

MERILNIK DIFUZNEGA SEVANJA SONCA

Ž. Gorup, N. Basarič

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, Slovenia

Ključne besede: difuzno sevanje sonca, merjenje sončnega sevanja, sistemi za sledenje sonca, sistemi za zajemanje podatkov, senzorji svetlobe.

Izveček: V pričujočem delu je opisana naprava za merjenje difuznega sevanja sonca, ki ima nekatere pomembne dopolnitve obstoječih merilnikov. Zgrajena je iz standardnih mehanskih, elektronskih in programskih komponent, kar bistveno znižuje ceno naprave, obenem pa povečuje njeno fleksibilnost in uporabnost. Merilna naprava obsega lokalno enoto in nadzorni računalnik. Lokalna enota ima mehansko konstrukcijo za sledenje sonca, piranometer in kontrolni modul za lokalni nadzor delovanja, ter omogoča upravljanje pretoka podatkov in komuniciranje z nadzornim računalnikom. Difuzno sevanje sonca meri piranometer, katerega senzor se stalno nahaja v dinamični senci senčne kroglice. V senčni kroglici je tudi senzor direktnega vpada sončnih žarkov. Ta senzor ima dve funkciji: preverjanje vpada direktnih žarkov in meritev trajanja oblačnosti. Za izboljšanje točnosti meritve je bilo dodano začetno pozicioniranje merilne naprave z elektronskim kompasom. Nadzor delovanja lokalne enote izvaja mikropretvornik, ki deluje obenem kot sistem za zajemanje podatkov. Poleg analogno-digitalne (A/D) pretvorbe senzorskih signalov predprocesira podatke in jih nato posreduje nadzornemu računalniku. Virtualni instrument (VI) na nadzornem računalniku omogoča procesiranje, prikaz, shranjevanje in prenos podatkov. Na modularno organiziranem VI izberemo parametre prikaza meritev: vzorčevalni čas, začetni čas, končni čas, filterske funkcije (nizko ali pasovno sito). Poleg formatov in urejanja podatkov lahko v VI izbiramo matematične transformacije in statistične izračune: kumulativno sevanje v določenem časovnem obdobju (integral), minimum in maksimum sevanja za podano časovno obdobje, histogram sevanja in statistične parametre. VI ponuja izbiro dveh oblik grafičnih prikazov: tračni časovni diagram in graf. Za prenos podatkov med lokalno enoto in nadzornim računalnikom služi standardna serijska komunikacija (RS-232) po žičnem ali brezžičnem mediju.

Diffuse solar radiation measuring instrument

Key words: diffuse solar radiation, solar radiation measurements, solar tracking systems, data acquisition systems, solar sensors.

Abstract: Measurements of diffuse solar radiation are normally done by pyranometer with a shadowing element to cover the direct solar beam. The present paper describes an apparatus with some important improvements to existing ones: a shadowing ball (sphere) with a direct beam detector, automatic positioning with electronic compass, local data acquisition system with microconverter, and virtual instrumentation. The measuring system is composed of a local unit and a supervisory computer. The local unit contains a mechanical construction of a solar tracking system, a measuring pyranometer and a control unit with a microconverter. It performs control, data management and data communication with a supervisory system. The modification from the conventional shadowing pyranometer comprises three steps: firstly, the shadowing ball combined with direct solar beam sensor is designed. The usual shadow-band elevation mode pyranometer is replaced with an azimuth-elevation tracking mode instrument. A microconverter acts as standard microcontroller and a data acquisition system simultaneously. Secondly, an automatic positioning system to align the system to the direction north-south is used. This facilitates and accelerates the mounting procedure and also increases the measuring precision. Thirdly, a virtual instrument (VI) is built in the main control computer system. It acts as a control software for data acquisition, data processing, presentation and storage. The VI is time efficient, easy to manage and adapted to work at different outdoor locations.

In our design of shadowing the direct light, the shadowing ball is mounted on the top of a thin arc. Unlike a shadow disc, the shadow ball alignment on the arc is not complicated and time consuming. Direct beam detector is an autonomous unit supervising the right position of the ball and to survey the time of cloudiness. It is functioning on the differential principle of two pairs of the light sensors, with output signals which are conditioned and converted into digital form. Local microconverter is capable of making a corresponding response to sensor's imbalance. A proper positioning of the measuring system is achieved with an electronic compass. It is perfectly suited to outdoor area applications and can be used for quick changes of measuring locations. If properly mounted, the electronic compass and solar tracker system can operate continuously in a loop. The orientation of the system versus north is examined prior the start on the initial position.

The purpose of tracking is to retain the solar shadow on the sensor's surface of the pyranometer. Solar tracking is achieved by two perpendicularly mounted stepping motors. The azimuth and elevation tracking follow the calculation of the solar position over the solar day. Steps are provided by sending single digit signals for each step into I/O digital bus. Steps are timed through software of the real time clock (RTC).

A supervisory computer contains a LabVIEW programming environment where virtual instrument (VI) is running. A VI for diffuse solar radiation measuring encloses some important functions: data acquisition, data processing, data visualization, and data storage. There are some main advantages of using virtual instrumentation. When comparing to the use of text oriented languages it ensures shorter time to build up program application, it provides user-friendly graphical interface, easy changes of program functions, very extensive signal analysis functions, and standard data communications channels.

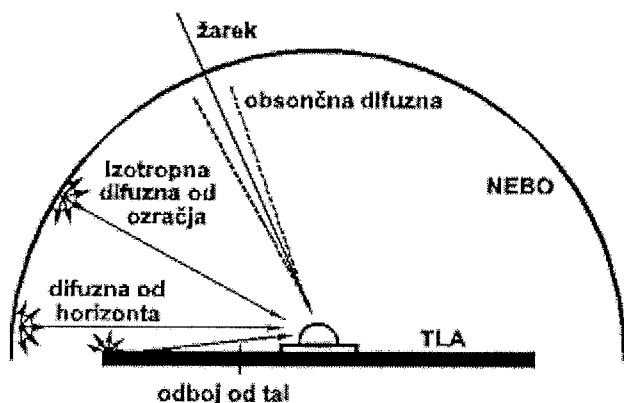
1 Uvod

Ko svetloba potuje skozi atmosfero, se del sevanja absorbira, del sipa in del odbija. Celotno sevanje, ki ne zajema direktnih sončnih žarkov je difuzno sevanje sonca. Vsota direktnega in difuznega sevanja je globalno sevanje. Shematsko so različne komponente sončnega sevanja prikazane na sliki 1.

Komponento difuznega sevanja (D) lahko tudi izračunamo, če poznamo ostali dve komponenti: direktno (B) in globalno (G) sevanje ter kot (i), ki ga oklepa trenutna lega sonca z vertikalno na ravnino senzorja. Enačba, ki po kosinusnem zakonu povezuje vse tri veličine, je

$$G = B \cdot \cos(i) + D \quad (1)$$

Različni atmosferski pogoji lahko zmanjšajo direktno sevanje za 10%, če je dan jasen in suh pa vse do 100%, če je



Slika 1: Komponenti sončnega sevanja: direktno in difuzno sevanje.

вреme vlažno in oblačno.

Podatki o meritvah difuznega sevanja sonca so pomembni za različna področja. Difuzno sevanje je bistven element pri načrtovanju ploščatih kolektorjev /1/. Podatke potrebujejo tudi arhitekti, ker je to vir dnevne svetlobe na mestih, ki nimajo direktno vidnega sonca (bloki, spodnja nadstropja stolpnice, stopnišča, kleti, itd.). Velikost difuzne komponente sončnega sevanja zanima agronome in botanike, ker jim podaja bistven vir energije biosfere. Difuzna svetloba vpliva tudi na nekatere človeške sposobnosti: vidljivost, razpoznavnost barv in vozne sposobnosti človeka v prometu, itd. Področja, kjer uporabljajo podatke o difuznem sevanju sonca, so: agronomija (fotosinteza), arhitektura (naravna svetloba bivalnih prostorov), astronomija (spreminjanje izhodnega sevanja sonca), biologija, fotobiologija (svetloba in življenje), fotovoltaika za direktno pretvorbo sončne energije v električno, hidrologija (izhlapevanje in izparevanje vode), klimatologija (klimatske spremembe na osnovi energijskega ravnotežja), meteorologija (numerično predvidevanje in napovedovanje vremena), oceanografija, pasivna solarna energija za osvetlitev in segrevanje bivalnih prostorov, promet in transport (naravna osvetljenost, upravljanje vozil in plovil), solarna termična energija (proizvodnja pare za pogon turbin v termoelektrarnah), solarne tehnologije goriv za pretvarjanje biomase (rastline, pridelki in les) v goriva in vzporedne produkte, solarno gretje za segrevanje vode (industrija in gospodinjstva), solarno razkuževanje in uničevanje nevarnih odpadkov s koncentrirano sončno svetlobo, tehnične vede o materialih (degradacija materialov), zdravje in medicina (vpliv sevanja na kožo).

Teoretično vrednost difuznega sevanja sonca lahko izračunamo na osnovi indeksa čistosti (clearness index) s pomočjo empiričnih enačb, ki so jih zapisali Liu in Jordan /2/ ter Klein /3/. Za izračun difuznega sevanja sonca je bil zgrajen model, iz katerega je nastal računalniški program AML /4/. Osnova za delovanje programa je model, opisan v delu Kumarja /5/. Program je kompakten in hiter. Omogoča pa izračun sevanja za najmanj en cel dan in ne dopušča urne ali manjše delitve.

Difuzno sevanje sonca merimo z zasenčenimi piranometri (shaded pyranometer), ki so opisani v delih številnih avtorjev /5/ - /9/. Te naprave se razlikujejo med seboj po obliki in namestitvi senčnika (zaslonke), ki preprečuje direktnim sončnim žarkom dostop do senzorja piranometra. Glavne izvedbe elementov za senčenje so: senčni obroč, senčni pas, disk, polkrogla in krogla. Senčni pas je lahko večji del obroča ali pa samo trakasti lok krožne oblike /10/. Največkrat se difuzno sončno sevanje meri s piranometri s senčnim obročem ali senčnim pasom (shadow-ring, shadow-band pyranometer). Piranometri s senčnim obročem ali pasom predstavljajo ceneno in enostavno rešitev, kjer je le ena mehanska nastavitev. Nastavitev senčnega elementa je dnevna ali nekajdnevna. Po točni geografski orientaciji instrumenta (smer sever-jug) je potrebna nastavitev obroča v položaj, pri katerem pade senca obroča na senzor piranometra v treh točkah: ob sončnem vzhodu, opoldan in ob sončnem zahodu. Prava lega je dosežena s spreminjanjem nagiba obroča glede na horizontalno ravnino (elevacija). Pri tem načinu merjenja je potrebna korekcija, ker neaktivni del obroča pokrije del površine prostora, ki bi sicer prispeval difuzno svetlobo in povečal izmerjeno vrednost.

Piranometer s senčnim diskom je rešitev, ki v pretežni meri izloča sistematsko napako senčnega obroča. Seveda je ta izvedba tehnično bolj zahtevna in tudi precej dražja /11/. Zahteva namreč elektromehanski sistem za sledenje sonca (enoosni ali pa dvoosni) in ustrezno programsko opremo.

Na tržišču je le majhno število proizvajalcev standardnih merilnikov difuznega sevanja sonca. Naprave so izdelane v zelo majhnih serijah, zato je cena posameznega merilnika visoka. Prvenstveno so merilniki namenjeni za stacionarno uporabo v meteorologiji, kar zahteva mehanske, elektronske in programske prilagoditve pri raziskovalnem delu. Algoritmi delovanja standardnih merilnikov so nespremenljivi in uporabnik nima možnosti poseganja v elektronski in programski sistem delovanja. S tega vidika je izdelava cenejše in vsestransko uporabne izvedbe merilne naprave smiselna, posebno, ker omogoča uporabniku fleksibilno uporabo in upošteva zahteve in posebnosti raziskovalnega dela. Najpomembnejše zahteve, ki se pojavljajo pri raziskavah v zvezi s sončno energijo so: primerno kratek čas začetne nastavitve naprave zaradi pogostega spreminjanja geografskega položaja merilne točke, sočasno preverjanje oblačnosti na senzorju piranometra in senzorju direktnega vpada sončnih žarkov, brezžičen prenos podatkov iz lokalne enote na nadzorni računalnik ter spreminljiv nadzorni program v obliki virtualnega instrumenta. Naštete funkcije morajo biti izvedene s standardno elektronsko in mehansko opremo, ki je dosegljiva na tržišču in z majhnimi mehanskimi prilagoditvami. Nadzorni program v obliki virtualnega instrumenta mora omogočati obdelavo sprejetih podatkov in spreminjanje nastavitve obdelave, konfiguriranje komunikacije, izdelavo dokumentacije in različne grafične prikaze.

2 Piranometer s senčno kroglo

Piranometer je namenjen merjenju globalnega in difuznega sevanja. Za merjenje difuznega sevanja mora biti senzor piranometra v senci. Piranometer s senčno kroglo (shadow ball, sphere) je nadgradnja naprav s senčnim diskom ali senčnim obročem. Ogledali si bomo zgrajeni prototip in delovanje svetlobnega senzorja s celotno konstrukcijo, ki omogoča kontinuirano senčenje senzorske površine v dvoosnem koordinatnem sistemu. V konstrukciji je poleg senčne krogle tudi nadzorni senzorski element, ki preverja direktni vpad sončnega sevanja. Isti element daje tudi podatek o zakritju sonca z oblakom. Za pravilno in usklajeno delovanje sledilnika sonca je potrebno točno začetno pozicioniranje v smeri sever-jug, kar je pri standardnih merilnikih potrebno izvesti ročno. To je dolgotrajen in natančen postopek, ki je bil pri izdelani napravi občutno skrajšan z uporabo elektronskega kompasa.

2.1 Zgradba naprave

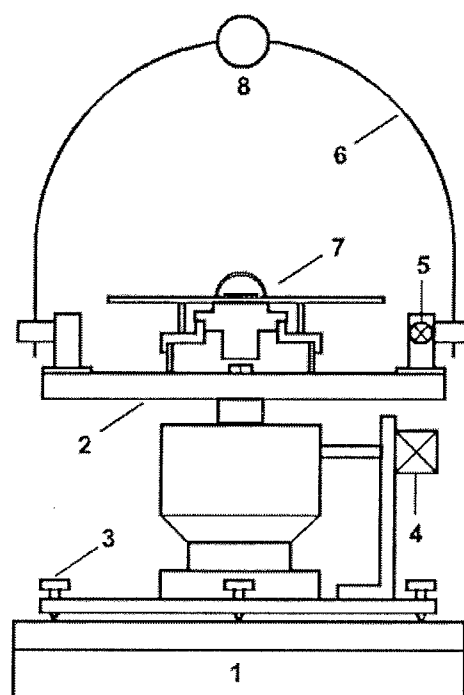
Mehanska konstrukcija lokalne enote merilnika difuznega sevanja je prikazana na sliki 2. Konstrukcijo naprave sestavljata dve enoti: fiksna in gibljiva. Fiksna enota ima stabilno ohišje s podstavkom, v katerem je pritrjen glavni motor (koračni) za gibanje v horizontalni ravnini (po azimutu). V ohišju je tudi večina krmilne in merilne elektronike, razen senzorjev in vezij za prilagajanje signalov. Na osi glavnega motorja je pritrjena nosilna plošča, ki nosi lok s senčno kroglo, motor za pomik loka, piranometer in povezovalne elemente. Poleg naštetih glavnih delov ima naprava še elemente, ki služijo za povečanje zanesljivosti delovanja in dodatne funkcije (senzor direktnega vpada sončnega sevanja), začetno pozicioniranje in določitev izhodišča (elementi za pritrditev laserske tehnice in elektronskega kompasa) in zaščito (varnostna končna stikala).

Piranometer, ki je uporabljen v prototipu merilnika, je Kipp & Zonen Model CM 5/6. Ima primerne merilne lastnosti, ki ga uvrščajo med sekundarne standarde. Posebno pomembni lastnosti sta temperaturni koeficient in časovna stabilnost. Piranometer CM 5/6 ustreza specifikacijam za najboljši izmed treh razredov, kot so definirani v delu /12/.

2.2 Senčna krogla

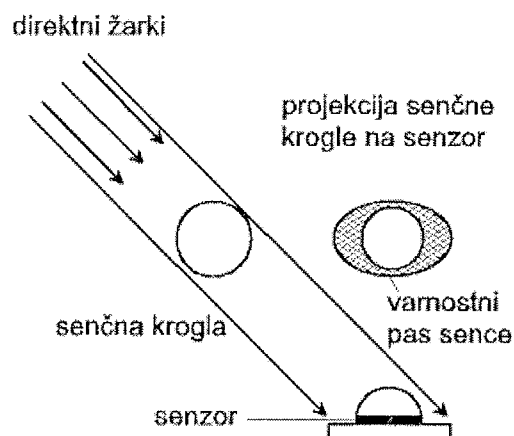
Ena izmed bistvenih komponent merilne naprave je senčna krogla. Prostorsko gibanje senčne krogle upravlja mikrokontroler sledilnega sistema, ki je del lokalne enote. Pri uporabi senčne krogle je pomembno, da je senca, ki pada na senzor, malo večja od aktivne površine senzorja. Projekcija krogle na senzorsko ploskev je elipsa, katere manjša os je za varnostni rob večja od površine senzorja. Pri postavitvi krogle na nosilni lok je pomembna točna nastavitve senčila na sredino loka. Med sledenjem sonca je presečna ravnina senčne krogle vedno krog, ki ustvari senco na ravnini senzorja. Razmere so prikazane na sliki 3.

Na sliki 3 je prikazana projekcija sončnih žarkov na senzor v času, ko je elevacija manjša od 90° . Projekcija sence, ki



- Legenda:
- 1 - ohišje
 - 2 - nosilna plošča
 - 3 - horizontalno justiranje
 - 4 - koračni motor azimuta
 - 5 - koračni motor deklinacije
 - 6 - nosilni lok
 - 7 - piranometer
 - 8 - senčna krogla

Slika 2: Mehanska konstrukcija merilnika difuznega sevanja.



Slika 3: Projekcija direktnih sončnih žarkov prek senčne krogle na horizontalni senzor.

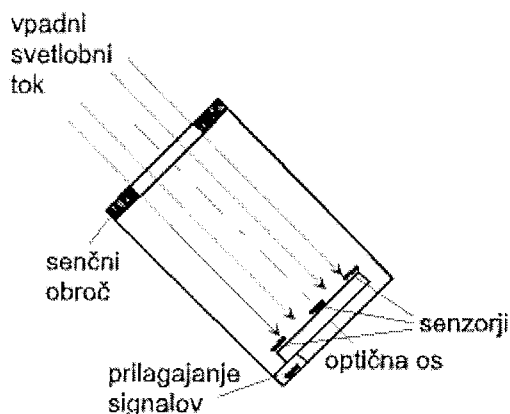
jo povzroča na senzorju senčna krogla, je krog le, ko je sonce točno v zenitu (opoldan) in so žarki pravokotni na ravnino senzorja. To je dosegljivo le v območju ekvatorialnega pasu ($\pm 23,6^\circ$ N in S). V vseh drugih legah ima senca obliko elipse. Elipsa ustvarja varnostni pas, ki obsega ploskev med zunanjim robom sence in površino senzorja piranometra. Za praktično uporabo je varnostni pas sence širok 5 mm. Ta pas tudi preprečuje večkratne odboje na prozorni zaščitni kupoli senzorja.

Središče senčne krogle je geometrijsko centrirano na nosilni lok in oddaljeno 50 cm od središča senzorja piranometra. Oddaljenost središča senzorja piranometra in središča senčne krogle ustreza standardni razdalji, ki znaša desetkratno vrednost premera senčne krogle /13/.

Le v posebnih primerih in pogojih delovanja (npr. meritve difuznega sevanja sonca med dežjem) je potrebna kompletna zunanja zaščita (stekleni ali plastični zvon). V senčni krogli je nameščen senzor direktnega vpada sončnih žarkov, ki stalno preverja položaj senčila.

2.3 Senzor direktnega vpada žarkov

Senzor direktnega vpada sončnih žarkov je dodatni senzor, ki ima dve funkciji: preverjanje natančne nastavitve pozicije sistema s senčno kroglo in meritev časa zakritja sonca, ko pade svetlobni tok za več kot 50%. Senzor direktnega vpada je izveden s krožno odprtino v cevi in ima štiri senzorske elemente na ravnem dnu cevi. Žarek vpada skozi odprtino na senzorske elemente, ki so prek vezja za prilagajanje signalov povezani z vhodno stopnjo elektronskega sistema za zajemanje podatkov (lokalni mikropretvornik). Zgradba senzorja je prikazana na sliki 4.



Slika 4: Senzor direktnega vpada sončnih žarkov.

Sistem deluje diferencialno: po dve in dve nasprotni senzorski diodi sta vezani na tokovno-napetostni (I/V) pretvornik, s katerega vodimo napetost na analogni-digitalni (A/D) pretvornik. Ko je osvetlitev nasproti ležečih diod enaka, sta toka diod enaka in senzorski sistem je v ravnotežju. Vsak izmik iz smeri direktnih sončnih žarkov predstavlja neravnotežje tokov senzorskih diod, kar ima za posledico reakcijo mikrokontrolerja in korekcijo pozicije. Sistem ima vgrajeno histerezo, da ne pride do nestabilnosti delovanja.

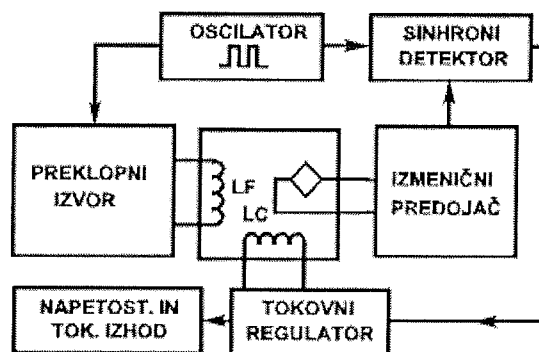
Ko svetlobna jakost na vseh štirih senzorskih diodah pade pod vnaprej določeno vrednost (50%), je oblačno. Mikrokontroler lokalne enote izvede primerjavo meritve osvetlitve senzorja direktnega vpada sončnih žarkov in meritve senzorja piranometra. Če sta izmerjeni spremembi usklajeni, sledi potrditev oblačnosti. Čas zakritja sonca v času sončnega dne se registrira posebej in je informacija o časovnem poteku oblačnosti nad območjem merje-

nja. Meritev trajanja oblačnosti ima seveda praktičen pomen le pri izvajanju meritev prek daljšega časovnega obdobja (več dni, tednov, mesecev).

2.4 Avtomatsko pozicioniranje in elektronski kompas

Merilni sistem zahteva za delovanje tridimenzionalno pozicioniranje, ki ga razdelimo na dva koraka. Najprej postavimo senzorsko nosilno ploščo v horizontalno lego, v drugem koraku pa usmerimo sistem proti severu (jugu). Za natančno horizontalno nastavitve uporabimo lasersko vodno tehniko, ki omogoča točnost nastavitve $\pm 0,5^\circ$. Naprava ima za to nastavitve na ohišju predvidene ustrezne justirne vijake. Usmeritev naprave v smer sever-jug je v prvem koraku le približna.

Klasično pozicioniranje naprave je zamudno, procedura pa natančna. Da bi se izognili subjektivnim napakam, smo instrument opremili z avtomatskim pozicionirnim sistemom. Jedro pozicionirnega sistema predstavlja elektronski kompas, ki je bil zgrajen z integriranim magnetnim senzorjem KMZ52 (Philips). Senzor je zelo občutljivo magnetno mostično vezje, ki deluje s pomočjo dveh tuljav v pravokotnem sistemu. Principielna blok shema vezja KMZ52 je prikazana na sliki 5.



Slika 5: Principielna zgradba elektronskega kompasa.

V vezju je oscilator, ki napaja pravokotno nameščeni tuljavi LF in LC. V mostiču detektirani signal se nato ojači in filtrira, temu pa sledi sinhroni detektor. Izhodni analogni signal je sorazmeren odklonu usmerjenosti vezja glede na magnetno os Zemlje sever-jug. Točnost meritve je izboljšana z izvedbo kompenzacije začetne napake postavitve vezja (offset). Napaka v sledenju sonca je odvisna od točnosti usmerjenosti proti severu in ujetja pravokotnosti sistema. Pri ročni nastavitvi standardnih merilnikov je napaka pri postavitvi velika (do $\pm 10^\circ$) in je bila z uporabo elektronskega kompasa na opisovani merilni napravi zmanjšana na $\pm 1^\circ$.

Elektronski kompas je izveden kot integriran elektronski modul, ki je povezan s portom mikropretvornika. Procesor mikropretvornika spremlja lego sistema v skladu z izvajanjem nadzornega programa delovanja. Ker je elektronski kompas dvoosni, spremljamo lego vezja v ravninskem koordinatnem sistemu. Lega merilne naprave se preverja ob vsakem vklopu naprave in pri prehodu naprave v aktivni

način delovanja (po bujenju mikropretvornika). Procedura je del samotestiranja (self-test) merilnega sistema. Ob vsakem samotestiranju se izvede meritev položaja (geografske koordinate) in pomik senčnega elementa v izhodiščno lego.

3 Sledenje in izračun koordinat

3.1 Sledilni sistem

Naprave, katerih delovanje je vezano na sledenje sonca, uporabljajo samostojne ali pa integrirane sledilne sisteme. Merilnik difuznega sevanja sonca, ki ga opisujemo, uporablja integrirani sledilni sistem. Sistem sledenja temelji na koordinatnem sistemu, ki ima v svojem središču opazovalca v točki na površini Zemlje. Središče koordinatnega sistema je v središču senzorja piranometra. Koordinati (kota azimuta in elevacije), ki se nanašata na navidezno potovanje sonca po nebu od sončnega vzhoda do sončnega zahoda, določata položaj senčila /13/. Sledilni sistem mora zagotoviti, da pada projekcija senčne krogle stalno na senzor, kot je bilo prikazano na sliki 3.

3.2 Izračun koordinat

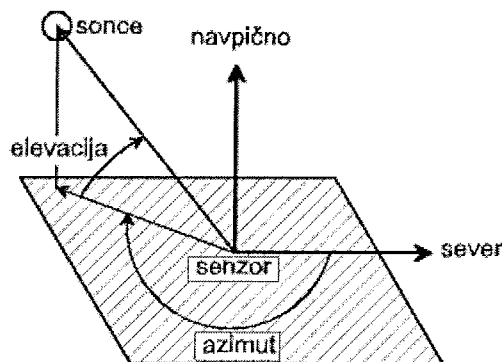
Za izračun gibanja sledilnika sonca je bila objavljena množica člankov, algoritem pa opisuje tudi knjiga /15/. Nekateri algoritmi so omejeni na določena časovna obdobja /16/, drugi poudarjajo natančnost (merilna negotovost $\pm 0.0003^\circ$ do leta 2004) /17/. Posebno pomembna je točnost nastavitve pri velikih kotih med normalo na površino senzorja in vpadnim sevanjem (kosinusni zakon).

Poleg izračuna lokalnih koordinat za gibanje sledilnega sistema je za avtonomijo sistema potrebno tudi vsakodnevno določanje sončnega dne. Sončni dan vsebuje izračun sončnega vzhoda in zahoda ter njuno korekcijo glede na izbrano točko opazovanja. Za izračune smo uporabili empirične izraze, ki jih vsebuje delo Harrigana in Stineja /18/ in zagotavljajo natančnost nastavitve obeh koordinatnih osi pod $\pm 1^\circ$, kar je ustrezno glede na mehansko izvedbo naprave in korak koračnih motorjev.

Trenutni položaj senčila za senčenje direktnega sončnega sevanja v lokalnem koordinatnem sistemu je določen z dvema kotoma: azimutom in elevacijo. Koordinatni sistem za izračun položaja senčila je prikazan na sliki 6.

Elevacija je kot med horizontalno ravnino v opazovani točki (središče senzorja) in smerjo sončnega žarka. Imenovan je tudi višina opazovanega objekta. Elevacija obsega kote od 0° do 90° .

Azimut je v sledilnem sistemu kot, ki ga tvori projekcija direktnega sončnega žarka na horizontalno ravnino z vektorjem med točko opazovanja (senzorjem) in pravim severnim (ali južnim) polom. Pozitivna smer tega kota je v smeri urnega kazalca glede na severni pol, kot je prikazano na sliki 6. Azimut lahko obsega kote od 0° do 360° .



Slika 6: Koordinatni sistem za izračun položaja senčila

Elevacija in azimut se izračunavata stalno na osnovi ure realnega časa. Vsako sekundo se izračuna položaj središča senčne krogle v polarnem koordinatnem sistemu. Ker je razdalja središča senčne krogle glede na središče senzorja piranometra konstantna, se spreminjata samo dva kota: azimut in elevacija. Vsak izmed teh dveh kotov zavzame določeno število korakov koračnega motorja. Ob tem je potrebno upoštevati tudi prestavno razmerje reduktorja, ki je zaradi različnih motorjev in prenosov za vsako koordinato os različno.

Sistem je v aktivnem stanju med sončnim vzhodom in zahodom. Oba časovna trenutka se izračunata, da se sistem zbudi iz spalnega načina ob sončnem vzhodu in gre v spalni način delovanja (sleep mode) po sončnem zahodu. Ob sončnem zahodu se sistem parkira (motor za pomik po azimutu zavzame položaj 0° - smer vzhod, motor za elevacijo pa 0° glede na horizontalno ravnino). V tem stanju naprava čaka na bujenje naslednjega dne.

4 Virtualni instrument nadzornega sistema

Virtualni instrument (VI) je program, ki deluje v grafičnem okolju. Napisan je v G-jeziku, ki namesto programskih stavkov izvaja programske funkcije v obliki grafičnih simbolov. VI ima čelno ploščo, blok diagrama in ikone (konektorja). Čelna plošča je uporabniški vmesnik, ki vsebuje kontrole in indikatorje. Za merilnik difuznega sevanja sonca je bil razvit VI, ki omogoča zajemanje podatkov, procesiranje, prikaz in shranjevanje.

Čelna plošča VI za merjenje difuznega sevanja sonca vsebuje kontrole in indikatorje za upravljanje podatkov. Upravljanje podatkov je razdeljeno na štiri enote: 1. zajemanje, 2. procesiranje, 3. prikaz in 4. shranjevanje. Za vsako enoto je izdelan posebni del uporabniškega vmesnika.

Zajemanje obsega vzpostavitev komunikacije med lokalno enoto in nadzornim računalnikom, prenos podatkov in začasno shranjevanje. Komunikacija je standardna serijska (RS-232), komunikacijski medij pa je fizični vodnik ali pa radijska zveza. Na čelni plošči so privzeti komunikacijski parametri (baudna hitrost, število podatkovnih bitov, par-

nost, število stop bitov), ki se lahko v meniju spreminjajo. Definiran je začetek in konec prenosa ali kontinuiran prenos do zaustavitve. Pred shranjevanjem podatkov v začasno datoteko se ime datoteke določi v menijskem oknu.

Procesiranje zajetih podatkov je lahko v realnem času za podatke, ki prihajajo, ali pa postprocesiranje, ko so že vsi podatki shranjeni v datoteki. V realnem času je procesiranje počasno, ker so vzorčevalni časi dolgi od 1 s do 1 ure. Običajno se procesirajo podatki, ki so v začasni datoteki. VI ponuja izbiro časovnega intervala opazovanja, meritve karakterističnih vrednosti časovne funkcije (minimum, maksimum, srednja vrednost, efektivna vrednost, največja strmina), kumulativno sevanje (določen integral) za določni dan in trajanje oblačnosti.

Prikaz podatkov je na XY grafu, ki je uporabljen kot tračni diagram za prihajajoče podatke (kontinuiran prenos po komunikacijskem kanalu) ali kot graf za postprocesiranje. Rešitev za tračni diagram je izvedena s posebnim virtualnim podinstrumentom (subVI). XY graf se lahko izbere samo za prikaz podatkov iz začasne datoteke, ker morajo biti podatki obeh koordinatnih osi na razpolago pred začetkom risanja. Za prikaz podatkov so na čelni plošči nastavitve, s katerimi uporabnik izbere časovni interval in načine filtriranja podatkov.

Shranjevanje podatkov je avtomatsko v začasno datoteko na disku nadzornega računalnika. Na čelni plošči se lahko izbira med tremi formati shranjevanja: ASCII, datalog in binarni. ASCII format je v VI privzet format, ker ga lahko neposredno pregledujemo in spreminjamo, zasede pa največ pomnilniškega prostora. Podatki se lahko filtrirajo in shranjujejo v kompaktni obliki. Po zaključku shranjevanja se datoteka avtomatsko zapre. Pri sledečih shranjevanjih je v VI na voljo možnost za dodajanje podatkov v že obstoječo datoteko.

5 Rezultati delovanja

Zgrajen je bil prototip merilnika difuznega sevanja sonca. Za sestavne dele so bili izbrani standardni materiali in moduli, ki so na tržišču. Za nadzorni sistem je bil uporabljen LabVIEW, ki je v zgrajeni napravi omogočal enostavnost preverjanja delovanja ter dodajanja in spreminjanja funkcij.

Začetna nastavitve koordinat je bila izvedena z elektronskim kompasom, ki je omogočil mnogo hitrejšo nastavitve, kot jo imajo drugi merilniki difuznega sevanja na tržišču.

Senca na senzorju je dobljena s premikajočo se kroglo. Krogla se nahaja na polkrožnem loku. Premik krogle po azimutu in elevaciji poganjata koračna motorja.

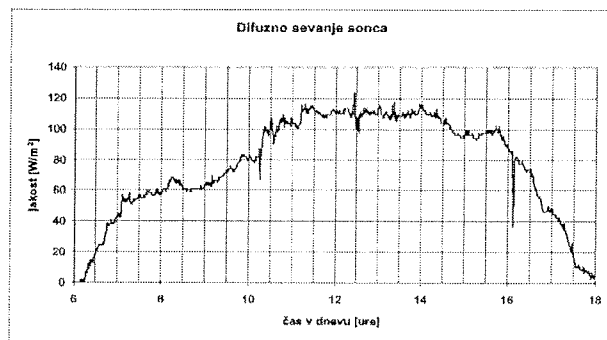
Tako kot pri drugih izvedbah merilnikov difuznega sevanja se je pojavil tudi v razvitem prototipu problem mrtvega hoda zobnikov med nosilcem pomične krogle in koračnima motorjema. Pri sledenju sonca se pojavlja mrtvi hod dvakrat: v začetnem položaju (ničelna lega), ko sistem ob sončnem vzhodu začne sledenje in opoldan, ko se začne elevacija zmanjševati. Zaradi lastne teže se dopoldan mrtvi hod pojavi samo v izhodišču, nato pa na prenose deluje stalna

sila teže loka in senčila. Ko gre senčilo prek ravnine lokalnega poldnevika (opoldan), se pojavi mrtvi hod, ki ima obratno smer glede na silo teže nosilnega loka in senčila. Algoritem krmiljenja koračnih motorjev je zagotovil približevanje izračunani vrednosti položaja senčila vedno iz smeri, ki je nasprotna smeri sile teže. S tem je mrtvi hod zobniških prenosov izločen, nastavitev lege senčila pa traja le nekaj sekund.

Merilni sistem začne vsak dan sledenje sonca iz istega začetnega položaja: to je ničelna lega sistema. Nahaja se na elevaciji 0° in azimutu 90° (smer vzhod). Sistem se zjutraj iz te točke premakne, ko dobi podatek o sončnem vzhodu in se vanjo vrne zvečer, ko dobi podatek o sončnem zahodu. V ničelni legi sistem ostane prek noči (spalni način delovanja).

Za preizkus delovanja je bila uporabljena brezžična komunikacija za prenos podatkov. Komunikacija je radiofrekvenčna (RF), serijska, kompatibilna z RS-232 standardom in deluje na ISM področju 433 MHz.

Primer izmerjenega časovnega poteka difuznega sevanja v obdobju enega sončnega dne (12 ur za datum 14 marec 2006 na lokaciji $46^\circ 03' N$, $13^\circ 14' E$) je prikazan na sliki 7.



Slika 7: Časovni potek difuznega sevanja sonca.

Izmerjeni rezultati difuznega sevanja sonca, ki jih prikazuje slika 7, so bili prenešeni iz VI v preglednico (Excel).

Pri meritvi obstaja tudi sistematska napaka zaradi pokritja dela zgornjega polprostora koordinatnega sistema z mehanskim nosilcem in senčno kroglo. Velikost te napake smo izračunali in je v velikostnem razredu pod 1% merjene vrednosti.

Nadzorni program prototipa merilne naprave je VI, ki poteka na nadzornem računalniku kot grafični program v LabVIEW okolju. VI je sestavljen iz podinstrumentov (subVI), kjer so realizirane posamezne podprogramske funkcije. V oknu čelne plošče je prikazana izbira komunikacijskih parametrov za sprejem podatkov prek standardnega serijskega kanala (RS-232) in način prikaza podatkov. Podatki se lahko pregledujejo tako kot prihajajo v tračnem diagramu (v realnem času). Po zapisu v datoteko se lahko pregledujejo v grafu po končanem zajemanju (v virtualnem času). V oknu čelne plošče so na voljo še drugi kriteriji prikaza in izračuni: minimalna in maksimalna vrednost meritve, kumulativno difuzno sevanje in kumulativni čas zakritja z ob-

laki za določen časovni interval, čas najhitrejše spremembe sevanja. Za prenos podatkov v preglednice so na voljo nekateri standardni formati: ASCII, Excel, itd.

6 Sklep

Meritev difuznega sevanja sonca predstavlja tehnični problem, ki ga proizvajalci merilne opreme, kot tudi uporabniki rešujejo na različne načine. Najenostavnejša je seveda rešitev z vrhunsko merilno opremo, ki pa predstavlja možnost le za najbogatejše. Vendar ni niti taka oprema brez pomanjklivosti in ne zagotavlja absolutne točnosti. V kolikor razpolagamo z vitalnimi deli merilnega sistema, lahko izvedemo zelo kvalitetne meritve tudi z mnogo cenejšo napravo, ki vsebuje novosti in prednosti pred podobnimi merilniki in je primerna za uporabo tudi pri raziskovalnem delu.

Merjenje difuzne svetlobe je izvedeno s piranometrom, ki je zasenčen s senčno kroglo. Gibanje senčne krogle določa algoritem mikropretvornika. Ustvarjanje sence na senzorju piranometra je primarna naloga senčne krogle. Obenem pa senčna krogla opravlja tudi meritev časa oblačnosti, ker je v njej integriran senzor direktnega vpada sončnih žarkov.

Elektronski kompas z mikropretvornikom postavlja napravo v družino avtomatskih ali inteligentnih senzorjev. Uporabniku prihrani precej truda in poizkusov točne orientacije glede na geografske smeri neba. Izvedba elektronskega kompasa je prilagojena mikroprocesorsko zasnovanemu sistemu in daje dober rezultat glede na razmeroma majhen finančni vložek, ki je za izdelavo vezja potreben.

Nadzorni sistem je namenjen upravljanju podatkov (data management). Izdelan je kot virtualni instrument (VI) s pripadajočimi virtualnimi podinstrumenti. VI ima grafični vmesnik za postavitev potrebnih upravljaljskih funkcij in dostop do podatkov v numerični in grafični obliki. Program, ki je sestavljen v okolju LabVIEW, je fleksibilen in omogoča hitre spremembe konfiguracije sistema in procesiranja podatkov. VI omogoča tudi shranjevanje podatkov, preverjanje njihove konsistence glede na konfiguracijo in zahteve uporabnika in posredovanje podatkov drugim sistemom po standardnih komunikacijskih poteh.

Merilnik difuznega sevanja sonca je bil izdelan iz standardnih mehanskih in elektronskih komponent, ki so dosegljive na tržišču. Mehanske komponente (prenosi, reduktor, nosilna plošča, lok, senčnik) so bile prilagojene in povezane v funkcionalno celoto. Uporabljene elektronske komponente so velikoserijska integrirana vezja in pasivne komponente s poznanimi karakteristikami. Za elektroniko lokalne enote je bila uporabljena nezahtevna tehnologija tiskanih vezij (dvoplastna) in povezovalni elementi za zunanjo uporabo.

7 Reference

- /1/ Veeran PK, Kumar S. Diffuse radiation on a horizontal surface at Madras. *Renew Energy*, 1993, 3 (8): 931-4
- /2/ Liu Yb, Jordan RC. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total radiation. *Solar Energy*, 1971, 13: 289-90
- /3/ Klein SA. Calculation of monthly average insulations on tilted surfaces. *Solar Energy*, 19, 1977: 325-9
- /4/ AML - program diffuse.aml: http://www.wsl.ch/staff/niklaus.zimmermann/programs/aml1_4.html
- /5/ Kumar, L., Skidmore, A.K. and Knowles, E., Modelling topographic variation in solar radiation in a GIS environment. *Int. Journal for Geographical Information Science*, 1997, 11 (5): 475-497.
- /6/ M. P. Thekaekara, *Solar radiation measurement - Techniques and instrumentation*, Solar Energy, vol. 18, no. 4, 1976, p. 309-325.
- /7/ F. Kesten, *Measurement and analysis of solar radiation data*, Performance of solar energy converters: Thermal collectors and photovoltaic cells, Lectures of the Course, Ispra, Italy, November 11-18, 1981, Dordrecht, D. Reidel Publishing Co., 1983, p. 1-64.
- /8/ J. R. Hickey, *Solar radiation measuring instruments - Terrestrial and extra-terrestrial*, Proc. Seminar Optics in solar energy utilization, San Diego, Aug. 21, Palos Verdes Estates, Calif., Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 1975, p. 53-61.
- /9/ K. L. Coulson, Y. Howell, *Solar radiation instruments*, Sunworld, vol. 4, no. 3, 1980, p. 87-94.
- /10/ E. C. Kern, Jr., *Rotating Shadowband Radiometer*, Irradiance, USA: www.irradiance.com
- /11/ M. Ceschia, Z. Gorup, E. Toppano: A shadow disc instrument for measuring diffuse solar radiation, Congrso SIF, Napoli, 1988
- /12/ *Guide to meteorological Instruments and Methods of Observation*, 7th Ed., World Meteorological, 2006, http://www.wmo.ch/web/www/IMOP/publications/CIMO-Guide/Draft%207th%20edition/-Part1-Ch07Final_Corr_LSP.pdf
- /13/ Instrument Descriptions - <http://www.cmdl.noaa.gov/star/bodyframe.html>
- /14/ S. Lakeou, E. Ososanya, B. Latigo, W. Mahmoud, G. Karanja, W. Oshumare: Design of a Low-cost Solar Tracking Photo-voltaic (PV) Module and Wind Turbine Combination System, 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, 4-8 September 2006, Dresden, Germany, <http://www.udc.edu/cere/5BV.1.39.pdf>
- /15/ Meeus, J., 1998. *Astronomical Algorithms*, second ed. Willmann-Bell, Inc., Richmond, USA.
- /16/ Michalsky, J.J., 1988. The astronomical Almanac's algorithm for approximate solar position (1950-2050), *J. Solar Energy*, 40 (3): 227-235
- /17/ Ibrahim Reda, Afshin Andreas, Solar position algorithm for solar radiation applications, *Solar Energy*, 76 (2004): 577-589
- /18/ R. W. Harrigan, W. B. Stine, *Solar Energy Fundamentals and Design with Computer Applications*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1985

Doc. dr. Žarko Gorup
Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani
Tržaška 25, SI-1000 Ljubljana, Slovenija
E-mail: zarko.gorup@fe.uni-lj.si
tel +386 1 4768 325; fax +386 1 4768 725

V. pred. mag. Niko Basarič
Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani
Tržaška 25, SI-1000 Ljubljana, Slovenija
E-mail: niko.basaric@fe.uni-lj.si
tel +386 1 4768 331;