

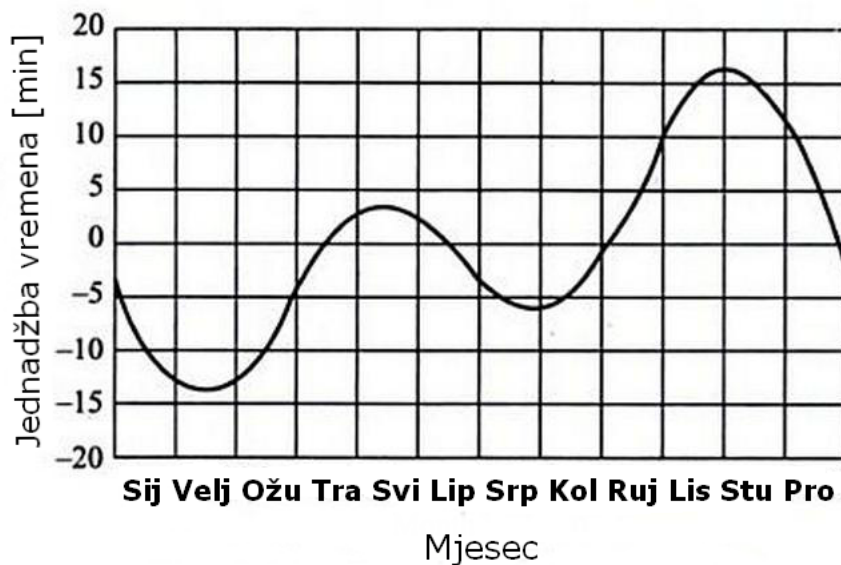
$$t_\lambda = (\lambda - \lambda_{lok}) \cdot 4 [min] \quad (3.6)$$

uz uvrštavanje zemljopisne dužine na kojoj se nalazi LARES, $\lambda = 15,971181^\circ$, + te lokalnog meridijana za UTC+1 vremensku zonu, $\lambda_{lok} = 15^\circ$, izraz (3.6) se može promatrati kao konstanta:

¹Lokalni je meridijan onaj koji prolazi sredinom vremenske zone koju određuje; za UTC+1 zonu on iznosi 15°

$$t_{\lambda} = +3,884724 \text{ [min]}$$

Iduća je korekcija već spomenuta u prvom poglavlju, vezana je uz efekte koji se javljaju zbog nepravilnosti Zemljine putanje oko Sunca te zbog nagnutosti osi rotacije na ravninu ekliptike. Astronomi su uveli funkciju E , jednadžbu vremena koja opisuje razliku između pravog i srednjeg Sunčevog vremena kroz čitavu godinu. Navedena je funkcija nužna za točan proračun algoritma za slijedeće Sunca. Primjerice, pravo Sunčevo vrijeme u Zagrebu kasni 10,6 minuta za lokalnim vremenom 15. veljače, a rani 20 minuta 31. listopada (Kulišić et al., 1994).



Slika 3.2: Funkcija jednadžbe vremena kroz godinu

Slika 3.2 prikazuje vrijednosti funkcije jednadžbe vremena kroz čitavu godinu, a njezin izraz glasi:

$$E = 229,18(0,000075 + 0,001868 \cos B - 0,032077 \sin B - 0,014615 \cos 2B - 0,04089 \sin 2B) \quad (3.7)$$

gdje je $B = (n - 1)360/365$, a n redni dan u godini (Sukhatme i Kayak, 1996).

Posljednja korekcija pri preračunavanju lokalnog u pravo Sunčevo vrijeme jest slučaj za ljetno računanje vremena. U radu i razvijenom algoritmu korištena je automatska korekcija na osnovi sljedećih izraza za karakteristične dane u godini:

$$n_{ljet,poc} = 59 + (31 - (((5 \times y) \div 4) + 4) \bmod 7), 01 : 00 \text{ UTC} \quad (3.8)$$

$$n_{ljet,kraj} = 273 + (31 - (((5 \times y) \div 4) + 1) \bmod 7), 01 : 00 \text{ UTC} \quad (3.9)$$

gdje je y godina, dok izraz $a \bmod b$ predstavlja ostatak pri cjelobrojnom dijeljenju i računa se na sljedeći način:

$$a \bmod b = [a] - b \times \left\lfloor \frac{a}{b} \right\rfloor$$

Dan početka ljetnog računanja vremena $n_{ljet,poc}$ uvijek je zadnja nedjelja u ožujku, stoga se dodaje zbroj dana u siječnju i veljači, koji iznosi 59, te se preko izraza u zagradama dobije točan redni dan ožujka od kojeg se primjenjuje DST. Analogno tomu, dan završetka ljetnog računanja vremena $n_{ljet,kraj}$ zadnja je nedjelja u listopadu te se dodaje zbroj dana u prvih devet mjeseci godine, koji iznosi 273.

U izrazu (3.5), c poprima vrijednost 0 za dane u godini nakon $n_{ljet,kraj}$ i prije $n_{ljet,poc}$, a vrijednost -1 za dane u godini nakon $n_{ljet,poc}$ i prije $n_{ljet,kraj}$, za oba slučaja od 01:00 UTC.

U LabVIEW aplikaciji primijenjena je prilagodba za ljetno računanje vremena za prijestupne godine, kada veljača ima jedan dan više, što zahtjeva modifikaciju izraza (3.8) i (3.9) za jedan dan unaprijed, 60 i 274, respektivno.

Navedeni algoritam računanja DST-a može se u LabVIEW-u lakše implementirati koristeći funkciju očitavanja sistemskog sata, gdje se automatski generira razlika u dva sata između UTC-a i računanja vremena u UTC+1 zoni uz DST.

Naposljetku, trekeri koji su instalirani u promatranom fotonaponskom sustavu zahtijevaju unos UTC vremena kao glavnu postavku na samom elektroničkom sučelju. Stoga se prethodno pojašnjeni algoritam može primjenjivati kao dodatna verifikacija realnog sustava.

3.2. LabVIEW aplikacija

Nakon definiranih formula i izraza potrebnih za praćenje Sunca slijedi dokumentiranje izrade aplikacije u LabVIEW okruženju.

Prvim dijelom koda uz uporabu funkcije *Get Date/Time In Seconds* očitana je sistemski sat u *time stamp* formatu.²

Iz *time stamp* formata korištenjem funkcije *Format Date/Time String Function* i ulazne string konstante dobiveni su ulazni podatci za formule u string formatu.

Tablica 3.1: Funkcija *Format Date/Time String*

String konstanta	Izlaz	Raspon
%H	Sat	00-23
%M	Minuta	00-59
%S	Sekunda	00-59
%j	Dan u godini	001-366
%z	Razlika mjesnog i UTC vremena	1 ili 2

Uporabom funkcije *Decimal String To Number* navedeni su podatci pretvoreni u cijeli broj.

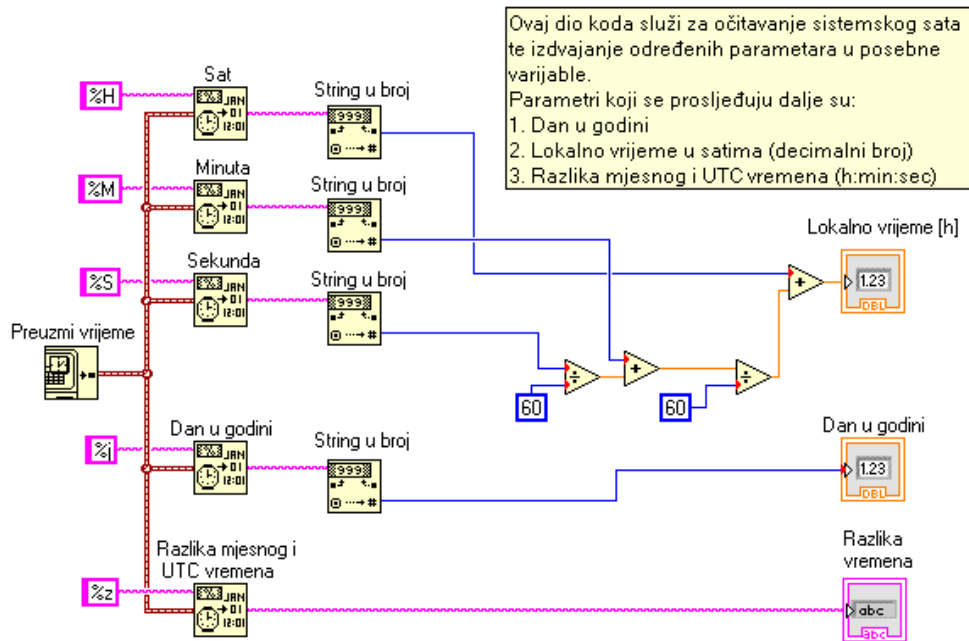
Podatci Minuta i Sekunda podijeljeni su sa 60, odnosno 3600 te pribrojenu podatku Sat da bi se dobila vrijednost lokalnog vremena izražena u decimalnom zapisu broja sati. Navedene funkcije mogu se vidjeti na slici 3.3 realizirane u sklopu jednog blok dijagrama.

U posebnom blok-dijagramu je realizirano računanje pravog Sunčeva vremena te Sunčeva sata, prema relacijama 3.5 i 3.4. Za korekciju pri ljetnom računanju vremena korištena je razlika mjesnog i UTC vremena i logička funkcija *Equal?* koja daje logičku jedinicu za interval u kojem se primjenjuje DST, a logičku nulu za ostali dio godine. S pomoću *Case* strukture, ostvaruje se korekcija s faktorom *c* iz relacije 3.5. Implementacija cijelog blok-dijagrama vidljiva je na slici 3.4.

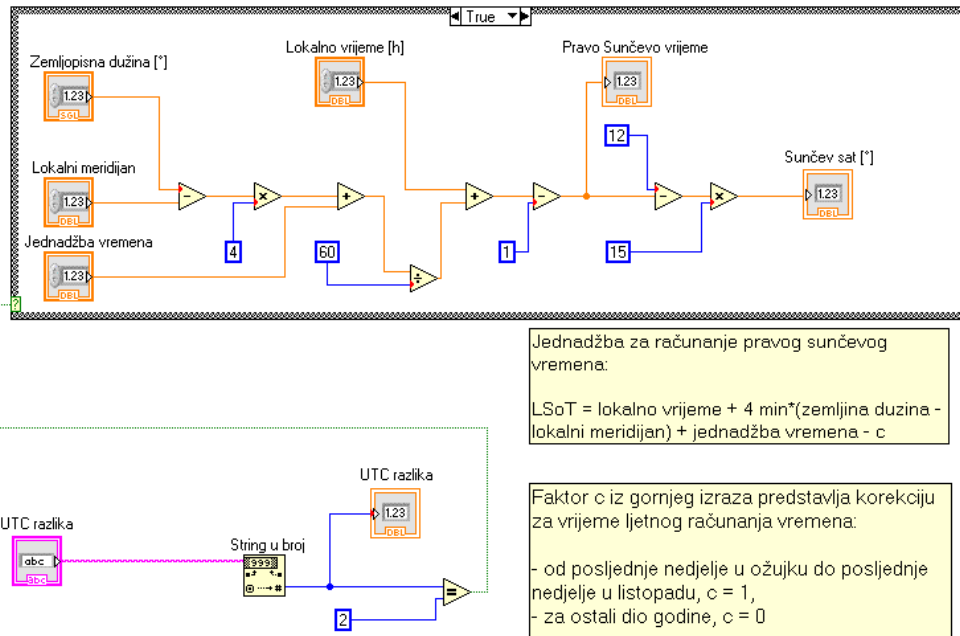
Na slici 3.5 prikazan je glavni blok-dijagram s vidljivim ikonama blok dijagrama niže razine, čiji sadržaji nisu prikazani jer koriste primjenu već spomenutih trigonometrijskih izraza koja je intuitivna. Njihovi izlazni podatci posebno su naznačeni.

Glavni *front panel* prikazan je na slici 3.6 i predstavlja sučelje algoritma za slijeđenje Sunca. Prikazani su izlazni podatci za nasumični dan u godini i vrijeme u danu.

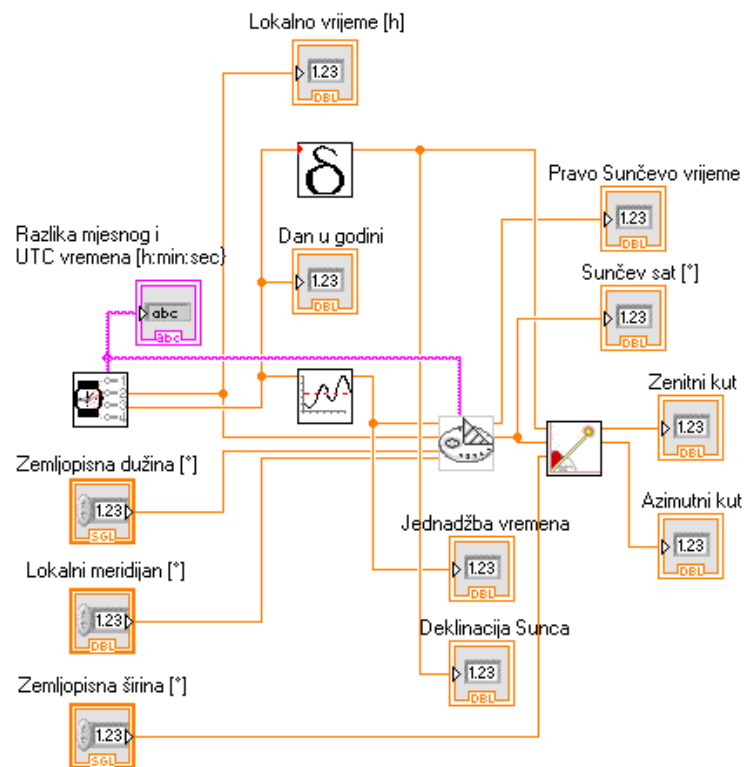
² *Time stamp* podatkovni je tip od 128 bita za pohranjivanje apsolutnog vremena.



Slika 3.3: Blok-dijagram očitavanja sistemskog sata



Slika 3.4: Blok-dijagram računanja pravog Sunčeva vremena i Sunčeva sata



Slika 3.5: Centralni blok-dijagram

Azimutni kut [°]	Zenitni kut [°]	Zemljopisna širina [°]
269,158	56,78	45,8016
Pravo Sunčevo vrijeme	Sunčev sat [°]	Zemljopisna dužina [°]
16,3308	-64,9621	15,9712
Lokalno vrijeme [h]	Deklinacija Sunca	C ZGRADA FER-a:
17,3525	22,5934	- Zemljopisna širina: 45.80155
Razlika mjesnog i UTC vremena [h:min:sec]	Jednadžba vremena	- Zemljopisna dužina: 15.971181
02:00:00	-5,18639	Lokalni meridijan [°]
	Dan u godini	15
	188	

Slika 3.6: Sučelje algoritma za slijeđenje Sunca

4. Način izvedbe fotonaponskog sustava

U ovom poglavlju opisane su mehaničke i električke karakteristike fotonaponskog sustava kakav je implementiran u sklopu LARES-a na Fakultetu elektrotehnike i računarstva u Zagrebu.

4.1. Razvod napajanja i baterije

Razvod napajanja izveden je tako da se za sustav praćenja Sunca snage 150 W te upravljanje trekerima u siguran položaj koristi baterija FIAMM 48 V, 150 Ah. Za upravljačke napone PLC-a te energetske napajanje CRIO-a koristi se baterija FIAMM 24 V, 400 Ah.

Za DC/AC pretvorbu energije iz solarnih modula, raspona od 300 do 650 VDC u $3 \times 230 / 400$ VAC, 50 Hz/ max 3600 W, koristi se solarni trofazni mrežom vezani pretvarač tipa SXCT 400-3.6 kojim se upravlja zadanom veličinom izlazne struje i faznog kuta. Komunikacija se vrši standardima RS 485 i MODBUS.

Za dvosmjerni prijenos energije između baterije za upravljanje trekerima i mrežnog napona koristi se DC/AC pretvarač tipa SXBT 48-3.0-D, ulaznog raspona napona 42 do 60 VDC, izlaznog napona $3 \times 230 / 400$ VAC, 50 Hz/ max 3000 W, kojim se upravlja zadanom veličinom DC struje u opsegu ± 60 A. Komunikacija se vrši standardima RS 485 i MODBUS.

Kao regulator punjenja baterije iz solarnih modula koristi se DC/DC pretvarač tipa SXR 48-40, ulaza 63-150 VDC, izlaza 40-58 VDC/ $I_n = 40$ A, upravljajući zadanom vrijednosti ulazne struje ili zadanom vrijednosti popunjenosti implusa, gdje je za oba slučaja strujni signal u rasponu 0-20 mA.

Za jednofaznu DC/AC pretvorbu energije iz baterije ulaznog raspona napona od 42 do 60 VDC, izlaza 230 VAC, 50 Hz/ 2000 W koristi se pretvarač tipa SXB 48-2.0 za on/off upravljanje logičkim signalom.

Za sinkronizaciju s mrežom te za logiku prijelaza mreža-inverter koristi se trofazni UPS (engl. *Uninterruptible Power Supply*), karakteristika 48 VDC/ 3×230/400 VAC 1 kVA.

4.2. CompactRIO

Za upravljanje i nadgledanje sustava koristi se CompactRIO (u daljnjem tekstu CRIO). CRIO sustav uključuje rekonfigurabilne I/O module, konfigurabilnu FPGA šasiju te ugradbeni kontroler. Također je programiran s LabVIEW grafičkim programskim alatima što ga čini primjenjivim u širokom rasponu automatizacijskih i nadgledajućih primjena.

FPGA se jedino može programirati u LabVIEW-u, dok se kontroler može programirati i u C, C++ ili Java programskom jeziku.

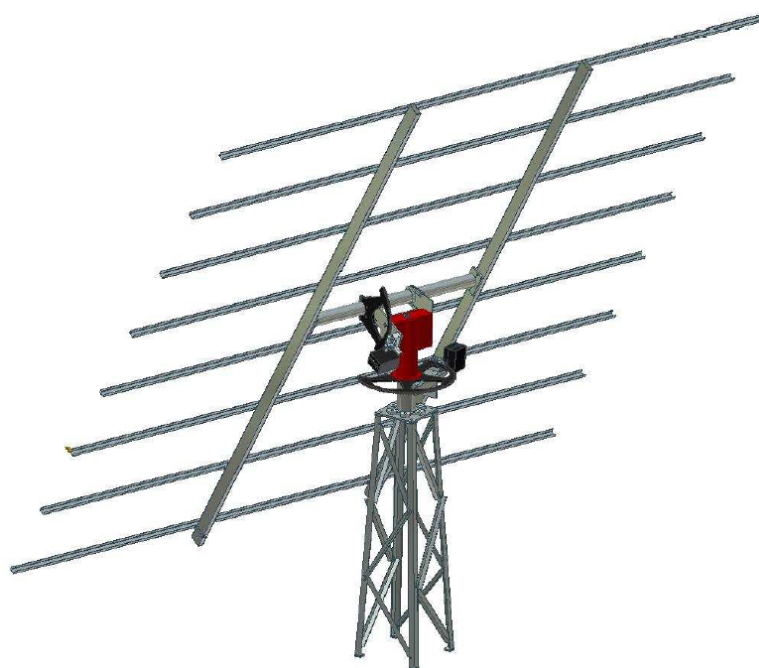
4.3. Trekeri

U fotonaponskom sustavu koriste se dva trekera tipa FEiNA SF-20 i SF-28, gdje znamenke u njihovu nazivu označavaju površinu mehaničke konstrukcije trekera u kvadratnim metrima. Dva navedena trekera imaju slične mehaničke i električke karakteristike te su oba predviđena za rad pri brzinama vjetra do 140 km/h. Ako brzina vjetra prijeđe predefiniranu graničnu vrijednost izračunatu anemometrom, treker pozicionira panele u vodoravni položaj kako bi smanjio vjerojatnost oštećenja na opremi.

Dva trekera SF-28 se nalaze na krajnjem istočnom i krajnjem zapadnom položaju sustava te su spojeni istom osovinom sa solarnim modulima što omogućava simultano pozicioniranje.

4.4. Solarni moduli

Solarni moduli su modela SV60-235, vršne snage 235 W, nazivne struje 7,85 A te nazivnog napona 29,9 V. Nominalna radna temperatura ćelije je $48,2 \pm 2$ °C. Dimenzije su $1663 \times 998 \times 35$ mm, masa 21,5 kg, vrsta polikristalični Si. Dozvoljeni radni uvjeti su od -40 do +85 °C a maksimalno opterećenje je do 5400 Pa (opterećenje snijegom).



Slika 4.1: Izgled mehaničke konstrukcije s instaliranim trekerom SF-20

5. Zaključak

Predmet rada je razvoj ideje te implementacije inteligentnog praćenja Sunca. Objašnjena je priroda Sunčeve putanje koja se kroz godinu promatra na nebu te je pojašnjen pristup računanju veličina koje omogućuju jednoznačno definiranje položaja Sunca u odnosu na fiksnu točku promatranja na Zemlji. Iz opsežne literature o području solarne geometrije, odabrane su trigonometrijske relacije zadovoljavajuće preciznosti s obzirom na preciznost izvršnih uređaja. Izražene preko vremenski ovisnih varijabli, prikazani su izrazi za azimutni kut te zenitni kut Sunca.

Dvoosno praćenje Sunca znači mogućnosti rotacije solarnih modula oko dvije osi, vertikalne i horizontalne. Rotacija modula oko vertikalne osi služi praćenju svakodnevne putanje Sunca od izlaska nad obzorom na istoku do zalaska na zapadu te se održava referencom po azimutnom kuta Sunca. Rotacija modula oko horizontalne osi podešava nagib plohe u odnosu na horizontalnu ravninu te se prilagođava praćenju visine Sunca na nebu što odgovara zenitnom kutu Sunca.

U LabView okruženju izrađen je algoritam slijeđenja Sunca koji za ulazne vremenski ovisne veličine upotrebom više blokovskih dijagrama daje dva izlaza, azimutni kut te zenitni kut, koji se prosljeđuju preko frekvencijskog pretvarača do trepera na samim modulima.

U ovom radu je prikazana realizacija intuitivno važne ideje praćenja Sunca od matematičkih i fizikalnih osnova, preko okružja za grafičko programiranje do same implementacije na realnom sustavu.

Bazirano na osnovama iznesenim u ovom radu, buduće područje istraživanja može biti korelacija teoretskog aspekta algoritma praćenja Sunce s njegovom realnom izvedbom te eventualne modifikacije u svrhu efikasnijeg praćenja Sunca.

LITERATURA

- J. E. Braun i J. C. Mitchell. Solar Geometry for Fixed and Tracking Surfaces. *Solar Energy*, 31(5):439–444, 1983.
- Eduardo F. Camacho, Manuel Berenguel, Francisco R. Rubio, i Diego Martínez. *Control of Solar Energy Systems*. 2012. ISBN 9780857299154.
- Deger Energie. Deger Energie Solar Tracking, 2013. URL <http://www.degerenergie.de/en/solar-tracking.html>.
- Google. Google Karte, 2013. URL <https://maps.google.com>.
- Mario Jurković. *Proračun Solarnog zračenja u funkciji vremena i nagiba*. Doktorska disertacija, Zagreb, 2009.
- Petar Kulišić, Jadranka Vuletin, i Ivan Zulim. *Sunčane ćelije*. 1994.
- Joseph J. Michalsky. The Astronomical Almanac’s algorithm for approximate solar position (1950–2050). *Solar Energy*, 40(3):227–235, Siječanj 1988. ISSN 0038092X.
- Garth Olson. Sun Path Graph. 2009. URL <http://www.horca.net/graphs/sunplot.php>.
- Mario Perić. *Računalna simulacija rada fotonaponskog sustava*. Doktorska disertacija, Zagreb, 2002.
- S. P. Sukhatme i J. K. Kayak. *Solar Energy: Principles of Thermal Collection and Storage*. 1996.
- University of Oregon. Solar Radiation Monitoring Laboratory, 2013. URL solardat.uoregon.edu.

Upravljanje fotonaponskim sustavom za dvoosno praćenje Sunca

Sažetak

U radu je proučen i tehnički opisan način izvedbe fotonaponskog sustava za dvoosno praćenje Sunca u Laboratoriju za sustave obnovljivih izvora energije Fakulteta elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu. Opisana je trigonometrijska pozadina računanja kutova od važnosti za određivanje položaja Sunca. Ključne korištene veličine su azimutni kut, zenitni kut, deklinacija Sunca, satni kut Sunca, pravo Sunčevo vrijeme te jednadžba vremena. Korišteni koordinatni sustavi su horizontski nebeski sustav te mjesni ekvatorski koordinatni sustav. Implementiran je algoritam za slijeđenje Sunca u skladu s geografskim i vremenskim koordinatama u programskom okruženju LabVIEW. Glavni elementi fotonaponskog sustava su frekvencijski pretvarač, servo motori, trekeri te solarni moduli.

Ključne riječi: azimut, zenit, deklinacija Sunca, pravo Sunčevo vrijeme, jednadžba vremena, satni kut, LabVIEW

Control of a Two-axes Solar Tracking System

Abstract

The subject of the thesis was the documenting of the working principles of the photovoltaic system with intelligent two-axes Sun tracking that is a part of the Laboratory of Renewable Energy Sources at the Faculty of Electrical Engineering in Zagreb. The nature of the Sun's movement and the trigonometrical fundamentals of solar tracking were observed. Two celestial coordinate systems of interest were the Horizontal Coordinate System and the Equatorial Coordinate System. A valid algorithm for Sun tracking was implemented through LabView. The main parts of the solar tracking system are the drive module for AC motor control, AC brushless motors, string inverters for DC/AC conversion, dual axis trackers and solar modules.

Keywords: photovoltaic, azimuth, zenith, declination, solar time, equation of time, hour angle, LabVIEW