



UNIVERZITET CRNE GORE

Elektrotehnički Fakultet - Podgorica

Danko Milić

**EDUKACIJSKO EKSPERIMENTALNI SET ZA PRAĆENJE POLOŽAJA
SUNCA I INTENZITETA ZRAČENJA ZA POTREBE OPTIMIZACIJE
FOTONAPONSKIH SISTEMA**

MAGISTARSKI RAD

Podgorica, april 2024. godine

PODACI I INFORMACIJE O MAGISTRANDU:

Ime i prezime: Danko Milić

Datum i mjesto rođenja: 11.05.1974., Podgorica, Crna Gora

Naziv završenog osnovnog studijskog programa i godina diplomiranja: Elektrotehnički fakultet, smjer energetika i automatika, 2002.

INFORMACIJE O MAGISTARSKOM RADU:

Naziv postdiplomskih studija: Magistarske akademske studije, studijski program Elektronika, Telekomunikacije i Računari na Elektrotehničkom fakultetu u Podgorici, Univerzitet Crne Gore.

Naziv rada:

“Edukacijsko eksperimentalni set za praćenje položaja sunca i intenziteta zračenja za potrebe optimizacije fotonaponskih sistema”

Fakultet na kome je rad odbranjen: Elektrotehnički fakultet, Podgorica

UDK, OCJENA I ODBRANA MAGISTARSKOG RADA:

Datum prijave master rada: 21.09.2023.

Datum sjednice vijeća univerzitetske jedinice na kojoj je prihvaćena tema: 21.12.2023.

Komisija za ocjenu teme i podobnosti magistranda:

Prof. dr. Vladan Vujičić,

Prof. dr. Radovan Stojanović,

Doc. dr. Milena Erceg.

Mentor: Prof. dr. Radovan Stojanović

Komisija za ocjenu rada:

Prof. dr. Vladan Vujičić,

Prof. dr. Radovan Stojanović,

Doc. dr. Milena Erceg.

Komisija za odbranu rada:

Prof. dr. Vladan Vujičić,

Prof. dr. Radovan Stojanović,

Doc. dr. Milena Erceg.

Datum odbrane: 26.04.2024.

Ime i prezime autora: Danko Milić, dipl.inž.el.

1. ETIČKA IZJAVA

U skladu sa članom 22 Zakona o akademskom integritetu i članom 24 Pravila studiranja na postdiplomskim studijama, pod krivičnom i materijalnom odgovornošću, izjavljujem da je magistarski rad pod naslovom

"Edukacijsko eksperimentalni set za praćenje položaja sunca i intenziteta zračenja za potrebe optimizacije fotonaponskih sistema"

moje originalno djelo.

Podnosilac izjave,

Danko Milić, dipl.ing.el.



U Podgorici, dana 22.04.2024. godine

Posvećeno mojim dragim roditeljima, Milivoju i Vidri Milić.

Hvala vam puno na svemu!

SAŽETAK

Predmet istraživanja ovog rada je dizajniranje i implementacija hardvera i softvera za mikro kontrolersku jedinicu dvoosnog solarnog tragača. Sistem koristi ATmega328P mikro kontroler i Arduino Uno razvojnu ploču za kontrolu kretanja dva servo motora, koji rotiraju fotonaponski solarni panel u dvije ose. Količina rotacije je određena mikro kontrolerom, na osnovu ulaza preuzetih sa četiri foto senzora.

Princip rada sistema je da obezbijedi da foto naponski moduli budu konstantno usklađeni sa sunčevim zracima, što maksimizira izloženost solarnog panela sunčevom zračenju. Kao rezultat, solarni panel može proizvesti više električne energije.

Ova tema posebno dobija na aktuelnosti ako se ima u vidu projekcija Međunarodne agencija za energiju (IEA), gdje se u scenariju nulte CO2 emisije za 2040-tu godinu očekuje da će se čak 40% ukupne električne energije proizvoditi iz solarne energije.

Ako se uzmu u obzir projekti koji su u najavi može se očekivati da će ukupna snaga instalisanih kapaciteta fotonaponskih elektrana koje će biti izgrađene u toku sledećih 5-10 godina u Crnoj Gori premašiti 1GW. Poređenja radi u ovom trenutku ukupni instalisani kapaciteti svih elektrana u Crnoj Gori je 1.05GW, što dovoljno govori o veoma velikom rastu udjela proizvodnje električne energije na bazi solarne energije koji se očekuje u sledećem periodu. Samim tim povećanje efikasnosti proizvodnje u fotonaponskim elektranama postaje veoma važna tema.

Metodologija istraživanja u ovom radu obuhvatila je proučavanje postojeće literature i stručnih radova, dizajniranje hardverskog sistema, dizajniranje softverskog dijagrama, pripremu odgovarajućeg softverskog koda, kompiliranje koda na odgovarajućoj softverskoj platformi, snimanje koda na kontroler, simuliranje rada sistema na softverskoj platformi, testiranje hardverskih komponenti i uvezivanje svih hardverskih komponenti u jedan sistem.

Kao rezultat dobijen je funkcionalan sistem za praćenje položaja sunca po dvije ose koji, za koji se testiranjem u laboratoriji i u prirodnom okruženju potvrdilo da je u stanju da zadrži solarni panel u ravni sa suncem ili bilo kojim izvorom svjetlosti.

Nakon testiranja, obavljeno je mjerenja proizvedene energije u realnim uslovima u okolini Podgorice u dva slučaja:

- pri isključenom sistemu za praćenje položaja sunca,
- pri uključenom sistemu za praćenje položaja sunca.

Analizom u komparacijom rezultata mjerenja, došlo se do zaključka da je pri uključenom sistemu za mjerenje položaja sunca količina proizvedene energije bila za 32,9% veća od energije proizvedene pri isključenom sistemu za praćenje položaja sunca.

Shodno navedenim rezultatima ovaj rad dao je doprinos istraživanju povećanja efikasnosti proizvodnje električne energije putem solarnih fotonaponskih sistema, optimizacijom položaja panela, u realnim uslovima na teritoriji Crne Gore, što može dati putokaz za optimizaciju budućih fotonaponskih sistema koji su u pripremi ili su u fazi projektovanja i dobijanja potrebnih dozvola. U tom smislu rad osim istraživačkog karaktera ima i edukativni značaj.

Ključne riječi:

Dvoosni solarni tragač, solarna energija, fotonaponski solarni panel, Arduino Uno razvojna ploča, AVR mikro kontroler ATMEGA 328.

ABSTRACT

The subject of research in this paper is the design and implementation of hardware and software for a micro controller unit of a two-axis solar tracker.

The system uses an ATmega328P microcontroller and an Arduino Uno development board to control the movement of two servo motors, which rotate the photovoltaic solar panel in two axes. The amount of rotation is determined by the micro controller, based on inputs taken from the four photo sensors.

The principle of operation of the system is to ensure that the photo voltage modules are constantly aligned with the sun's rays, which maximizes the solar panel's exposure to solar radiation. As a result, the solar panel can produce more electricity.

This topic is especially relevant concerning the projection of the International Energy Agency (IEA), where in the scenario of zero CO₂ emissions for the year 2040, it is expected that as much as 40% of the total electricity will be produced from solar energy.

If we take into account the projects that have been announced, it can be expected that the total power of the installed capacity of photovoltaic power plants that will be built in the next 5-10 years in Montenegro will exceed 1GW. For the sake of comparison, at the moment, the total installed capacity of all power plants in Montenegro is 1.05GW. Therefore we can expect very large increase in the share of electricity production based on solar energy that is expected in the next period. Therefore, increasing production efficiency in photovoltaic power plants becomes a very important topic.

The research methodology in this work included the study of existing literature and professional works, designing the hardware system, designing the software diagram, preparing the appropriate software code, compiling the code on the appropriate software platform, recording the code on the controller, simulating the operation of the system on the software platform, testing the hardware components and binding of all hardware components into one system.

As a result, a functional system for monitoring the position of the sun along two axes was obtained, which, through testing in the laboratory and in the natural environment, was confirmed to be able to keep the solar panel in line with the sun or any light source.

After testing, measurements of the produced energy were carried out in real conditions in the surroundings of Podgorica in two cases:

- when the system for tracking the position of the sun is turned off,
- when the system for tracking the position of the sun is turned on.

By analyzing the comparison of measurement results, it was concluded that when the system for measuring the position of the sun was turned on, the amount of energy produced was 32.9% higher than the energy produced when the system for monitoring the position of the sun was turned off.

According to the stated results, this work has contributed to the research of increasing the efficiency of electricity generation through solar photovoltaic systems, by optimizing the position of the panels, in real conditions on the territory of Montenegro, which can provide a roadmap for the optimization of future photovoltaic systems that are being prepared or are in the design phase and obtaining the necessary permits. In this sense, the work, apart from its research character, also has an educational significance.

Keywords:

Dual Axis Solar Tracker, Solar Power, Photovoltaic Solar Panel, Arduino Uno Development Board, ATMEGA 328 AVR Micro Controller.

SADRŽAJ:

SAŽETAK/ABSTRACT	3
LISTA SKRAĆENICA	8
LISTA TABELA.....	9
LISTA SLIKA.....	9
GLAVA 1. – UVOD	
1. UVOD	13
2. SOLARNA ENERGIJA.....	15
3. FOTONAPONSKA TEHNOLOGIJA ZA PROIZVODNJU ELEKTRIČNE ENERGIJE.....	18
4. EFIKASNOST PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE IZ FOTONAPONSKIH SOLARNIH PANELA	23
GLAVA 2. - PREGLED LITERATURE I TIPOVI SISTEMA ZA PRAĆENJE SUNCA	
1. PREGLED LITERATURE.....	25
1.1 STRATEGIJE PRAĆENJA OTVORENE PETLJE.....	26
1.2 STRATEGIJE PRAĆENJA ZATVORENE PETLJE.....	30
2. TIPOVI SISTEMA ZA PRAĆENJE SUNCA.....	36
2.1 JEDNOOSNI TRAGAČI.....	37
2.2 TUBULARNI SOLARNI PANELI.....	38
2.3 DVOOSNI TRAGAČI.....	39
3. VRSTE SOLARNIH TRAGAČA PREMA METODI PRAĆENJA SUNCA	40
3.1 PASIVNI UREĐAJI ZA PRAĆENJE SUNCA.....	40
3.2 HRONOLOŠKI UREĐAJI ZA PRAĆENJE SUNCA.....	40
3.3 AKTIVNI UREĐAJI ZA PRAĆENJE SUNCA.....	41

GLAVA 3 - RAČUNARSKE PLATFORME I MIKROKONTROLERI ZA DIGITALNU KONTROLU PRAĆENJA

1. RAČUNARSKE PLATFORME ZA DIGITALNU KONTROLU SISTEMA ZA PRAĆENJE SUNCA -----	42
1.1 ASIC REŠENJE -----	42
1.2 LOGIČKE PLATFORME KOJE SE MOGU REKONFIGURISATI -----	42
1.3 SOFTVERSKI PROGRAMIRANA KOLA -----	43
2. MIKROKONTROLERI ZA DIGITALNU KONTROLU SISTEMA ZA PRAĆENJE SUNCA-----	43
2.1 Osnovni elementi mikrokontrolera -----	43
2.2 Prateći elementi mikrokontrolera -----	44
2.3 Tipovi mikrokontrolera-----	44
3. AVR MIKROKONTROLERI -----	47
4. MIKROKONTROLER ATMEGA328P -----	47
4.1 OSNOVNE KARAKTERISTIKE MIKROKONTROLERA -----	48
4.2 RASPORED I OPIS PINOVA -----	50
4.3 BLOK DIJAGRAM -----	52
4.4 AVR CPU JEZGRO -----	54

GLAVA 4 – DVOOSNI SISTEM ZA PRAĆENJE SUNCA BAZIRAN NA MIKROKONTROLERU OPŠTE NAMJENE

1. OPIS PREDLOŽENOG DVOOSNOG SISTEMA ZA PRAĆENJE SUNCA -----	57
2. PRINCIP RADA FOTO SENZORA -----	59
3. OSNOVNA ŠEMA KOLA -----	61
4. RAZVOJNA PLOČA -----	63
5. SERVO MOTORI -----	67
6. SOLARNI FOTONAPONSKI PANEL -----	69
7. SENZOR INTENZITETA SVJETLOSTI BH1750 -----	69
8. SENZOR TEMPERATURE I VLAŽNOSTI – DHT11 -----	70
9. ENERGETSKI MODUL, BATERIJA I MODUL ZA PUNJENJE MOBILNOG TELEFONA -----	71

10. LCD EKTRAN	74
11. POVEZIVANJE I TESTIRANJE KOMPONENTI	76
12. FORMIRANJE PROTOTIPA	79
13. SOFTVERSKA IMPLEMENTACIJA	86
14. PROGRAMSKI KOD	87

GLAVA 5 - REZULTATI SIMULIRANJA, TESTIRANJA I MJERENJA

1. SIMULITRANJE SISTEMA.....	92
2. TESTIRANJE FUNKCIONALNOSTI SA VJEŠTAČKIM IZVOROM SVJETLOSTI	95
3. TESTIRANJE FUNKCIONALNOSTI U ODNOSU NA POLOŽAJ SUNCA.....	96
4. MJERENJE STRUJE PUNJENJA SA UKLJUČENOM REGULACIJOM	97
5. MJERENJE STRUJE PUNJENJA SA ISKLJUČENOM REGULACIJOM	100
6. KOMPARACIJA REZULTATA MJERENJA	103

GLAVA 6

ZAKLJUČAK	104
BUDUĆI RAD	105
REFERENCE	106

LISTA SKRAĆENICA:

PV	Photo Voltaic (foto voltaik)
ADC	Analog to Digital Converter (analogno-digitalni pretvarač)
ASIC	Application Specific Integrated Circuit (Integrirano kolo za specifičnu aplikaciju)
LCD	Liquid Crystal Display (ekran sa tečnim kristalima)
LDR	Light Dependent Resistor (otpornik zavisian od svjetlosti)
MCU	Micro Controlling Unit (mikro kontrolna jedinica)
PC	Personal Computer (personalni računar)
RAM	Random acces memory (memorija sa slučajnim pristupom)
SRAM	Static random access memory(statička memorija sa slučajnim pristupom)
EEPROM memorija	Electrically Erasable Programmable Read Only Memory (programabilna samo za čitanje koja se može električno brisati)
ROM	Read only memory (memorija samo za čitanje)
SDRAM	Synchronous dynamic random access memory (sinhrona dinamička memorija sa slučajnim pristupom)
RISC	Reduced Instruction Set Computer (računar sa smanjenim skupom instrukcija)
AVR	Advanced Virtual RISC (napredni virtualni računar sa smanjenim skupom instrukcija)
CPU	Central processing unit(centralna procesorska jedinica)
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter (univerzalni asinhroni prijemnik predajnik)
USB	Universal Serial Bus (univerzalna serijska magistrala)
IEA	International Energy Agency (Internacionalna agencija za energiju)

LISTA TABELA:

Tabela 4.1 – osnovne karakteristike razvojne ploče

Tabela 4.2 – opis elemenata i interfejsa razvojne ploče

Tabela 4.3 – ugao rotacije servo motora

Tabela 4.4 – karakteristike energetskeg modula

Tabela 4.5 – parametri modula za punjenje mobilnog telefona

Tabela 5.1 – rezultati mjerenja struje punjenja pri uključenoj regulaciji

Tabela 5.2 - rezultati mjerenja struje punjenja pri isključenoj regulaciji

LISTA SLIKA:

Slika 1.1 - Globalna proizvodnja električne energije za 2022.god (TWh)

Slika 1.2 - Globalna proizvodnja električne energije za 2022. god. (%)

Slika 1.3 –rast proizvodnje solarne električne energije u TWh i procentima

Slika 1.4 – projekcija rasta proizvodnje solarne električne energije u TWh prema IEA

Slika 1.5 – projekcija rasta udjela proizvodnje solarne električne energije u % prema IEA

Slika 1.6 - IEA Net zero scenarij

Slika 1.7 – foto električna konverzija u PN spoju

Slika 1.8 Poprečni presjek solarne ćelije

Slika 1.9 – načini vezivanja foto naponskih ćelija

Slika 1.10 – tipičan način povezivanja foto naponskih ćelija

Slika 1.11 Solarna ćelija, modul, solarni panel

Slika-1.12 (a) Monokristalni solarni panel, (b) Polikristalni solarni panel, (c) Amorfnji solarni panel.

Slika 1.13 –Solarna foto naponska elektrana Golmud u Kini

Slika 1.14 – Lambertov zakon

Slika 2.1 – pojednostavljena šema jednoosnog tragača sa otvorenom petljom

Slika 2.2 – primjeri algoritama otvorene petlje

Slika 2.3 – primjer blok šeme dvoosnog tragača sa otvorenom petljom

Slika 2.4 a) primjer –blok dijagram dvoosnog tragača zatvorene petlje, korišćenjem optičkog praćenja b) primjer-blok dijagrama dvoosnog tragača zatvorene petlje, korišćenjem algoritma za poziciju sunca

Slika 2.5 – primjer algoritma dvoosnog tragača zatvorene petlje, korišćenjem optičkog praćenja

Slika 2.6 – primjer algoritma dvoosnog tragača zatvorene petlje, korišćenjem algoritma za poziciju sunca

Slika 2.7 - Promjena položaja zemlje u odnosu na sunce u toku godine

Slika 2.8 –promjena putanje sunca na nebu u toku godine - sjeverna hemisfera

Slika 2.9 – vertikalni tip jednoosnog tragača

Slika 2.10 – horizontalni tip jednoosnog tragača

Slika 2.11 – Tubularni foto naponski panel

Slika 2.12 Struktura tragača za sunce sa dvije ose

Slika 3.1 – šema mikro kontrolera ATMEGA328P

Slika 3.2 – raspored pinova

Slika 3.3 – blok dijagram mikro kontrolera ATMEGA328

Slika 3.4 Blok dijagram AVR arhitekture

Slika 4.1 - HARDVERSKI MODEL – BLOK DIJAGRAM

Slika 4.2 – zavisnost otpora LDR foto senzora od osvijetljenosti

Slika 4.3 – Šema kolo LDR foto senzora

Slika 4.4 – Primijenjeni LDR foto senzor

Slika 4.5 – blok četiri LDR foto senzora

Slika 4.6 – pojednostavljena šema kola

Slika 4.7 – šema razvojne ploče

Slika 4.8 – fotografija razvojne ploče

Slika 4.9 – pozicija elemenata i interfejsa razvojne ploče

Slika 4.10 – servo motor

Slika 4.11 – ugao rotacije servo motora

Slika 4.12 – fotografije solarnog panela, prednja i zadnja strana

Slika 4.13 – lux senzor

Slika 4.14 – senzor temperature i vlažnosti

Slika 4.15 – energetski modul napajan solarnom energijom i preko USB

Slika 4.16 – šematski dijagram energetskog modula

Slika 4.17 – Litijum jonska punjiva baterija 3.7V, 2200mAh

Slika 4.18 – modul za punjenje mobilnog telefona

Slika 4.19 - LCD ekran

Slika 4.20 – Upotrijebljene komponente sistema

Slika 4.21 – Testiranje komponenti sistema

Slika 4.22 – testiranje funkcionalnosti senzora temperature i vlažnosti

Slika 4.23 – testiranje funkcionalnosti foto senzora koji (na izlazu daje digitalnu vrijednost)

Slika 4.24. – testiranje funkcionalnosti lux senzora

Slika 4.25 – komponente montirane na donjoj ploči

Slika 4.26 – komponente montirane na gornjoj ploči

Slika 4.27. Servo motori montirani na pokretni mehanizam

Slika 4.28 – Mehanizam sa motorima i solarnom panelom montiran na gornjoj ploči

Slika 4.29 – izgled prototipa sa prednje strane

Slika 4.30 – izgled prototipa sa zadnje strane

Slika 4.31 – algoritam upravljanja

Slika 5.1 Funcionalna šema sistema na softverskoj platformi Proteus Professional

Slika 5.2 Simulacija okretanja donjeg motora, X osa

Slika 5.3 Simulacija okretanja gornjeg motora, Y osa

Slika 5.4 – Panel automatski pozicioniran upravno u odnosu na vještački izvor svjetlosti

Slika 5.5 - Panel automatski pozicioniran upravno u odnosu na položaj sunca

Slika 5.6 – rezultati mjerenja pri uključenoj regulaciji

Slika 5.7 – fotografija - prikaz mjerenja pri uključenoj regulaciji

Slika 5.8 – rezultati mjerenja pri isključenoj regulaciji

Slika 5.9 – fotografija - prikaz mjerenja pri isključenoj regulaciji

Slika 5.10 – komparacija rezultata mjerenja pri uključenoj i isključenoj regulaciji

GLAVA 1 - UVOD

1. Uvod

Sa neizbježnim nedostatkom izvora fosilnih goriva u budućnosti, obnovljivi izvori energije postali su tema interesovanja istraživača, tehničara, investitora i donosioca odluka širom svijeta. Solarna energija, energija vjetra, geotermalna energija, energija plime, osjeke i talasa, hidroenergija i bioenergija, zbog svoje obnovljivosti, smatraju se povoljnom zamjenom za fosilna goriva.

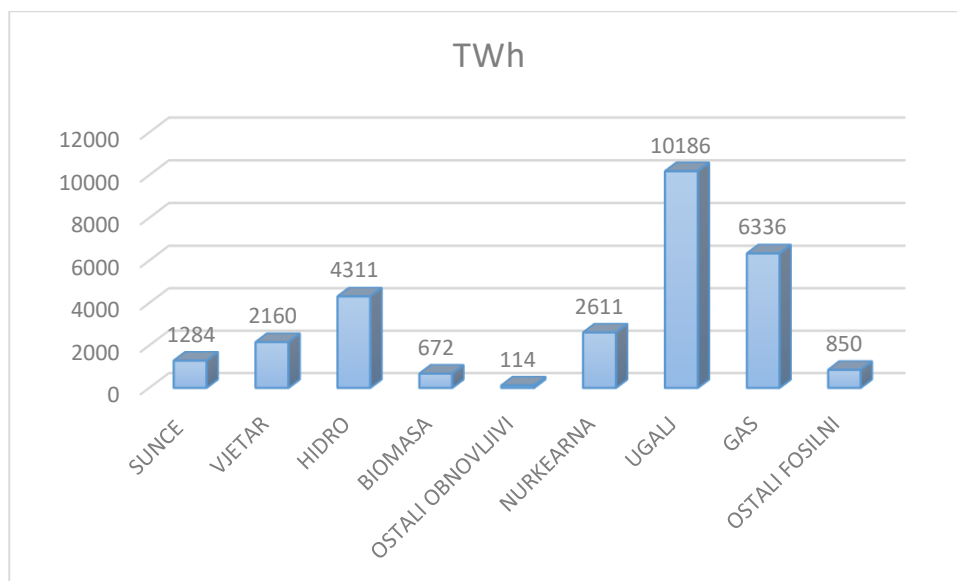
U toku 2015-te godine kada je potpisan Pariski klimatski sporazum, od energije sunca i vjetra proizvedeno je 5% električne energije na svijetu.

U toku 2021. godine od energije sunca i vjetra proizvedeno je ukupno 10% električne energije na svijetu, kada je prvi put premašila nuklearnu proizvodnju električne energije.

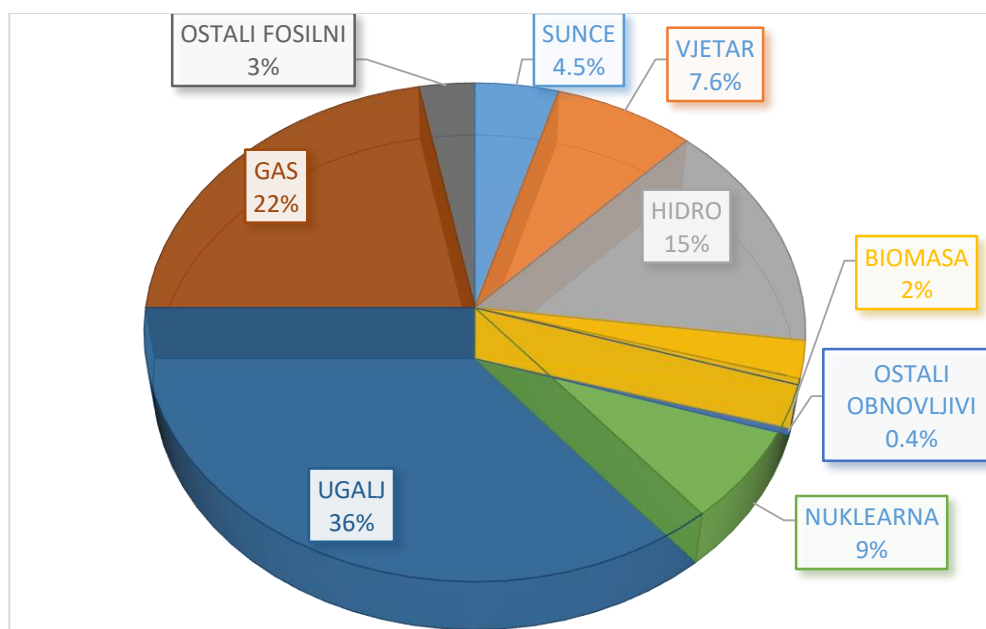
Sada preko šestdeset zemalja generiše više od 10% svoje električne energija iz vjetra i sunca.

U toku 2022. godine u globalnoj proizvodnji električne energije i dalje dominiraju fosilna goriva, koja su obezbijedila 61% proizvodnje električne energije. Ugalj je činio 36% (10.186TWh), fosilni gas 22% (6.336 TWh) i druga fosilna goriva 3% (850 TWh) globalne proizvodnje. Hidro je ostao najveći čisti izvor električne energije sa 15% (4.311 TWh), a nuklearni drugi najveći čisti izvor sa nešto više od 9%(2.611 TWh). Vjetar i solarna energija zajedno su dostigli udio od 12% globalne električne energije (3.444 TWh), vjetar sa 7,6% (2.160 TWh) i solarna energija sa 4,5% (1.284 TWh).

Bioenergija(biomasa) je proizvela 2,4% (672 TWh) globalne električne energije i drugi obnovljivi izvori energije 0,4%(114 TWh).



Slika 1.1 - Globalna proizvodnja električne energije za 2022.god (TWh)
(grafika D. Milić, izvod podataka EMBER, Global Electricity Review 2023, referenca 45)

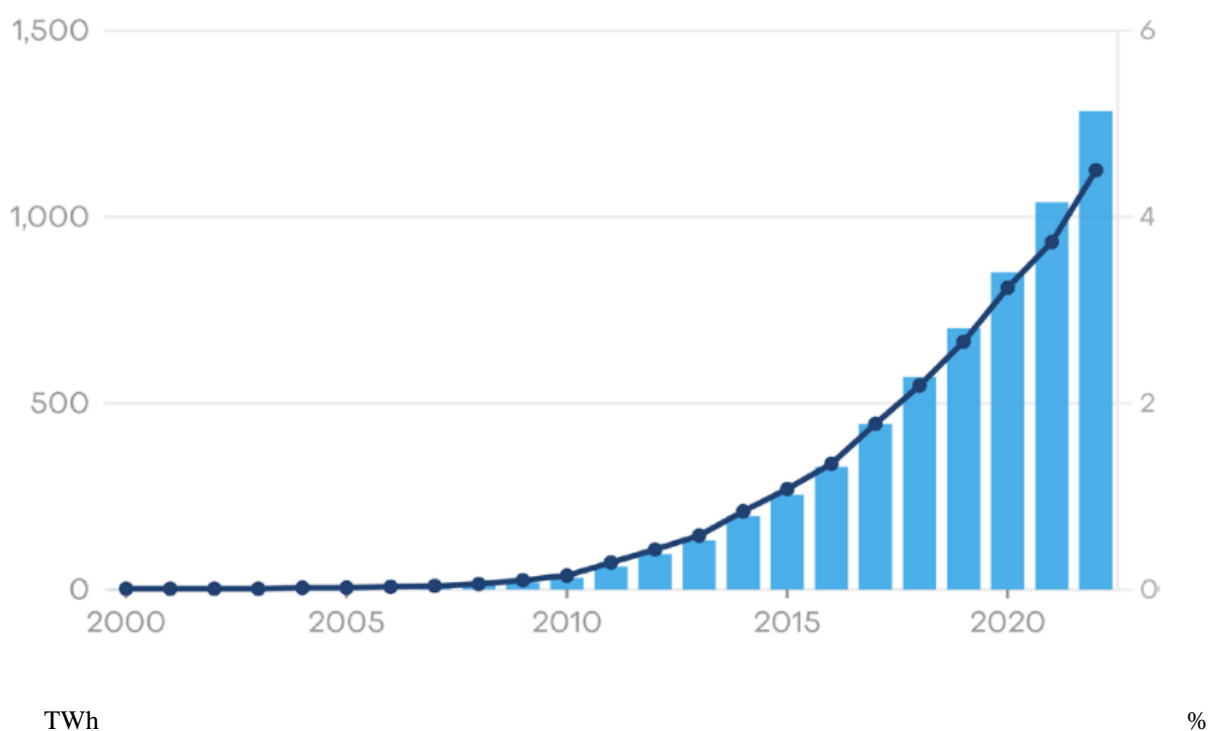


Slika 1.2 - Globalna proizvodnja električne energije za 2022. god. (%)
(grafika D. Milić, izvod podataka EMBER, Global Electricity Review 2023, referenca 45)

2. SOLARNA ENERGIJA

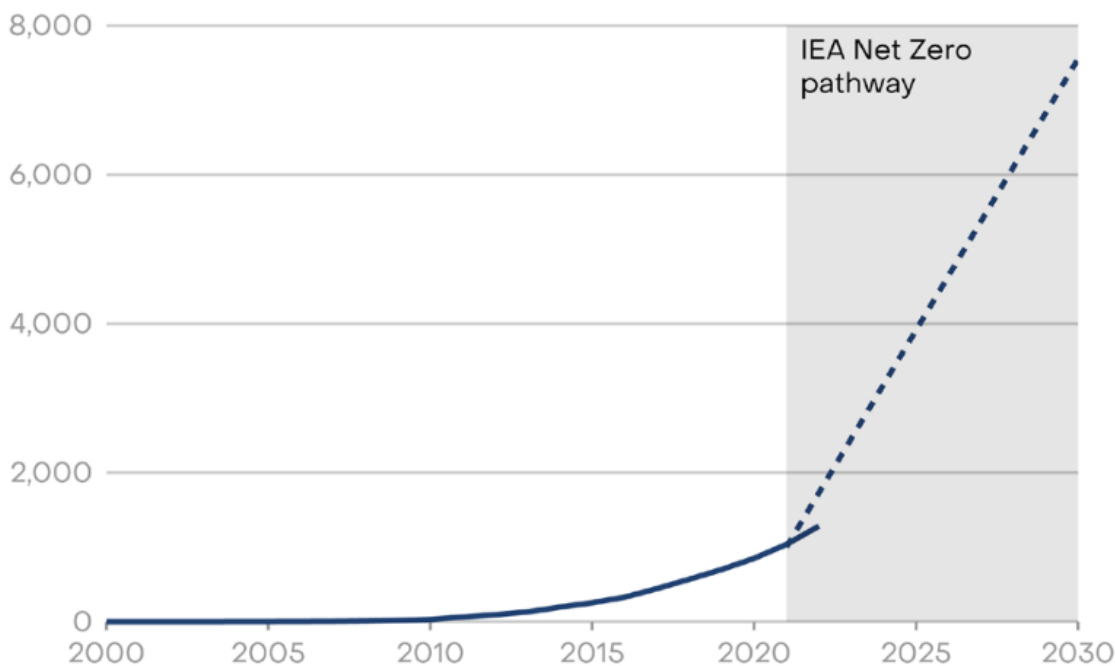
Među svim dostupnim obnovljivim izvorima energije, solarna energija se smatra izvorom koji najviše obećava. Besplatan je, siguran, bez zagađenja, dostupan je širom svijeta i trajće zauvijek. Sunce stvara svoju energiju kroz termonuklearni proces kojim se pretvara oko 650.000.000 tona vodonika u helijum svake sekunde. Proces stvara toplotu i elektromagnetno zračenje. Toplota ostaje na suncu i ključna je u održavanju termonuklearne reakcije. Elektromagnetno zračenje (uključujući vidljivu svjetlost, infracrvenu svjetlost i ultraljubičasto zračenje) struji u svemir u svim pravcima. Samo veoma mali dio ukupne proizvedene radijacije stiže do Zemlje.

Globalna proizvodnja solarne energije porasla za 24% (+245 TWh), sa 1.039 TWh u 2021. na 1.284 TWh u 2022. Ovo je bila 18. godina za redom da solarna energija je bila najbrže rastući izvor električne energije po procentualnoj promjeni iz godine u godinu.

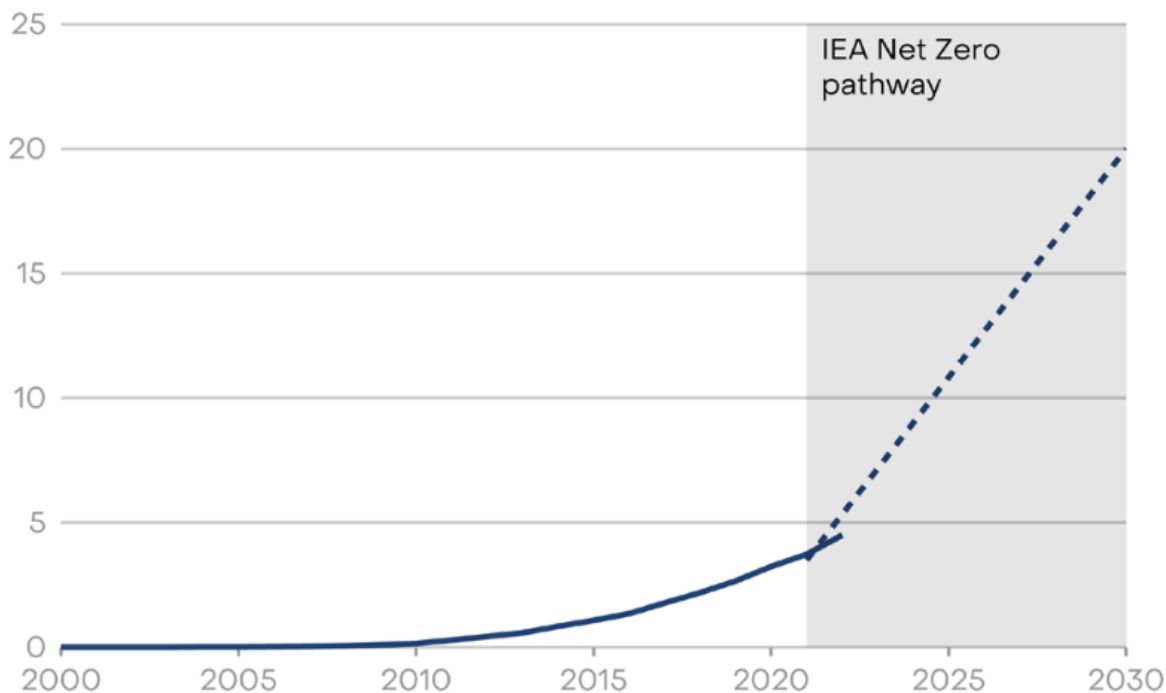


Slika 1.3 –rast proizvodnje solarne električne energije u TWh i procentima (izvor EMBER, Global Electricity Review 2023, referenca 45)

Prema scenariju neto nulte CO₂ emisije Internacionalne agencije za energiju (IEA-International Energy Agency), za ograničavanje globalnog zagrijavanja do 1.5C, solarna proizvodnja električne energije treba da poraste na 7.552 TWh godišnje do 2030. godine. Ovo zahtijeva rast proizvodnje solarne energije za 25% godišnje, a udio solarne u globalnoj proizvodnji električne energije dostigao bi 20% u 2030. godini, u odnosu na trenutnih 4,5% postignutih u 2022. godini. Da bi postigle ovaj rast, zemlje moraju stalno da povećavaju svoje godišnje ciljeve proizvodnje solarne energije. Na primjer, 2023. godine ovo bi zahtijevalo 318 TWh dodatne solarne proizvodnje solarne električne energije, dok bi 2030. uvećanje iznosilo najmanje 1.500 TWh.

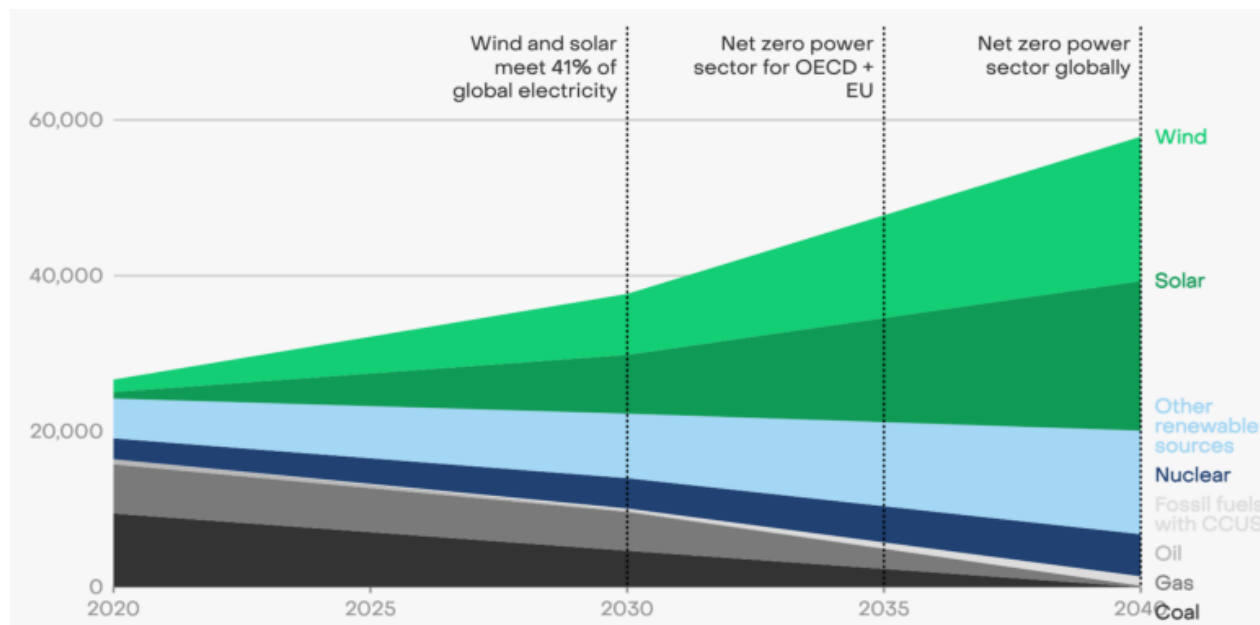


Slika 1.4 – projekcija rasta proizvodnje solarne električne energije u TWh prema IEA (izvor EMBER, Global Electricity Review 2023, referenca 45)



Slika 1.5 – projekcija rasta udjela proizvodnje solarne električne energije u % prema IEA (izvor EMBER, Global Electricity Review 2023, referenca 45)

Prema IEA Net zero scenariju, do 2040. energetske sektor treba da bude na nivou neto nula CO₂ emisije. Da bi se postigao ovaj cilj proizvodnja struje iz uglja mora biti ukinuta globalno, a gas će obezbediti samo 0,3% ukupne električne energije.



Slika 1.6 - IEA Net zero scenarij (izvor EMBER, Global Electricity Review 2023, referenca 45)

Prema ovom scenariju, udio proizvodnje solarne električne energije iznosiće čak oko 40%.

3. FOTONAPONSKA TEHNOLOGIJA ZA PROIZVODNJU ELEKTRIČNE ENERGIJE

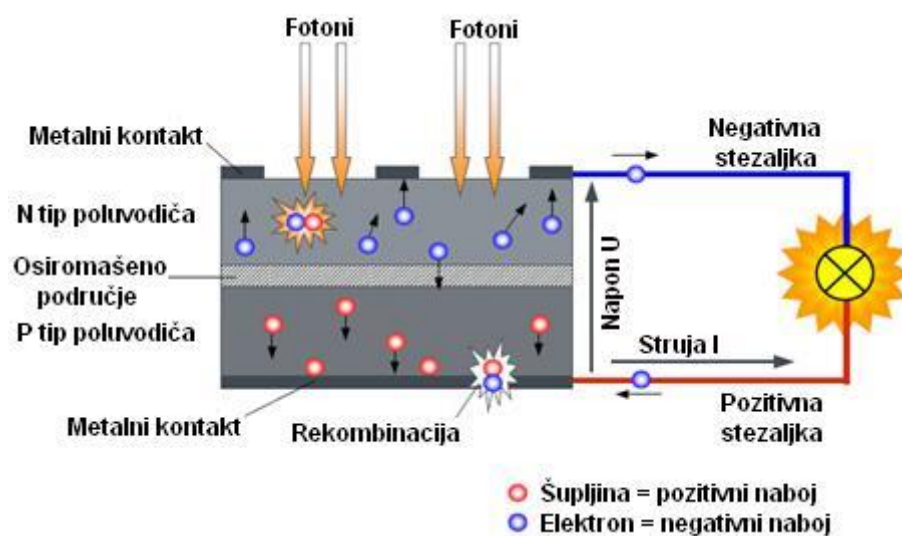
U osnovi solarna energija se može pretvoriti u električnu na dva načina:

- Indirektno korišćenjem ogledala radi stvaranja koncentrisane solarne toplotne energije, koja se dalje pretvara u električnu korišćenjem klasičnog sistema sa parnim turbinama.
- Direktno, korišćenjem fotonaponskih sistema (PV-photovoltaic), koji pretvaraju sunčevu svjetlost u jednosmjernu električnu energiju (DC) koristeći foto naponski efekat.

PV tehnologija je danas široko prihvaćena, zahvaljujući aktivnostima istraživanja i razvoja za poboljšanje performansi solarnih ćelija i smanjenje troškova.

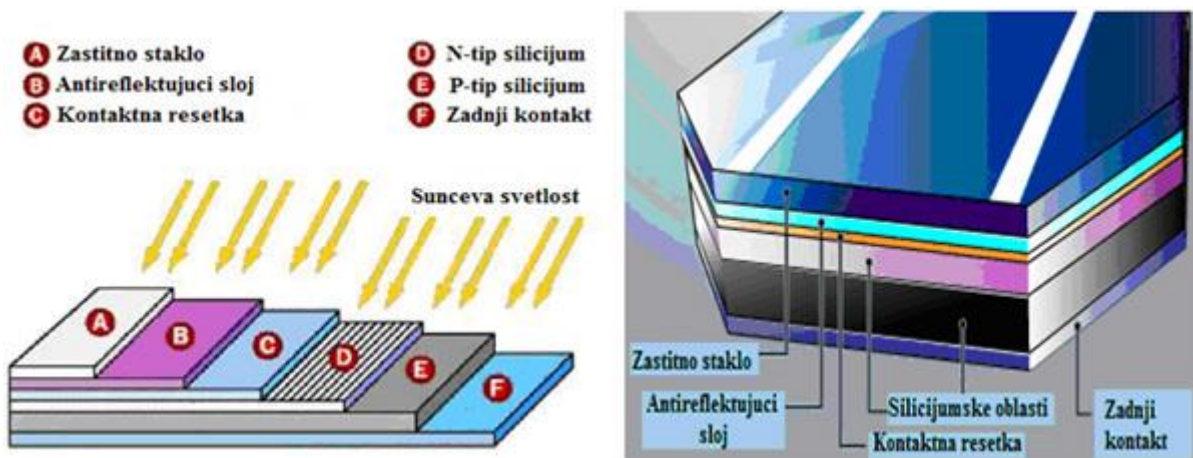
Solarni paneli su formirani od međusobno povezanih fotonaponskih ćelija(solarnih ćelija).

Solarne ćelije su poluprovodničke strukture koje konvertuju sunčevo zračenje, u širokom talasnom opsegu, u električnu energiju. Solarna ćelija je sastavljena od većeg broja dioda i pn spojeva. Foto naponska konverzija generiše par elektron-šupljina pod dejstvom upadne svjetlosti, energija fotona je dovoljna za prelazak elektrona iz valentne zone u provodnu.



Slika 1.7 – fotoelektrična konverzija u PN spoju
(izvor, DI EE, Predavanja 2, 2013, Sunčeva energija i njeno pretvaranje u električnu energiju, referenca 53)

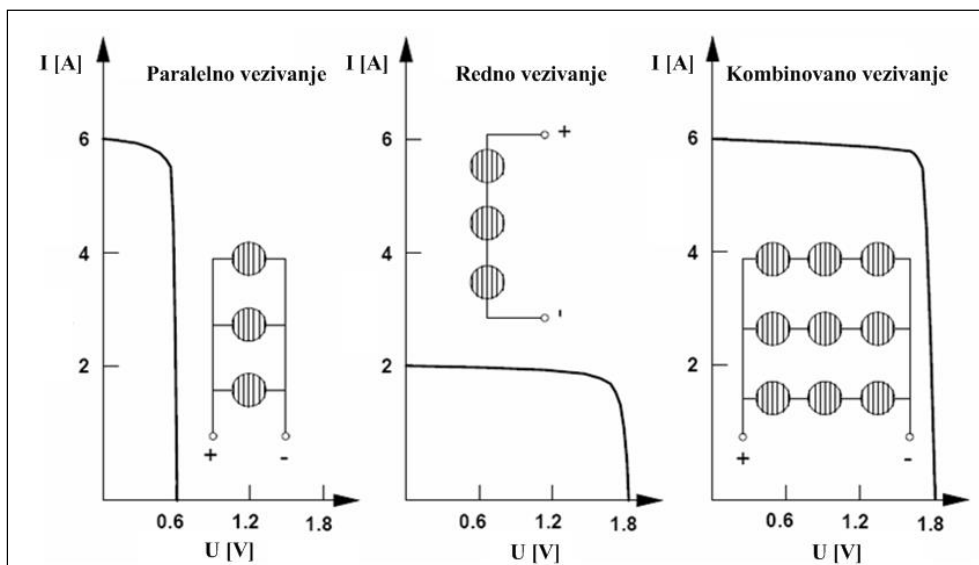
Poprečni presjek jedne tipične solarne ćelije, prikazan je na slici 3. (uzeta je silicijumska **solarna ćelija** za primjer). Prvi sloj je zaštitno staklo tj. SiO_2 , koje štiti ćeliju od spoljašnjih uticaja. Ispod je anti reflektujući koji smanjuje refleksiju svjetlosti i obezbeđuje da što više energije dospije do poluprovodnika (povećava se iskorišćenje ćelije). Zatim se nalazi sistem transparentnih elektroda, TCO. On kontaktira poluprovodnik sa pn spojem u kome se vrši zahvatanje fotona Sunčeve svjetlosti. Sa donje strane je metalizacija-zadnji kontakt.



Slika 1.8 Poprečni presjek solarne ćelije
(izvor, DI EE, Predavanja 2, 2013, Sunčeva energija i njeno pretvaranje u električnu energiju, referenca 53)

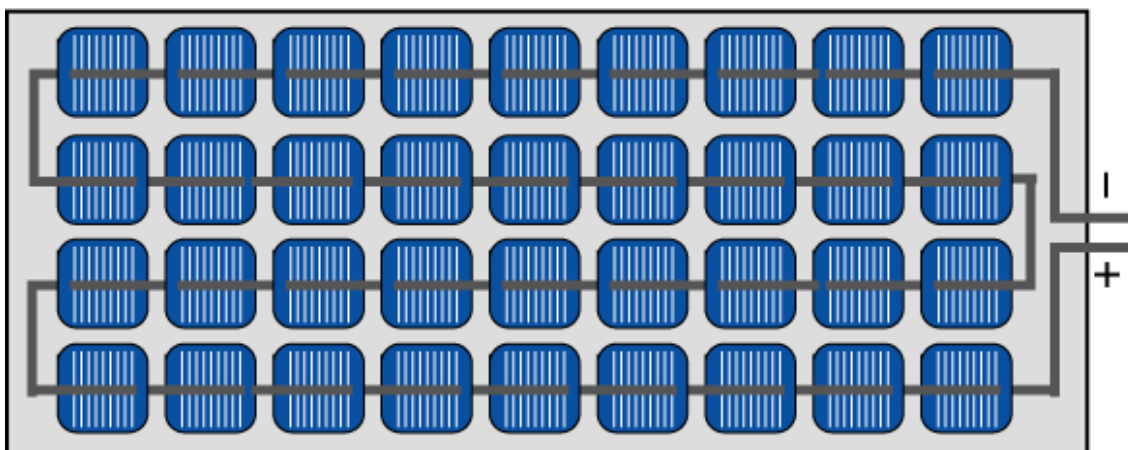
Maksimalni izlazni napon **individualne solarne ćelije** iznosi oko 600-700mV.

Solarne ćelije se mogu povezati redno, paralelno, ili kombinovano, zavisno od projektovane snage ćelije. Napon koji se dobija na izlazu zavisi od tipa ćelije i može biti 0.3-0.7V, uz gustinu struje od oko nekoliko desetina mA/cm^2 zavisno od snage sunčevog zračenja, ali i o spektru zračenja.

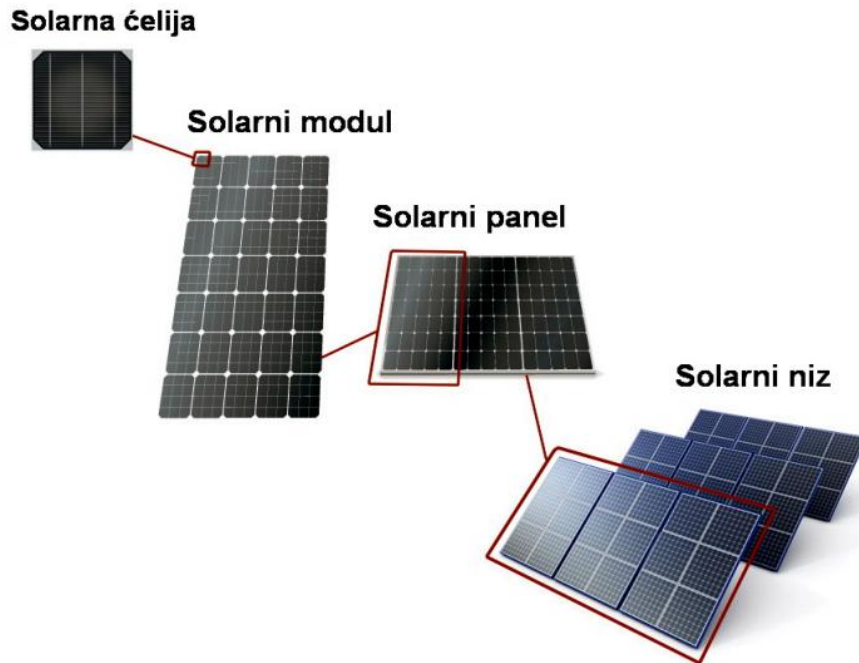


Slika 1.9 – načini vezivanja fotonaponskih ćelija
(izvor, DI EE, Predavanja 2, 2013, Sunčeva energija i njeno pretvaranje u električnu energiju, referenca 53)

U praksi najčešće se oko 36 ćelija serijski povezuje stvarajući module nominalnog napona od 12V, kao na slici ispod.



Slika 1.10 – tipičan način povezivanja fotonaponskih ćelija
(izvor, Abdulmajid Murad, „Design and Implementation of Solar Tracking System for Photovoltaic Cells“ referenca 54)



Slika 1.11 Solarna ćelija, modul, panel i niz
(izvor, Radivoje Đurić, "Solarna energija i fotonaponski sistemi", ETF Beograd, 2020. referenca 55)

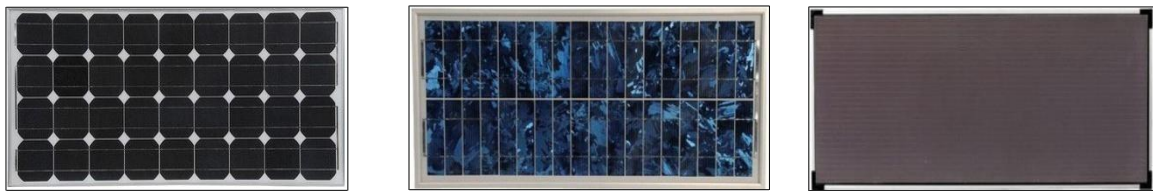
Zavisno od materijala od kog su izrađene solarne ćelije, postoji 7 vrsta solarnih panela:

- Monokristalni solarni paneli (Mono-SI)
- Polikristalni solarni paneli (Poly-SI),
- Amorfni solarni paneli (A-SI)
- Solarni Paneli sa tankim filmom (Thin-Film - TFSC)
- Bio Hibridni Solarni Paneli
- Kadmijum Telurid Solarni Paneli (CdTe)
- Koncentrisani PV solarni Paneli (CVP and HCVP).

Efikasnost i cijena foto naponskih ćelija, odnosno solarnih panela u velikoj mjeri zavise od izabranog materijala.

Silicijumske solarne ćelije su komercijalno najzastupljenije, dijele se prema kristalografskoj strukturi na: monokristalne, polikristalne i amorfne. Monokristalne solarne ćelije su najskuplje ali zato je njihov koeficijent efikasnosti 17% do 22%, polikristalne imaju efikasnost od 15%

do 17% i predstavljaju alternativu monokristalnim, dok amorfne solarne ćelije imaju najnižu efikasnost svega 8%-10% ali zato je njihova cijena najmanja.



(a)

(b)

(c)

Slika-1.12 (a) Monokristalni solarni panel, (b) Polikristalni solarni panel, (c) Amorfni solarni panel.

(izvor - Benzekri Azzouz, "FPGA-Based Intelligent Dual-Axis Solar Tracking Control System" referenca 39)

Kada se integrišu više panela dobija se **polje PV modula** ili **solarna elektrana**, slika 3.7.



Slika 1.13 –Solarna fotonaponska elektrana Golmud u Kini

(Izvor–<https://greendealfow.com/the-biggest-operational-solar-projects-worldwide>
referenca 51)

Danas se instaliraju solarne elektrane velikih snaga od 1MW pa do više GW. Solarni park Golmud u Kini je najveća solarna foto naponska elektrana na svijetu sa trenutno instaliranim

solarnim kapacitetom od 2,8 GW, sa 7 miliona solarnih panela. Planirano je da ovaj solarni park dostigne snagu od 16 GW u sledećih 5-6 godina.

4. EFIKASNOST PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE IZ FOTONAPONSKIH SOLARNIH PANELA

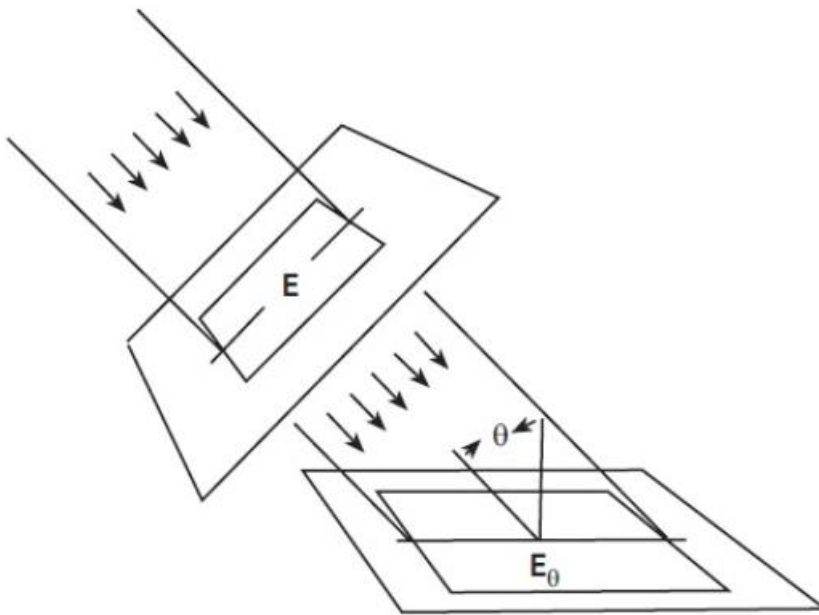
Uprkos prednostima, solarna PV energija je trenutno još uvijek daleko od zamjene tradicionalnih izvora na tržištu. Da bi se taj cilj efikasnije postigao potrebno je maksimizirati izlaznu snagu fotonaponskih sistema. Potrebne su naprednije tehnologije proizvođača za poboljšanje efikasnosti fotonaponskih materijala, kao i poboljšanje dizajna sistema i konstrukcije modula da bi se proizvodnja solarna fotonaponska energija učinila efikasnijom i tako postala pouzdan izbor za kupce.

Postoji nekoliko faktora koji utiču na efikasnost solarnog panela. Dva glavna su:

- efikasnost fotonaponskih ćelija,
- intenzitet sunčevih zraka primljenih na površinu solarnog panela.

Iako postoji kontinuirano poboljšanje u fotonaponskim materijalima kako bi se poboljšala efikasnost fotonaponskih ćelija, trenutna tehnologija pruža fotonaponske ćelije sa nivoom efikasnosti do 23,5% (neke laboratorije su dostigle efikasnost veću od 40%, ali još uvijek nisu komercijalno dostupne). Stoga, da bismo smanjili cijenu po proizvedenom kWh energije, moramo se osloniti na dimenzije panela i/ili intenzitet zračenja. Povećanje površine solarnih panela nije održivo rješenje. To povećava troškove ulaganja i zahtijeva veće površine terena. Međutim, izvodljivije i ekonomičnije rješenje je da se maksimizira ekstrakcija energije iz panela korišćenjem polja ćelija u njihovom punom potencijalu. Ovo se može postići kontinuiranim izlaganjem površine panela okomito u odnosu na sunčeve zrake. Ova strategija se može ostvariti pomoću uređaja za praćenje sunca, na koji je ugrađen solarni panel tako da prati kretanje sunca po nebu (imitirajući suncokret), odnosno tako što održavaju PV solarne panele poravnate pod

odgovarajućim uglom sa sunčevim zracima u bilo kom trenutku, kako bi maksimalni iskoristila energija sunčeve svjetlosti shodno Lambertovom zakonu.



Slika 1.14 – Lambertov zakon (izvor - D.P.Tripathy, referenca 52)

Lambertov kosinusni zakon, glasi:

Osvjetljenost neke površine usmjerenom svjetlošću proporcionalan je kosinusu ugla pod kojim svjetlost pada na površinu:

$$E = E_0 \cos \theta \quad (1)$$

gdje je: E_0 - osvjetljenje ravni upravne na zrake svjetlosti, a θ - upadni ugao zraka svjetlosti.

Radi maksimalne efikasnosti proizvodnje električne energije iz fotonaponskih solarnih panela, potrebno je praćenje sunca po azimutu na dnevnom nivou, ali i po nagibu putanje sunca na nebu koji se mijenja tokom godine, zbog promjene položaja zemlje u odnosu na sunce, što se može postići sistemom za praćenje položaja sunca po dvije ose, koji je prezentovan u ovom radu.

GLAVA 2.

PREGLED LITERATURE I TIPOVI SISTEMA ZA PRAĆENJE SUNCA

1. PREGLED LITERATURE

Prije nego što se upustimo u praktičnu oblast ove teze, biće predstavljen pregled literature sa ciljem da se pruži pregled aktivnih sistema za praćenje sunca koji koriste različite tipove računarskih platformi i strategija upravljanja.

Tokom proteklih decenija, veliki broj radova je prijavljen na seminarima i literaturi koji pokazuju sve veći interes za dizajn i implementaciju sistema za praćenje sunca kako bi se povećale njihove performanse i efikasnost za prikupljanje maksimalne energije sa solarnih panela. Nekoliko kontrolnih strategija, kao i različite računarske i upravljačke platforme su korišćene i testirane da bi se riješio ovaj problem. Ove strategije se mogu kategorisati u tri glavne klase: otvorene petlje, zatvorene petlje i hibridne sisteme za kontrolu praćenja sunca.

(i) Strategije upravljanja u otvorenom krugu se oslanjaju na fiksni kontrolni algoritam.

Ovi kontroleri koriste matematičke formule sa podacima o cijeloj jednogodišnjoj putanji sunca da izračunaju kretanje sunca na nebu i ne moraju da osjete sunčevu svjetlost da bi pozicionirali solarni panel. Ovi podaci su obično trenutno vrijeme, dan, mjesec i godina određene geografske lokacije. Algoritmi ne koriste povratne informacije od kontrolisanog sistema da bi se utvrdilo da li je postigao ili ne željeni cilj.

(ii) Zatvoreni sistemi za praćenje sunca zasnovani su na principima povratne sprege. Obično koriste svjetlosne senzore kao što su otpornici zavisni od svjetlosti (LDR) da bi odredili položaj sunca na nebu u odnosu na površinu solarnog panela. Oni su pouzdaniji od kontrolera tipa otvorene petlje. Korišćenje povratnih informacija čini njihov sistemski odgovor manje osjetljivim na spoljašnje smetnje.

(iii) Hibridna implementacija, strategija koja kombinuje i otvorenu i zatvorenu kontrolu, takođe je objavljena u literaturi.

Postoji veliki izbor tehnika koje se koriste za implementaciju kontrolera tipa zatvorene petlje. Oni se kreću od zakona On-Off kontrole do naprednijih tehnika zasnovanih na kontrolisanoj fazi logike uključujući klasične kontrolere: Bang-Bang kontroler, proporcionalno-integralni (PI), proporcionalno-izvodni (PD) i proporcionalno-integralni-derivativni (PID).

U literaturi je takođe objavljeno mnoštvo fizičkih implementacija strategija praćenja sunca. Slično drugim industrijskim aplikacijama, ove implementacije su prošle kroz nekoliko faza evolucije. Evoluirali su od ranih mehaničkih dizajna do upotrebe diskretnih analognih i digitalnih standardnih integrisanih kola.

1.1 STRATEGIJE PRAĆENJA OTVORENE PETLJE

Kontroler tipa otvorene petlje izračunava svoj ulaz u sistem koristeći samo trenutno stanje i algoritam sistema da bi utvrdio da li je njegov ulaz postigao željeni cilj. Ovi tipovi kontrolera zasnovani na matematičkim algoritmima/programima obezbeđuju unaprijed definisane putanje za sistem praćenja. Ove putanje se mogu tačno odrediti jer se relativni položaj Sunca može precizno izračunati u bilo kom trenutku za bilo koju lokaciju na Zemlji [6], [8] [9].

Godine 1975. McFee [10] je predstavio prvi automatski solarni sistem za praćenje. Algoritam koji se koristi za kontrolu uređaja za praćenje izračunava distribuciju gustine fluksa i ukupnu primljenu snagu u sistemu solarne energije. Od tada su sprovedeni brojni radovi korišćenjem upravljanja u otvorenom krugu u projektovanju i implementaciji algoritama zasnovanih na astronomskim formulama. Korišćeni su za pogon elektromehaničkih aktuatora za upravljanje jedno i dvoosnim sistemima za praćenje sunca.

Semma i saradnici [11] bili su među prvima koji su koristili mikroprocesor kao zamjenu za čvrsto ožičenu logiku koja se koristila u ranijim uređajima za praćenje sunca za kontrolu kretanja dvoosnog sistema za praćenje sunca. Kontroler je zasnovan na pristupu aktivnog praćenja sunca i

omogućava panelu da prati sunce u roku od pet lučnih minuta. Ovo je rezultiralo značajnim poboljšanjima u pouzdanosti i povećalo funkcionalne mogućnosti prethodnih osnovnih sistema za praćenje.

U [12], autori su izveli opštu formulu tvrdeći da ona obuhvata sve moguće metode praćenja jedne ose. Da bi izveli formulu, koristili su tehniku transformacije koordinata. Ovo se sastoji u transformaciji vektora položaja Sunca iz okvira u centru zemlje u okvir zemaljske površine, a zatim u okvir centra kolektora. Čineći to, mogli bi da ga razdvoje na solarni azimut i uglove nagiba u odnosu na solarni kolektor, što olakšava kontroleru da odredi koliko treba da podesi solarni kolektor da bi minimizirao neusklađenost.

Abdallah [13] je 2004. godine dizajnirao i implementirao četiri elektromehanička sistema za solarno praćenje otvorene petlje: dvoosni, jednoosni vertikalni, jednoosni istok-zapad i jednoosni sjever-jug kako bi se istražili efekti strujnih, naponskih i energetske karakteristika ravnog fotonaponskog sistema u poređenju sa fiksnim sa nagibom od 32° prema jugu. Kretanje tragača je kontrolisano algoritmom u kome je unaprijed izračunata pozicija programirana u programabilni logički kontroler (PLC). Autor je tvrdio da su sistemi za praćenje povećali električne snage kolektora za 43,87, 37,53, 34,43 i 15,69% za dvoosnu, jednu vertikalnu osu, jednoosnu istok-zapad i jednoosnu sjever-jug u poređenju sa fiksnom.

U radu [14] Grena opisuje algoritam za dobijanje visoko preciznih vrijednosti položaja Sunca. Uzimajući razlomak univerzalnog vremena (UT), datum i razliku između UT i zemaljskog vremena (TT) (dužina, geografska širina, pritisak i temperatura) kao ulazne podatke, algoritam je izračunao ugaonu poziciju zemlje u odnosu na sunce u ravan ekliptike i zatim koristio ovaj ugao i ugao nagiba Zemljine rotacione ose za izračunavanje položaja Sunca.

U referenci [15], autori su tvrdili da strategije praćenja otvorene petlje koje se koriste za izračunavanje pravca solarnog vektora treba da budu i tačne i računski jednostavne kako bi se

minimizirala cijena sistema za praćenja. Oni su razvili algoritam za predviđanje solarnog vektora na osnovu znanja o vremenu i lokaciji.

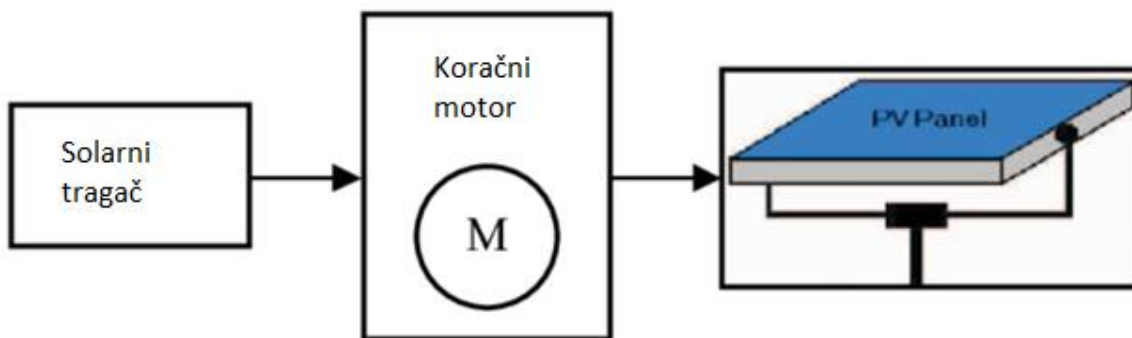
Reda i saradnici [16] su 2004. predstavili jednostavnu proceduru korak po korak za implementaciju algoritma solarne pozicije. U ovom algoritmu, solarni zenit, azimut i upadni uglovi su izvedeni korišćenjem eklektičke geografske dužine i geografske širine za srednju ravnodnevicu podataka zajedno sa drugim informacijama. Oni su izvijestili da se solarni zenit i azimut uglovi mogu izračunati sa nesigurnošću od $\pm 0,0003^\circ$.

U [17] razvijen je kontrolni algoritam otvorene petlje za kontrolu sistema za praćenja sunca sa dvije ose. Algoritam implementiran u LOGO-24 RC programabilni logički kontroler (PLC) zasniva se na matematičkoj definiciji položaja površine. Ovo posljednje je definisano sa dva ugla: nagib površine i ugao azimuta površine. Autori su koristili dva motora za praćenje, jedan za zglobov koji se rotira oko horizontalne ose sjever-jug da bi podesio nagib površine, a drugi motor za rotaciju kolektora oko vertikalne ose kako bi kontrolisao ugao azimuta površine. Razvijen je kompjuterski softver za izračunavanje optimalnih položaja površine za praćenje tokom dnevnih sati koji su podijeljeni u četiri identična vremenska intervala. Za svaki interval, brzina solarne energije i motora se definiše i programira u PLC-u. Autori su zaključili da je dobitak značajan sa povećanjem dnevne kolekcije od oko $41,34^\circ$ u poređenju sa fiksnom površinom.

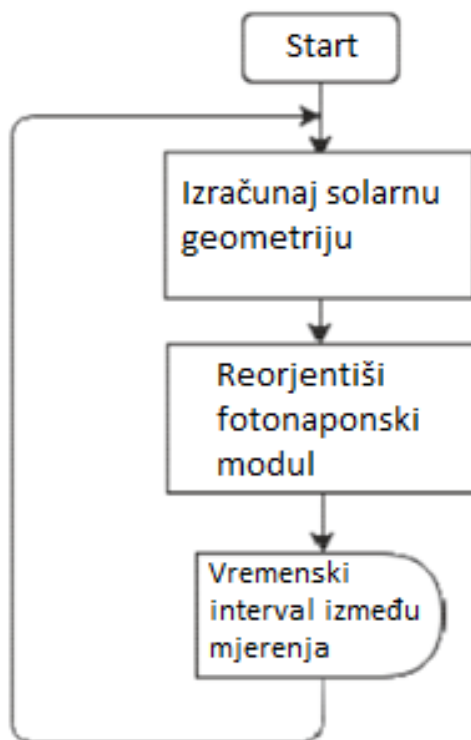
Godine 2010. Duarte i saradnici [18] su na međunarodnoj konferenciji o obnovljivim izvorima energije predstavili dizajn dvoosnog solarnog tragača sa mikrokontrolerom koji koristi solarne karte. Koristili su solarne karte sa sunčevim koordinatama koje zavise od vremena i geografske lokacije.

Mousazadeh [19] i Lee [7] su pregledali različite tipove sistema za praćenje sunca. Oni su se fokusirali na potencijalnu dobit energije dobijenu primjenom i otvorenih i zatvorenih algoritama. Oni su ispitali neke od najznačajnijih prijedloga oba tipa i razgovarali o njihovim prednostima i nedostacima. Oni su uporedili rezultate sistema za praćenje sa kolegama sa fiksnom pozicijom.

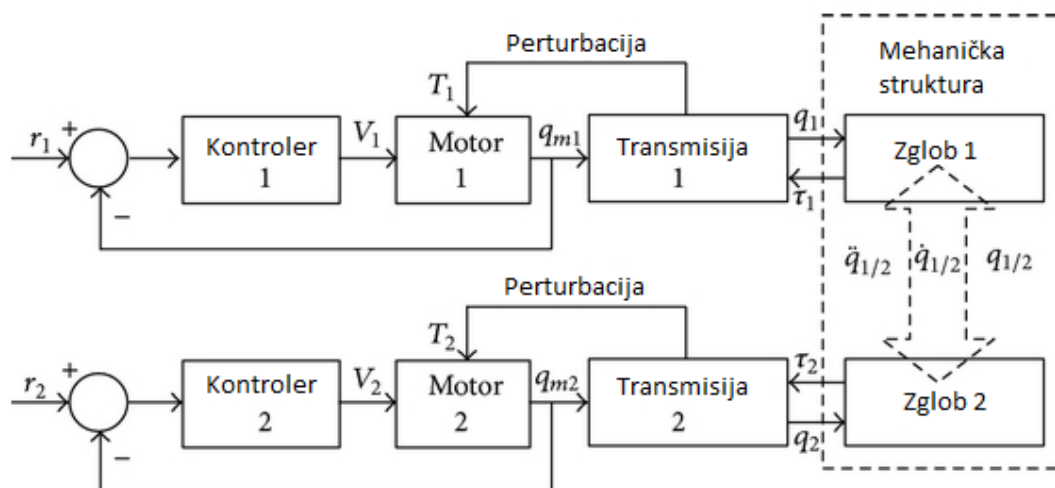
Zaključili su da solarni sistemi koji prate promijene putanje Sunca tokom dana prikupljaju daleko veću količinu sunčeve energije. Takođe su izvijestili da je utvrđeno da su najefikasniji i najpopularniji uređaji za praćenje sunca u obliku polarnih ose i tipova azimuta/elevacije.



Slika 2.1 – pojednostavljena šema jednoosnog tragača sa otvorenom petljom (izvor: D. C. Huynh, Tuong M. Nguyen, „Comparison between open- and closed-loop trackers of a solar photovoltaic system”, referenca 60)



Slika 2.2 – primjer algoritma otvorene petlje (izvor: Aurélio Gouvêa Melo, Delly Oliveira Filho, Maury Martins de Oliveira Júnior, Sérgio Zolnier, Aristides Ribeiro, “Development of a closed and open loop solar tracker technology”, referenca 61)



V – ulazni napon , T – obrtni momenat, q – ugaona pozicija

Slika 2.3 – primjer blok šeme dvoosnog tragača sa otvorenom petljom (izvor: Cătălin Alexandru, “A Novel Open-Loop Tracking Strategy for Photovoltaic Systems”, referenca 62)

1.2 STRATEGIJE PRAĆENJA ZATVORENE PETLJE

Zatvoreni tipovi sistema za praćenje sunca zasnovani su na principima upravljanja povratnom spregom [7]. Oni koriste koncept otvorene petlje za svoju putanju unaprijed i povratnu(e) petlju(e) između izlaza i ulaza sistema. U zatvorenom sistemu za praćenje sunca, senzori svjetlosti i slike se generalno koriste za razlikovanje položaja sunca i indukovanih signala proporcionalno intenzitetu sunčeve svjetlosti koji se koristi kao ulazi u kontroler. Ovi podaci se obrađuju od strane kontrolera da bi se automatski postigao i održao željeni izlazni uslov.

Roth i saradnici [20] opisali su dizajn i konstrukciju elektromehaničkog automatskog sistema za praćenje sunca. Koristili su piheliometar za mjerenje direktnog sunčevog zračenja. Četvorkvadrantni foto detektor za detekciju položaja sunca i dva mala DC motora za pomjeranja platforme instrumenta kontrolišu Z80 mikroprocesor kako bi se slika sunca zadržala u centru četvorkvadrantnih foto detektora. Predstavljeni tragač se može prilagoditi za rad sa panelima solarnih ćelija ili koncentradorima. Zanimljivost ovog sistema je u oblačnim uslovima, kada se sunce ne vidi; računarski program izračunava položaj sunca i preuzima kontrolu nad kretanjem, sve

dok detektor ponovo ne osjeti sunce. Isti autori su u [21] opisali poboljšanu verziju svog uređaja za praćenje sunca. Iako su zadržali istu mehaničku osnovu donijeli su neke novine. DC motori su zamijenjeni koračnim(step) motorima, četvorokvadrantni senzor zamijenjen sa dva senzora, a računarska platforma Z80 zamijenjena je mikrokontrolerom povezanim sa računarom. Korišćena su dva senzora, jedan za informacije o položaju sunca, a drugi za mjerenje intenziteta sunčeve svjetlosti. Tragač može da radi u dva režima. U režimu rada sa taktom, položaj sunca se izračunava na osnovu informacija o datumu i vremenu njegovog sata. Greške u položaju svjetlosti se mjere tokom dana i čuvaju za kasniju analizu. Ovi podaci će se koristiti sljedećeg dana za izračunavanje preciznijih položaja sunca. U aktivnom ili sunčanom režimu rada, uređaj za praćenje koristi podatke monitora sunca za kontrolu usmjeravanja.

U [22] Kalogirou je opisao dizajn i konstrukciju jednoosnog sistema za praćenje sunca gdje se položaj i status sunca detektuju pomoću tri LDR-a. Jedan LDR se koristi za detekciju fokusnog stanja kolektora; drugi je odgovoran za otkrivanje bilo kakvog pokrivača oblaka, dok se treći koristi za razlikovanje dnevne svjetlosti. Kontroler je konstruisan sa standardnim analognim i digitalnim integrisanim kolima. Aktuator koji se koristi u tragačima za usmjeravanje kolektora ka suncu je DC motor male snage sa reduktorom brzine. Autor je naveo da je odstupanje od idealnog položaja $0,2^\circ$ i $0,05^\circ$ sa sunčevim zračenjem od 100 i 600 W/m² respektivno.

Cheng D. Lee razvio je sistem za praćenje sunca zasnovan na slikama [23].

Sistem se sastoji od samodizajniranog reflektirajućeg Cassegrain teleskopa, veb kamere i ugrađenog algoritma za obradu slike koji pokazuje ka suncu. centralne koordinate sunčevih slika se izračunavaju, a zatim šalju na solarni tragač da prati sunce. Autor tvrdi da je navedeni sistem postigao tačnost praćenja od $0,04^\circ$.

U [24] Sefa i saradnici su dizajnirali i implementirali PC-bazirani jednoosni sistem za praćenje sunca. Podaci sa dva senzora svjetlosti se prikupljaju od strane jedinice za prikupljanje podataka zasnovanih na mikrokontroleru i serijski se prenose na PC za obradu i skladištenje. Softver razvijen

na jeziku C obrađuje prikupljene podatke i daje uputstva DC motoru da prati sunce tokom dana. Pored toga, na ekranu računara su prikazani struja, napon i solarni panel.

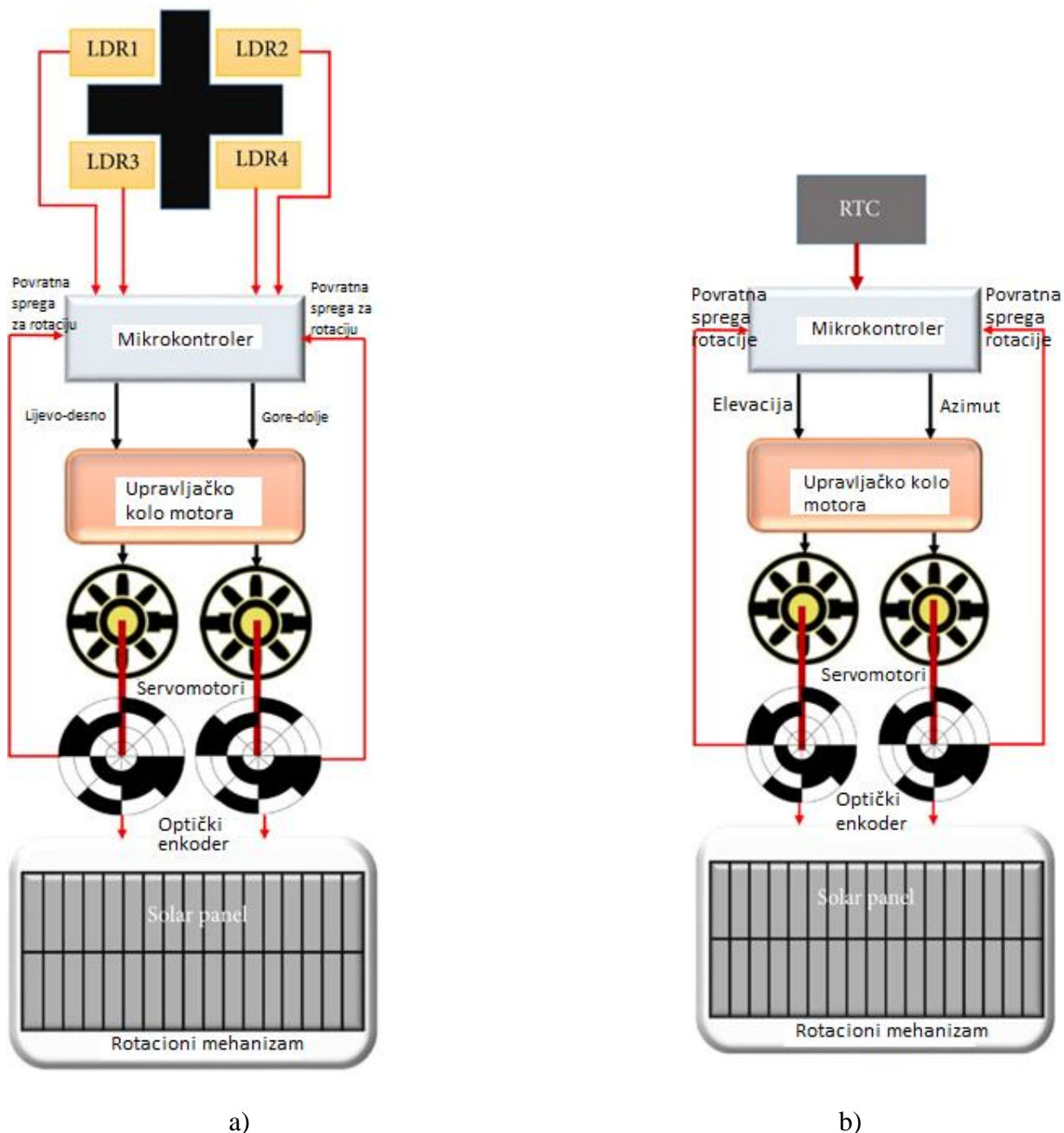
U referenci [25], A. Konar i saradnici su koristili mikroprocesor za automatsko pozicioniranje optimalno nagnutog fotonaponskog ravnog solarnog panela za prikupljanje maksimalnog sunčevog zračenja. Ugao azimuta optimalno nagnutog panela se kontroliše pomoću jednog detektora infracrvene svjetlosti. Korišćena tehnika je slična principu „poremeti i posmatraj“ da bi se odredilo maksimalno zračenje. Korišćenje šeme praćenja koraka umesto kontinuiranog praćenja drži motor u praznom hodu većinu vremena, što rezultira uštedom energije. Podešavanje ugla nagiba se vrši na mjesečnom nivou. Predložili su upotrebu dvodimenzionalnog tragača za automatsko praćenje. Vjerujemo da upotreba drugog detektora svjetlosti ne bi samo pojednostavila dizajn, već bi uštedjela energiju i starenje motora zbog kontinuirane rotacije u oba smjera motora tražeći optimalnu poziciju solarnog kolektora.

Još jedan automatski uređaj za praćenje sunca kontrolisan mikroprocesorom je objavljen u [26]. Dva svjetlosna senzora raspoređena u pravcu istok-zapad koriste se za razlikovanje položaja sunca u odnosu na solarni panel. DC motor je spojen zupčanikom da rotira panel u pravcu istok-zapad kako bi panel bio okomit na vektor sunca. Za kolektor su pričvršćena dva prekidača koji se koriste za ograničavanje pomjeranja panela izvan njegovih maksimalnih ugaonih položaja u pravcu istoka i zapada.

U [27] Sakena i saradnici su dizajnirali i proizveli kontroler zasnovan na mikroprocesoru za dvoosni tragač sunca koji prati Sunce u azimutu i visinskom pravcu koristeći dva koračna motora. Sistem radi u otvorenom i zatvorenom režimu. U režimu zatvorene petlje senzorska kartica daje signale kontroleru. U režimu otvorene petlje, uređaj za praćenje se dovodi u unaprijed izračunatu poziciju u zavisnosti od mjeseca i doba dana.

U principu, sistemi kontrole otvorene petlje su jeftiniji jer ne zahtijevaju nikakva sredstva za prikupljanje povratnih informacija kao što su senzori svjetlosti. Međutim, oni predstavljaju veliki problem jer nemaju mogućnosti ispravljanja grešaka. Pored toga, dati algoritam važi samo za određenu lokaciju. Sistemi zatvorene petlje koriste senzore položaja za pronalaženje sunca. Oni su

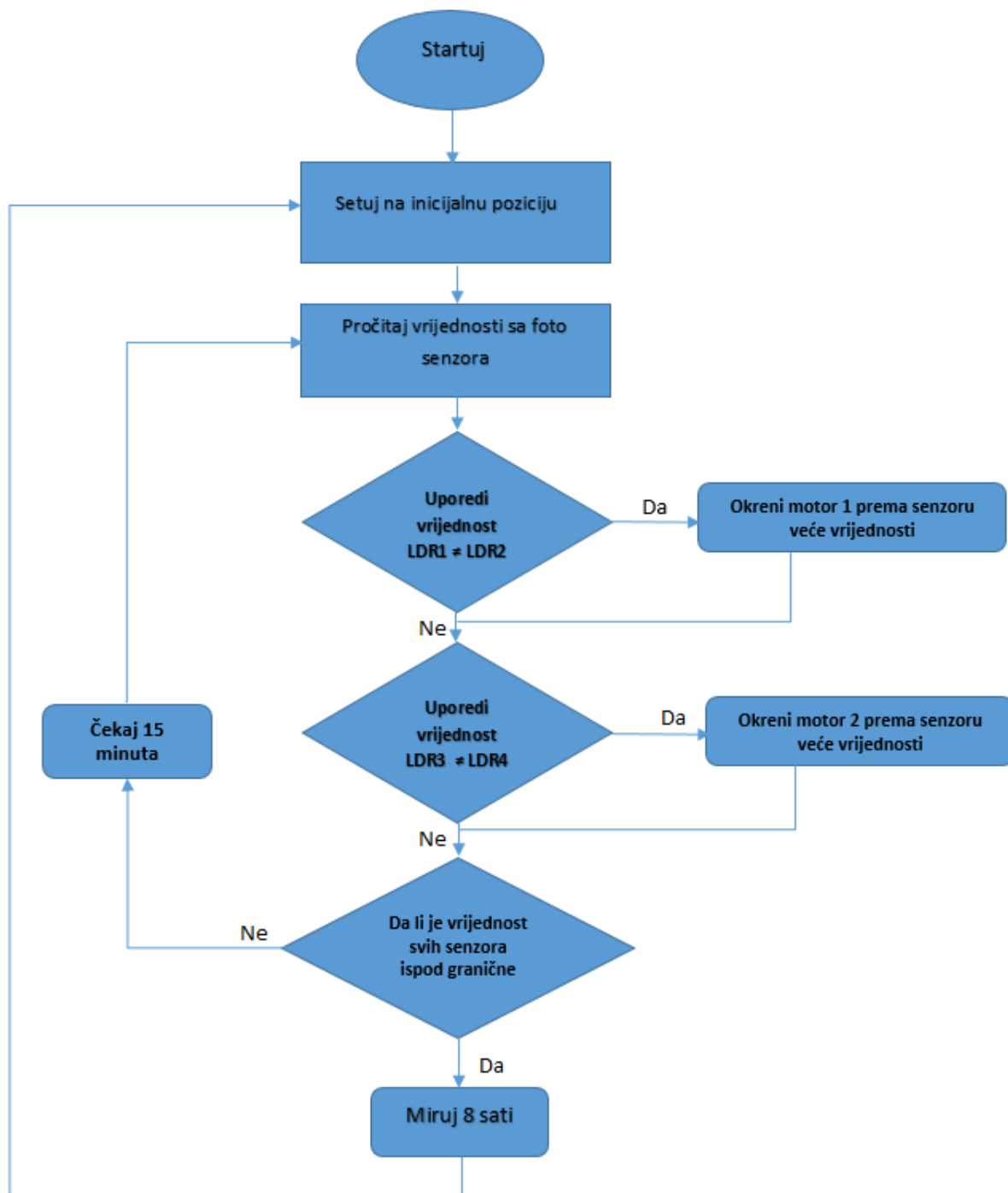
pouzdaniji od sistema otvorene petlje. Međutim, možda nemaju mogućnosti da prate sunce u oblačnim danima. Hibridni sistemi upravljanja koji se sastoje od kombinacije strategija otvorene i zatvorene petlje su takođe opisani u literaturi [21], [28]. U takvim sistemima, strategije praćenja zatvorene petlje se koriste za provjeru i kalibraciju astronomskog kontrolnog sistema.



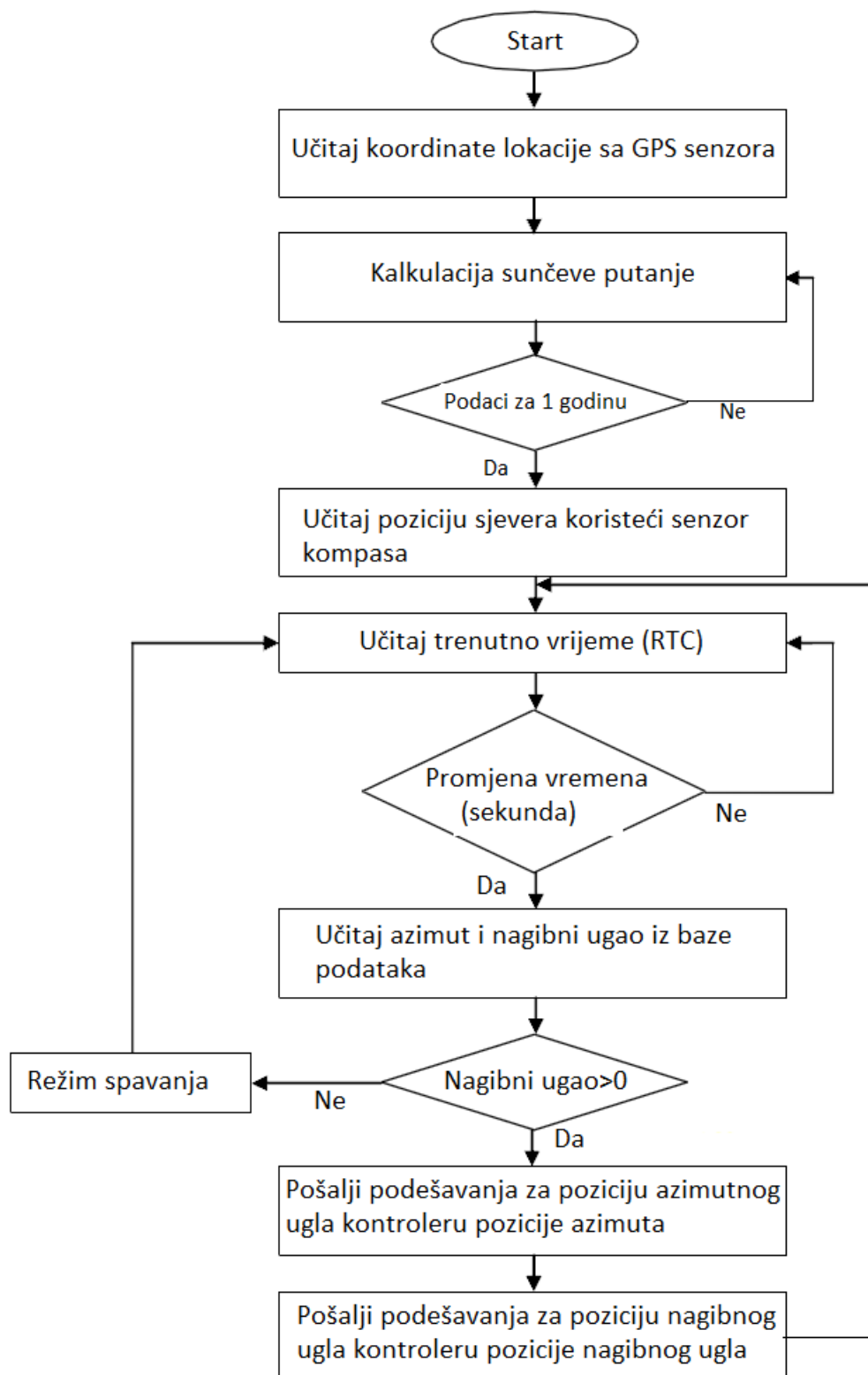
Slika 2.4

a) primjer –blok dijagram dvoosnog tragača zatvorene petlje, korišćenjem optičkog praćenja
 b) primjer-blok dijagrama dvoosnog tragača zatvorene petlje, korišćenjem algoritma za poziciju sunca

(izvor Muhammad E. H. Chowdhury, Amith Khandakar , Belayat Hossain and Rayaan Abouhasera “A Low-Cost Closed-Loop Solar Tracking System Based on the Sun Position Algorithm”, referenca 47)



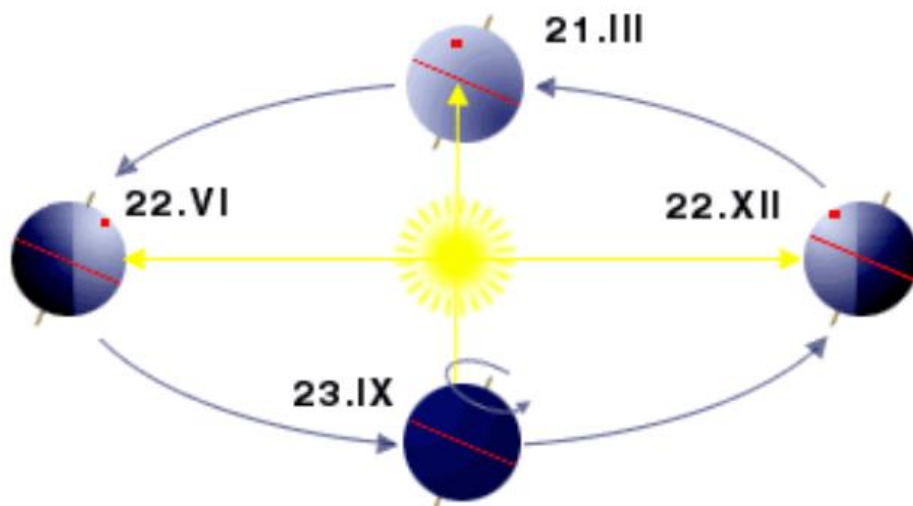
Slika 2.5 – primjer algoritma dvoosnog tragača zatvorene petlje, korišćenjem optičkog praćenja (izvor: Mustafa Aljumaili, Hussein M. Haglan, Mohammed kareem Mohammed, “An Automatic Multi-Axis Solar Tracking System in Ramadi City Design and Implementation”, referenca 63)



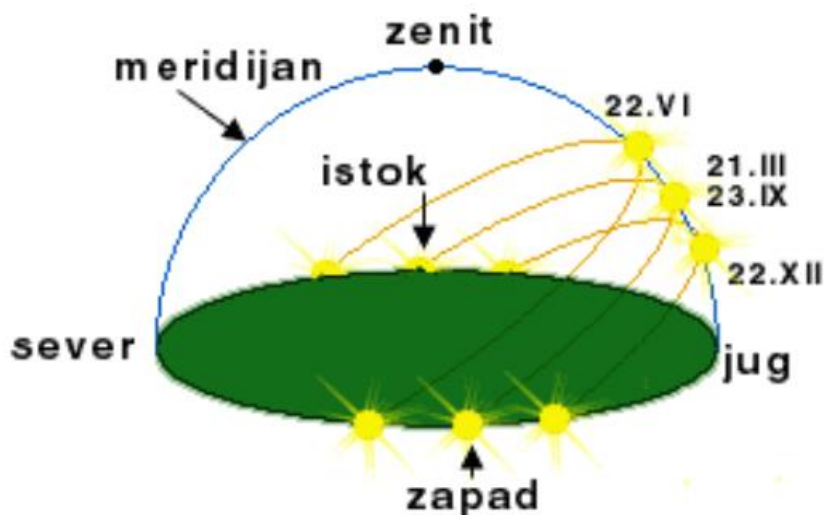
Slika 2.6 – primjer algoritma dvoosnog tragača zatvorene petlje, korišćenjem algoritma za poziciju Sunca (izvor: M.H.M. Sidek, W. Z. Wan Hasan, Zainal Kadir, Suhaidi Shafie, “GPS based portable dual-axis solar tracking system using astronomical equation”, referenca 63)

2. TIPOVI SISTEMA ZA PRAĆENJE SUNCA

Efikasnost fotonaponskog panela zavisi od upadnog ugla sunčevih zraka u odnosu na površinu panela. Da bi solarni panel prikupio maksimalnu energiju od sunca, neophodan je sistem za praćenje sunca visoke preciznosti koji može da prati putanju sunce na dnevnom nivou, kao i promjene nagiba putanje sunca tokom godine.



Slika 2.7 - Promjena položaja zemlje u odnosu na sunce u toku godine
(izvor - <http://static.astronomija.org.rs/suncsist/Sunce/pomracenje/skretanje.htm>, referenca 56)



Slika 2.8 –promjena putanje sunca na nebu u toku godine - sjeverna hemisfera
(izvor - <http://static.astronomija.org.rs/suncsist/Sunce/pomracenje/skretanje.htm>, referenca 56)

Sistem za praćenje sunca je mehatronički sistem. Sastoji se od mehanike, električnih pogona i informacione tehnologije. Mehanika se uglavnom sastoji od tragača na koji je ugrađen solarni panel da prati kretanje sunca održavajući površinu panela upravnom na sunčevo zračenje (imitirajući suncokret). Mehanika obezbeđuje neophodan obrtni moment za promjenu položaja azimuta i elevacije solarnog panela u odnosu na sunce, dok kontroler određuje kada i koliko da podesi pogonske motore kako bi se minimiziralo neusklađenost površine solarnog panela sa sunčevim zracima .

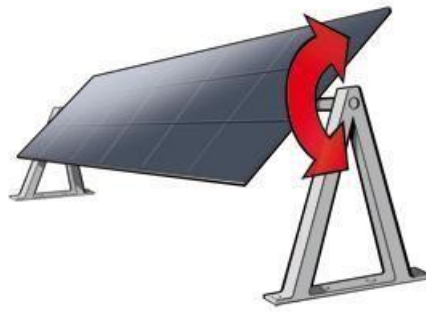
Sistemi za praćenje sunca se klasifikuju prema broju i orijentaciji njihovih osa. Grupisani su u uređaje za praćenje sa jednom i dvije ose.

2.1 JEDNOOSNI TRAGAČI

Kod jednoosnih tragača mehanizam rotira samo u jednoj ravni oko jedne ose. Postoje vertikalni i horizontalni tip. Horizontalni se koristi za praćenje sunca prema jugu i sjeveru, što je sunčeva sezonska putanja, dok se vertikalni koristi za praćenje sunca prema istoku i zapadu, što je dnevna putanja sunca.



Slika 2.9 – vertikalni tip jednoosnog tragača
(izvor: <https://www.solarchoice.net.au/blog/solar-trackers>)



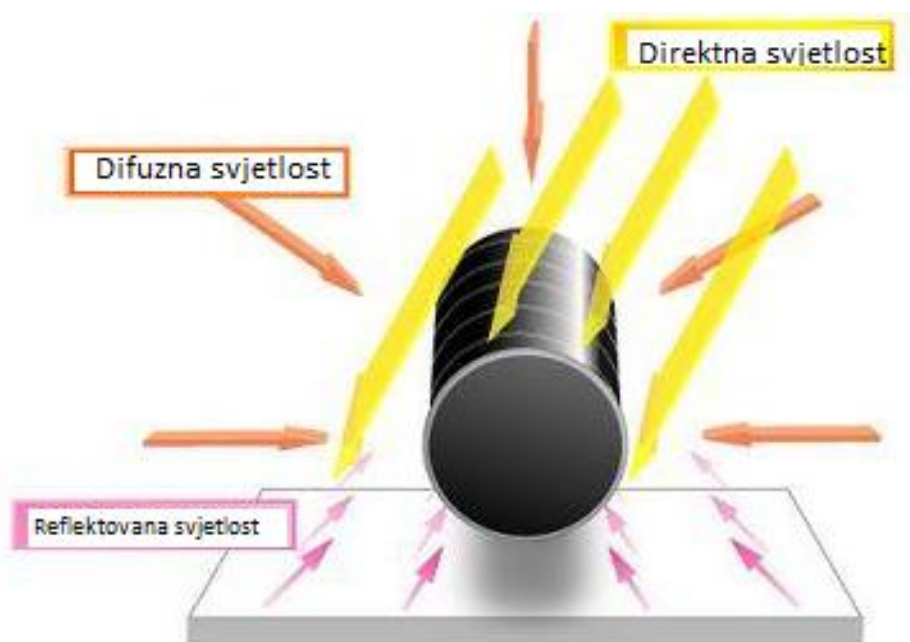
Slika 2.10 – horizontalni tip jednoosnog tragača
(izvor - <https://www.solarchoice.net.au/blog/solar-trackers>)

Prednosti jednoosnih tragača su u tome što su manje komplikovani, a samim tim i jeftiniji. Tragači sa jednom osom postižu veliki dio prednosti solarnog praćenja. Na lokacijama bližim ekvatoru gdje je sunčev luk kroz nebo manje promjenljiv tokom dana i godišnjih doba, jednoosni tragači su posebno efikasni.

Horizontalni tragači sa jednom osom su takođe strukturno čvršći i stabilniji, i stoga je manja vjerovatnoća da će biti oštećeni tokom oluja.

2.2 TUBULARNI SOLARNI PANELI

Pored normalnih opcija sa jednom osovinom, razvijena je nova solarna fotonaponska tehnologija pod nazivom Tubular solar, gdje je oblik samih ćelija cilindričan, omogućavajući ćelijama da uhvate maksimalnu količinu svjetlosti dok sunce prolazi kroz svoj dnevni ciklus.



Slika 2.11 – Tubularni fotonaponski panel
(izvor: <https://www.solarchoice.net.au/blog/solar-trackers>)

2.3 DVOOSNO TRAGAČI

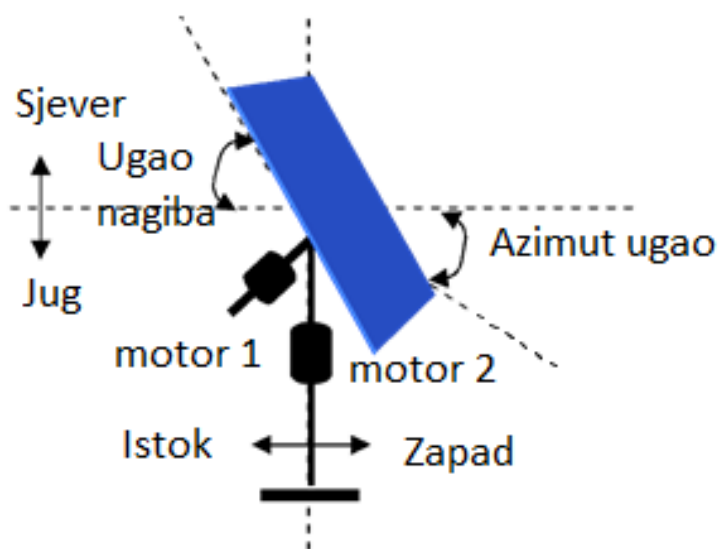
Dvoosni tragači omogućavaju dva stepena slobode solarnih fotonaponskih panela, prema azimutu (istok – zapad) i prema nagibu (sjever – jug). Njihove osovine su obično normalne jedna prema drugoj. Imaju sposobnost da podese solarni panel u pravcu istok-zapad i sjever-jug i prate kretanje sunca bilo gdje na nebu, tako da površina panela uvijek bude pod pravim uglom u odnosu na sunčeve zrake..

Pošto su u stanju da se istovremeno prilagode visini sunca, kao i kretanju sunca sa istoka na zapad, potpuno se prilagođavaju godišnjim dobima, kao i položaju sunca dok se nalazi nisko horizontu pri izlasku i zalasku sunca, kao i kada je visoko na nebu u sredinom dana.

Dvoosni tragači su efikasniji ali složeniji i stoga skuplji.

Slika 2.12 ilustruje strukturu tragača za sunce sa dvije ose.

Motor 1 mijenja visinski ugao duž pravca sjever-jug, dok motor 2 mijenja ugao azimuta u pravcu istok-zapad,



Slika 2.12 Struktura tragača za sunce sa dvije ose
(izvor - Benzekri Azzouz, "FPGA-Based Intelligent Dual-Axis Solar Tracking Control System" referenca 39)

3. VRSTE SOLARNIH TRAGAČA PREMA METODI PRAĆENJA SUNCA

Prema metodama koje se koriste, sistemi za praćenje sunca za fotovoltaike panele dijele se na:

- pasivne,
- hronološke
- aktivne.

3.1 PASIVNI UREĐAJI ZA PRAĆENJE SUNCA

Pasivni uređaji za praćenje sunca koriste komprimovani fluid sa niskom tačkom ključanja (često freon) kao sredstvo za naginjanje solarnog panela. Kada se zagrije sunčevom toplotom, stvara pritisak gasa u sistemu, pritisak tečnosti se povećava uzrokujući da se tečnost kreće unutar uređaja za praćenje sa jedne strane na drugu, omogućavajući gravitaciji da rotira tragač tako da prati sunce. Ovi uređaji za praćenje ne koriste motore ili kontrolu i stoga ne troše energiju. Takođe su manje precizni i stoga rade sa niskom efikasnošću u poređenju sa aktivnim tragačima. Pasivni tragači su, međutim, nepraktični na hladnim lokacijama.

3.2 HRONOLOŠKI UREĐAJI ZA PRAĆENJE SUNCA

Hronološki tragači koriste elektronsku logiku da kontrolišu aktuatora da prate sunce na osnovu matematičkih formula zasnovanih na astronomskim referencama sa podacima cijele jednogodišnje putanje Sunca za izračunavanje kretanja Sunca na nebu. Ovi podaci su obično trenutno vrijeme, dan, mjesec i godina određene geografske lokacije. Ovi tragači su takođe poznati kao tragači otvorene petlje jer ne zahtijevaju nikakvu povratnu informaciju za kontrolisani sistem.

3.3 AKTIVNI UREĐAJI ZA PRAĆENJE SUNCA

Aktivni uređaji za praćenja takođe poznati kao dinamički tragači sa zatvorenom petljom, sa druge strane, koriste motore i zupčanike da usmjeravaju fotonaponsku ploču prema komandama kontrolera. Oni obično koriste senzore za detekciju svjetlosti da obezbijede neobrađene podatke kao ulaze za kontroler da bi u realnom vremenu pratili stvarni položaj sunca na nebu. Pouzdaniji su od tragača otvorene petlje. Korišćenje povratne sprege obezbjeđuje da upravljanje sistemom bude manje osjetljivo na spoljašnje smetnje.

GLAVA 3

RAČUNARSKE PLATFORME I MIKROKONTROLERI ZA DIGITALNU KONTROLU PRAĆENJA SUNCA

1. RAČUNARSKE PLATFORME ZA DIGITALNU KONTROLU SISTEMA ZA PRAĆENJE SUNCA

U srcu većine ugrađenih kontrolnih sistema obično je digitalna kontrolna jedinica u realnom vremenu. Danas, inženjeri imaju na raspolaganju različite platforme za dizajniranje ovih kontrolnih jedinica.

Postoje tri glavne metodologije:

- a) Namjenska (fiksna) digitalna logika ili integrisana kola specifična za aplikaciju(ASIC),
- b) Logičke platforme koje se mogu rekonfigurisati(FPGA).
- c) Softverski programirana logika

1.1 ASIC RJEŠENJE

Od svih rješenja; namjenski kontroleri ili ASIC, obezbjeđuju najviše performanse jer su optimalno skrojeni za određenu upotrebu. Odlični su u brzini i potrošnji energije. Štaviše, imaju smanjenu veličinu i cijenu pri velikom obimu. Pokazuju visoku pouzdanost rada sistema. ASIC-ovi imaju neke nedostatke. To su integrisana kola sa fiksnom funkcijom, odnosno dizajn je zamrznut u silicijumu bez mogućnosti bilo kakve promjene.

1.2 LOGIČKE PLATFORME KOJE SE MOGU REKONFIGURISATI

FPGA(Field-programmable gate array) su integrisana kola dizajnirana tako da se mogu konfigurisati, odnosno sistemski hardver više ne treba da bude zamrznut. Procesor i periferni uređaji, kao i ciljni FPGA, mogu se promijeniti tokom razvoja ili migrirati na novi, efikasniji FPGA.

1.3 SOFTVERSKI PROGRAMIRANA KOLA

Programabilni mikrokontroleri upotrebom softverskih algoritama daju adekvatno rješenje za konkretne sisteme upravljanja.

U ovom slučaju upotrebom Atmelovog AVR mikrokontrolera ATmega328P sa programabilnom fleš memorijom, na razvojnoj ploči Key Studio Arduino Uno, sa odgovarajućim softverskim kodom može se postići optimalno upravljanje sistemom za praćenje položaja sunca.

2. MIKROKONTROLERI ZA DIGITALNU KONTROLU SISTEMA ZA PRAĆENJE SUNCA

Za digitalnu kontrolu sistema za praćenje sunca mogu se koristiti različiti tipovi mikrokontrolera.

Mikrokontroler je kompaktno integrisano kolo dizajnirano da upravlja određenim operacijama u ugrađenom sistemu. Tipičan mikrokontroler uključuje procesor, memoriju i periferne uređaje za ulaz/izlaz (I/O) na jednom čipu.

Ponekad se nazivaju ugrađenim kontrolerom ili mikrokontrolerskom jedinicom (MCU). Oni su u suštini jednostavni minijaturni personalni računari (PC) dizajnirani da kontrolišu male karakteristike veće komponente, bez kompleksnog operativnog sistema (OS).

2.1 OSNOVNI ELEMENTI MIKROKONTROLERA

- Procesor (CPU) -- Procesor se može smatrati mozgom uređaja. On obrađuje i odgovara na različite instrukcije koje usmjeravaju funkciju mikrokontrolera. Ovo uključuje izvođenje osnovnih aritmetičkih, logičkih i I/O operacija. Takođe obavlja operacije prenosa podataka, koje saopštavaju komande drugim komponentama u većem ugrađenom sistemu.
- Memorija – Memorija mikrokontrolera se koristi za skladištenje podataka koje procesor prima i koristi da odgovori na instrukcije za koje je programiran. Mikrokontroler ima dva glavna tipa memorije:
 - Programska memorija, koja čuva dugoročne informacije o uputstvima koje CPU izvršava. Programska memorija je nepromjenljiva memorija, što znači da čuva informacije tokom vremena bez potrebe za izvorom napajanja.
 - Memorija podataka, koja je potrebna za privremeno skladištenje podataka dok se instrukcije izvršavaju. Memorija podataka je nestabilna, što znači da su podaci koje čuva privremeni i održavaju se samo ako je uređaj povezan na izvor napajanja.

- I/O periferni uređaji -- Ulazni i izlazni uređaji su interfejs za procesor prema spoljašnjem svijetu. Ulazni portovi primaju informacije i šalju ih procesoru u obliku binarnih podataka. Procesor prima te podatke i šalje potrebna uputstva izlaznim uređajima koji izvršavaju zadatke van mikrokontrolera.

2.2 PRATEĆI ELEMENTI MIKROKONTROLERA

- Analogno-digitalni pretvarač (ADC) je kolo koje pretvara analogne signale u digitalne signale. Omogućava procesoru u centru mikrokontrolera da se poveže sa eksternim analognim uređajima, kao što su senzori.
- Digitalno-analogni pretvarač (DAC) obavlja inverznu funkciju ADC-a i omogućava procesoru u centru mikrokontrolera da prenosi svoje odlazne signale spoljnim analognim komponentama.
- Sistemska magistrala koja povezuje sve komponente mikrokontrolera zajedno.
- Serijski port je jedan primjer I/O porta koji omogućava mikrokontroleru da se poveže sa spoljnim komponentama. Ima sličnu funkciju kao USB ili paralelni port, ali se razlikuje po načinu na koji razmjenjuje biteve.

2.3 TIPOVI MIKROKONTROLERA

Mikrokontroleri se karakterišu u pogledu širine magistrale, skupa instrukcija i strukture memorije. Za istu porodicu mogu postojati različiti oblici sa različitim izvorima.

2.3.1 TIPOVI MIKROKONTROLERA PREMA BROJU BITOVA

Postoje 8-bitni, 16-bitni, 32-bitni i 64-bitni mikrokontroleri.

Primjeri 8-bitnih mikrokontrolera su porodice Intel 8031/8051, PIC1k i Motorola MC68HC11.

Primjeri 16-bitnih mikrokontrolera su porodice 8051KSA, PIC2k, Intel 8096 i Motorola MC68HC12.

Primjeri 32-bitnih mikrokontrolera su Intel/Atmel 251 porodica, PIC3k.

Primjeri 64-bitnih mikrokontrolera PPC970, ARM Cortex-A or MIPS R4000

2.3.2 TIPOVI MIKROKONTROLERA PREMA MEMORIJSKIM UREĐAJIMA

Prema tipu memorijskih uređaja mikrokontroleri su podijeljeni u dva tipa:

- Mikrokontroleri sa ugrađenom memorijom ima sve funkcionalne blokove dostupne na čipu. Na primjer, mikrokontroler 8051 ima memoriju programa i podataka, I/O portove, serijsku komunikaciju, brojače i tajmere ugrađene na čipu
- Mikrokontroler eksterne memorije nema sve funkcionalne blokove dostupne na čipu. Na primjer, mikrokontroler 8031 nema programsku memoriju ugrađenu na čipu

2.3.3 TIPOVI MIKROKONTROLERA PREMA SKUPU INSTRUKCIJA

- CISC mikrokontroleri. CISC je skraćenica za računar sa složenim skupom instrukcija (Complex Instruction Set Computer). Omogućava programeru da koristi jednu instrukciju umesto mnogo jednostavnijih instrukcija.
- RISC mikrokontroleri. RISC je skraćenica za računar sa smanjenim skupom instrukcija (Reduced Instruction set Computer). ova vrsta skupova instrukcija smanjuje dizajn mikroprocesora za industrijske standarde. Omogućava da svaka instrukcija radi na bilo kom registru ili da koristi bilo koji način adresiranja i istovremeni pristup programu i podacima.

2.3.4 TIPOVI MIKROKONTROLERA PREMA ARHITEKTURI MEMORIJE

Prema memorijskoj arhitekturi postoje dva tipa mikrokontrolera:

- Mikrokontroler **Harvardske memorijske arhitekture** je mikrokontroler koji ima različit memorijski adresni prostor za program i memoriju podataka.
- Mikrokontroler **Prinstonske memorijske arhitekture** je mikrokontroler koji ima zajedničku memorijsku adresu za programsku memoriju i memoriju podataka.

2.3.5 FAMILIJE MIKROKONTROLERA

Postoje različite familije mikrokontrolera kao što su 8051, PIC, AVR, ARM.

I. Mikrokontroler 8051

8051 su 8-bitni kontroleri zasnovani na CISC arhitekturi.

To je 40-pinski mikrokontroler sa Vcc od 5V spojenim na pin 40 i Vss na pin 20 koji se održava na 0V. A tu su i ulazni i izlazni portovi od P1.0 – P1.7 i koji imaju funkciju otvorenog odvoda. Port3 ima dodatne funkcije. Pin36 ima stanje otvorenog odvoda, a pin17 ima interno povučen tranzistor unutar mikrokontrolera.

II. AVR mikrokontroleri

AVR mikrokontroler su razvili Alf-Egil Bogen i Vegard Volan iz Atmel Corporation. AVR mikrokontroleri su modifikovana Harvard RISC arhitektura sa odvojenim memorijama za podatke i program i brzina AVR-a je visoka u poređenju sa 8051 i PIC-om. AVR je skraćenica za RISC procesor Alf-Egil Bogen i Vegard Vollan.

III. PIC mikrokontroleri

PIC je periferni interfejs kontroler, razvijen 1993. godine.

Postoji mnogo PIC mikrokontrolera, počevši od PIC16F84 i PIC16C84. Microchip je nedavno predstavio fleš čipove sa tipovima koji su mnogo atraktivniji, kao što su 16F628, 16F877 i 18F452. 16F877 je oko duplo skuplji od starog 16F84, ali ima osam puta veću veličinu koda, mnogo više RAM-a, mnogo više I/O pinova, UART, A/D konvertor i još mnogo toga.

Prednosti PIC-a:

- RISC dizajn
- Njegov kod je izuzetno efikasan, omogućavajući PIC-u da radi sa obično manje programske memorije od svojih većih konkurenata
- Niska cijena, velika brzina takta.

IV. MSP mikrokontroleri

Termin MSP je akronim od „Mixed Signal Processor“. Ova familija mikrokontrolera je preuzeta od Texas Instruments-a i dizajnirana za niske troškove kao i sisteme male snage. Ovaj kontroler uključuje 16-bitnu magistralu podataka, adresiranje modova-7 sa smanjenim skupom instrukcija, što omogućava gušći, kraći programski kod koji se koristi za brze performanse.

Ima RISC arhitekturu sa 27 osnovnih instrukcija.

V. ARM mikrokontroleri

ARM(Advanced RISC Machines) mikrokontroleri su zasnovani na 32-bitnoj RISC arhitekturi.

RISC procesor se koncentriše na to da raznovrsnost instrukcija svede na minimum, a da te instrukcije budu što jednostavnije. Jedna instrukcija se izvršava po ciklusu takta, što obezbeđuje predvidljivu obradu.. Jednostavna uputstva zahtijevaju relativno malo tranzistora u silicijumu, dajući dizajnerima čipova slobodu da optimizuju parametre kao što su cijena i potrošnja energije. S druge strane, sa manje instrukcija koje možete izabrati i jednom instrukcijom po ciklusu takta, može biti potreban veliki broj instrukcija da bi se izvršio dati zadatak. Ovo može dovesti do velike zavisnosti od RAM-a i sporog vremena izvršenja za složena radna opterećenja koja CISC procesori mogu lakše i brže da obrađuju.

ARM ima arhitekturu koja daje prioritet energetske efikasnosti, visokim performansama i pristupačnosti.

3. AVR MIKROKONTROLERI

AVR (engl. "Advanced Virtual RISC CPU") je vrsta mikrokontrolera (MCU) baziranih na RISC (Reduced Instruction Set Computing) arhitekturi, koju je razvio Atmel (sada Microchip Technology Inc.).

AVR mikrokontroleri su široko korišćeni u mnogim elektronskim projektima i aplikacijama zbog svoje visoke performanse, niske potrošnje energije, jednostavnosti upotrebe i bogatog ekosistema razvojnih alata.

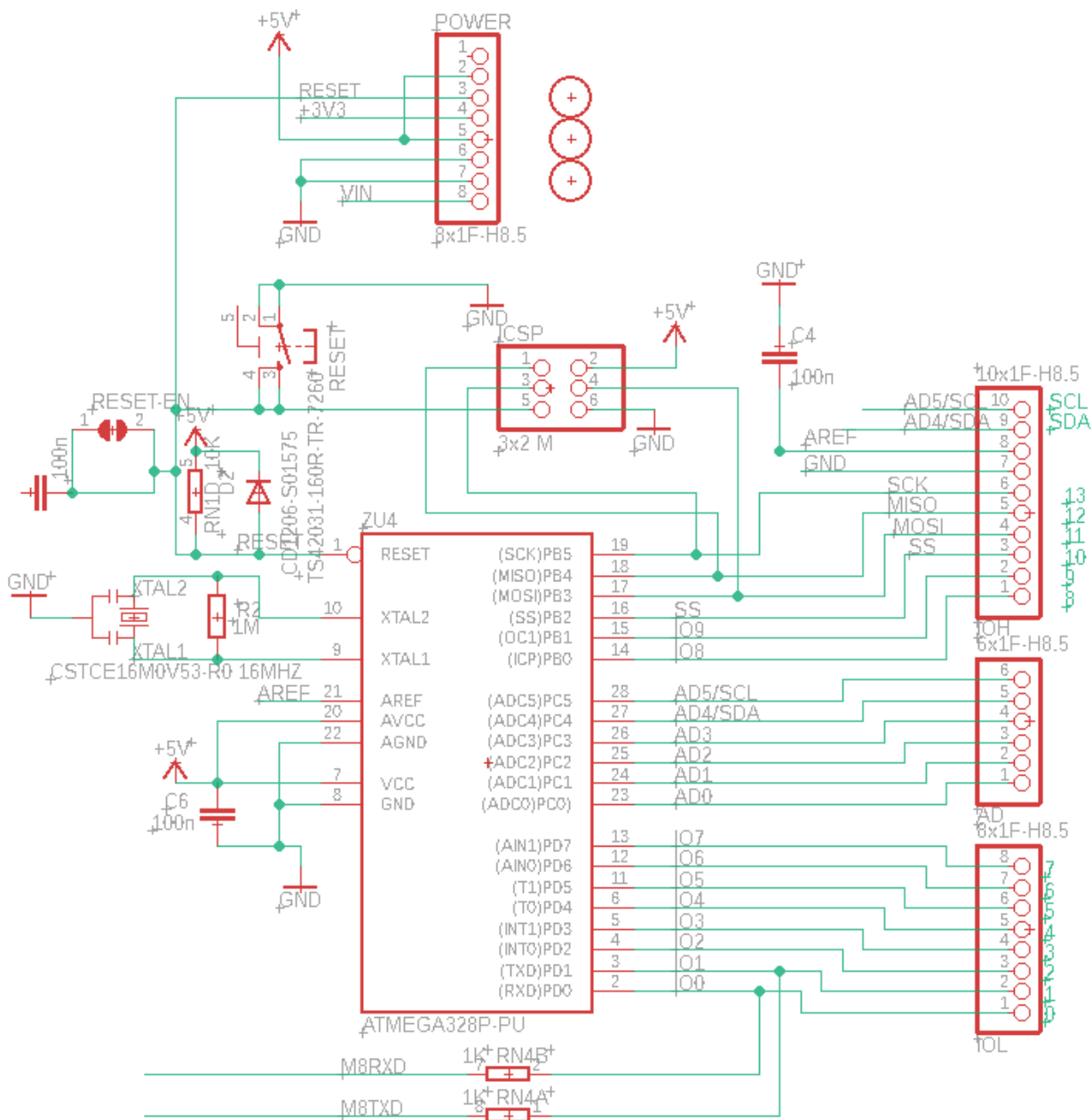
Neke od najpoznatijih serija AVR mikrokontrolera su:

1. **ATmega** serija: Ovo je popularna serija AVR mikrokontrolera koja nudi širok spektar performansi, broja pinova i memorijskih kapaciteta. Ovoj seriji pripada i mikrokontroler **ATmega328P** koji je upotrijebljen u ovom projektu i koji se često koristi u Arduino razvojnom okruženju.
2. **ATtiny** serija: Ovo je serija manjih AVR mikrokontrolera sa manjim brojem pinova i ograničenijim kapacitetom memorije. Međutim, ATtiny mikrokontroleri su vrlo popularni zbog svoje male veličine, niske potrošnje energije i jednostavnosti upotrebe, što ih čini pogodnim za aplikacije sa ograničenim resursima.
3. **ATxmega** serija: Ovo je serija naprednijih AVR mikrokontrolera koji pružaju više periferija, veći broj pinova i naprednije funkcije kao što su višestruka jezgra, kriptografski koprocesori i druge napredne karakteristike. ATxmega mikrokontroleri su pogodni za zahtjevnije aplikacije koje zahtijevaju visoke performanse i napredne funkcionalnosti.
4. **AVR32** serija: Ovo je serija AVR mikrokontrolera baziranih na 32-bitnoj RISC arhitekturi, koja nudi još veće performanse i napredne mogućnosti za zahtjevne aplikacije. AVR32 mikrokontroleri su posebno pogodni za aplikacije kao što su mrežno povezani uređaji, industrijska automatizacija i drugi kompleksniji sistemi.

Osim navedenih serija, postoje i druge manje poznate serije AVR mikrokontrolera sa specifičnim karakteristikama ili aplikacijskim fokusom. AVR mikrokontroleri su široko korišćeni u različitim industrijskim, komercijalnim i hobi projektima zbog svoje pouzdanosti, jednostavnosti upotrebe i bogatog ekosistema razvojnih alata.

4. MIKROKONTROLER ATMEGA328P

Procesor razvojne ploče Keystudio Arduino UNO koja je korišćena u ovom radu je Atmel® ATMEGA328P, 8-bitni CMOS mikrokontroler sa programabilnom 32KB fleš memorijom, zasnovan na AVR® poboljšanoj RISC arhitekturi. Izvršavajući moćne instrukcije u jednom taktom ciklusu, ATmega328P postiže protok koji se približava 1 MIPS po MHz, omogućavajući dizajneru sistema da optimizuje potrošnju energije u odnosu na brzinu obrade.



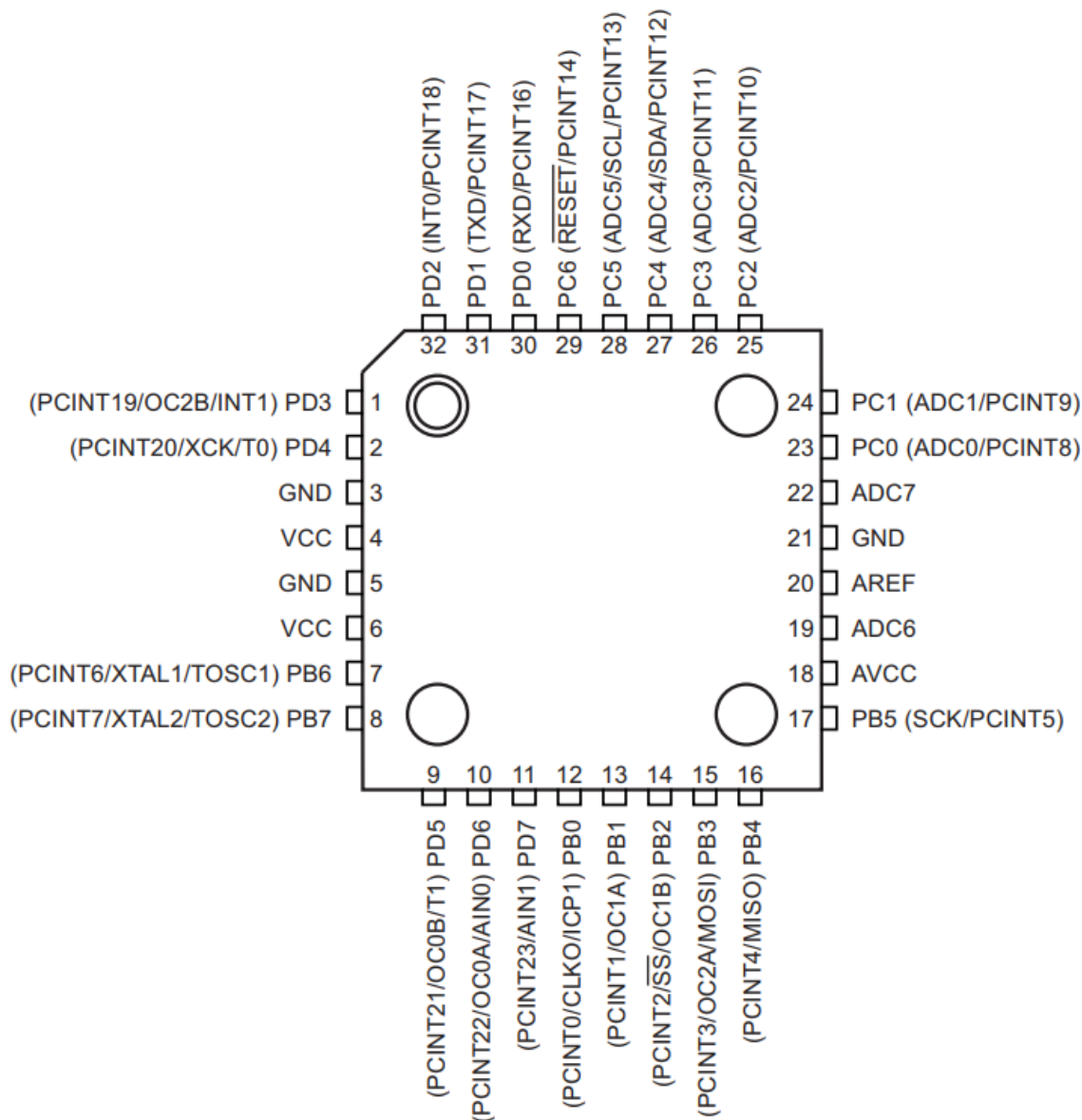
Slika 3.1 – šema mikrokontrolera ATMEGA328P (izvor ATmega328P_Datasheet, referenca 40)

4.1 OSNOVNE KARAKTERISTIKE MIKROKONTROLERA:

- AVR® 8-bitni mikrokontroler visokih performansi male snage
- Napredna RISC arhitektura
 - 32 × 8 radnih registara opšte namjene
 - Potpuno statičan rad
 - Propusnost do 16MIPS na 16MHz
 - 2-ciklusni množilac na čipu

- Nepromjenljivi memorijski segmenti velike izdržljivosti
 - 32KB samoprogramirajuće fleš programske memorije u sistemu
 - 1KB EEPROM
 - Interni SRAM od 2 KB
 - Ciklusi upisivanja/brisanja: 10.000 fleš/100.000 EEPROM
 - Opcioni odjeljak koda za pokretanje sa nezavisnim bitovima za zaključavanje
 - Programiranje u sistemu pomoću programa za pokretanje na čipu
 - Prava operacija čitanja i pisanja
 - Programska brava za sigurnost softvera
- Periferne karakteristike
 - Dva 8-bitna tajmera/brojača sa odvojenim predskalerom i režimom poređenja
 - Jedan 16-bitni tajmer/brojač sa odvojenim predskalerom, režimom poređenja i režimom snimanja
 - Brojač u realnom vremenu sa posebnim oscilatorom
 - Šest PWM kanala
 - 8-kanalni 10-bitni ADC u TKFP i KFN/MLF paketu
 - Mjerenje temperature
 - Programabilni serijski USART
 - Master/slave SPI serijski interfejs
 - Bajt-orijentisan 2-žični serijski interfejs (kompatibilan sa Phillips I2C)
 - Programabilni vođdog tajmer sa zasebnim oscilatorom na čipu
 - Analogni komparator na čipu
 - Prekid i buđenje pri promjeni pinova
- Specijalne karakteristike mikrokontrolera
 - Resetovanje po uključenju i programabilna detekcija zatamnjenja
 - Interni kalibrisani oscilator
 - Eksterni i unutrašnji izvori prekida
 - Šest režima spavanja: mirovanje, smanjenje buke ADC-a, ušteda energije, gašenje, stanje pripravnosti i produženo stanje pripravnosti
- I/O i paketi
 - 23 programabilne I/O linije
 - 32-odvodni TKFP i 32-odvodni KFN/MLF
- Radni napon:
 - 2,7 V do 5,5 V za ATmega328P
- Temperaturni opseg:
 - -40°C do $+125^{\circ}\text{C}$
- Brzina:
 - 0 do 8MHz na 2,7 do 5,5V (opseg temperature: -40°C do $+125^{\circ}\text{C}$)
 - 0 do 16MHz na 4,5 do 5,5V (opseg temperature: -40°C do $+125^{\circ}\text{C}$)
- Mala potrošnja energije
 - Aktivni režim: 1,5mA na 3V - 4MHz
 - Režim gašenja: 1 μA na 3V

4.2 RASPORED I OPIS PINOVA



Slika 3.2 – raspored pinova (izvor ATmega328P_Datasheet, referenca 40)

VCC - Digitalni napon napajanja.

GND - Uzemljenje

Port B (PB7:0) KSTAL1/KSTAL2/TOSC1/TOSC2

Port B je 8-bitni dvosmjerni I/O port sa unutrašnjim pull-up otpornicima (odabranim za svaki bit). Izlazni baferi porta B imaju simetrične karakteristike pogona sa visokom sposobnošću ponora i izvora.

U zavisnosti od podešavanja osigurača za izbor takta, PB6 se može koristiti kao ulaz za pojačalo sa invertujućim oscilatorom i kao ulaz za interno radno kolo takta.

U zavisnosti od podešavanja osigurača za izbor takta, PB7 se može koristiti kao izlaz iz pojačala sa invertujućim oscilatorom.

Ako se interni kalibrisani RC oscilator koristi kao izvor takta čipa, PB7..6 se koristi kao TOSC2..1 ulaz za asinhroni Tajmer/brojač2 ako je AS2 bit postavljen u ASSR.

Port C (PC5:0)

Port C je 7-bitni dvosmjerni I/O port sa unutrašnjim pull-up otpornicima (odabranim za svaki bit). PC5..0 izlazni baferi imaju simetrične karakteristike drajvera sa visokim kapacitetom ponora i izvora.

PC6/RESET

Ako je RSTDISBL osigurač programiran, PC6 se koristi kao ulazni pin. Ako RSTDISBL osigurač nije programiran, PC6 se koristi kao ulaz za resetovanje. Nizak nivo na ovom pinu duže od minimalne dužine impulsa će generisati resetovanje, čak i ako sat ne radi.

Port D (PD7:0)

Port D je 8-bitni dvosmjerni I/O port sa unutrašnjim pull-up otpornicima (odabranim za svaki bit). Izlazni baferi porta D imaju simetrične karakteristike pogona sa visokom sposobnošću ponora i izvora.

AVCC

AVCC je pin napona napajanja za A/D konvertor, PC3:0 i ADC7:6. Trebalo bi da bude eksterno povezan na VCC, čak i ako se ADC ne koristi. Ako se koristi ADC, treba ga povezati na VCC preko niskopropusnog filtera. PC6..4 koristi digitalni napon napajanja, VCC.

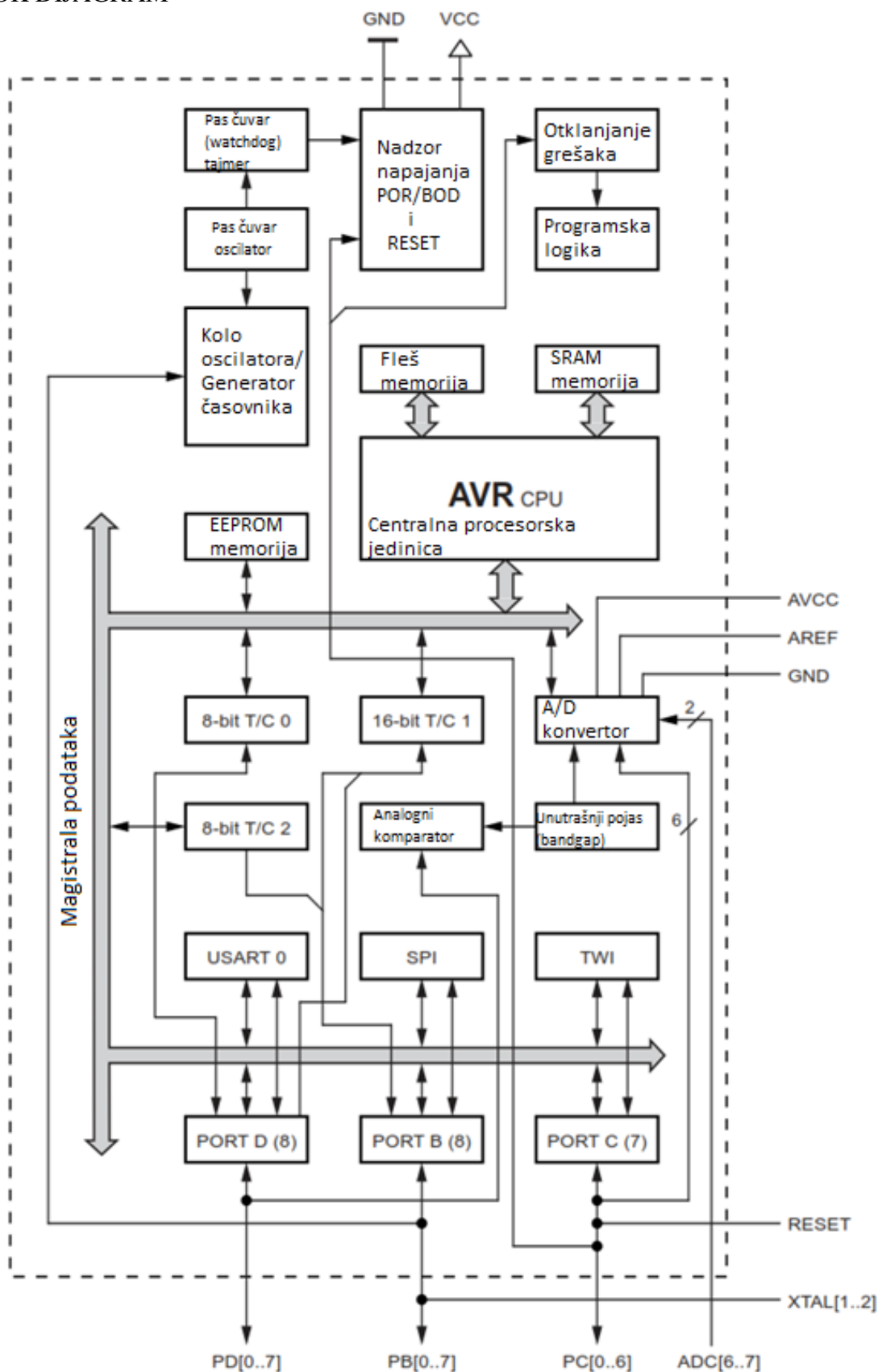
AREF

AREF je analogni referentni pin za A/D konvertor.

ADC7:6

ADC7:6 služi kao analogni ulazi za A/D pretvarač. Ovi pinovi se napajaju iz analognog napajanja i služe kao 10-bitni ADC kanali.

4.3 BLOK DIJAGRAM



Slika 3.3 – Blok dijagram mikrokontrolera ATMEGA328
(izvor ATmega328P_Datasheet, referenca 40)

AVR® jezgro kombinuje bogat skup instrukcija sa 32 radna registra opšte namjene. Sva 32 registra su direktno povezana sa aritmetičko-logičkom jedinicom (ALU), što omogućava pristup dva nezavisna registra u jednoj instrukciji koja se izvršava u jednom ciklusu takta. Rezultirajuća arhitektura je efikasnija u kodu dok postiže protok do deset puta brži od konvencionalnih CISC mikrokontrolera.

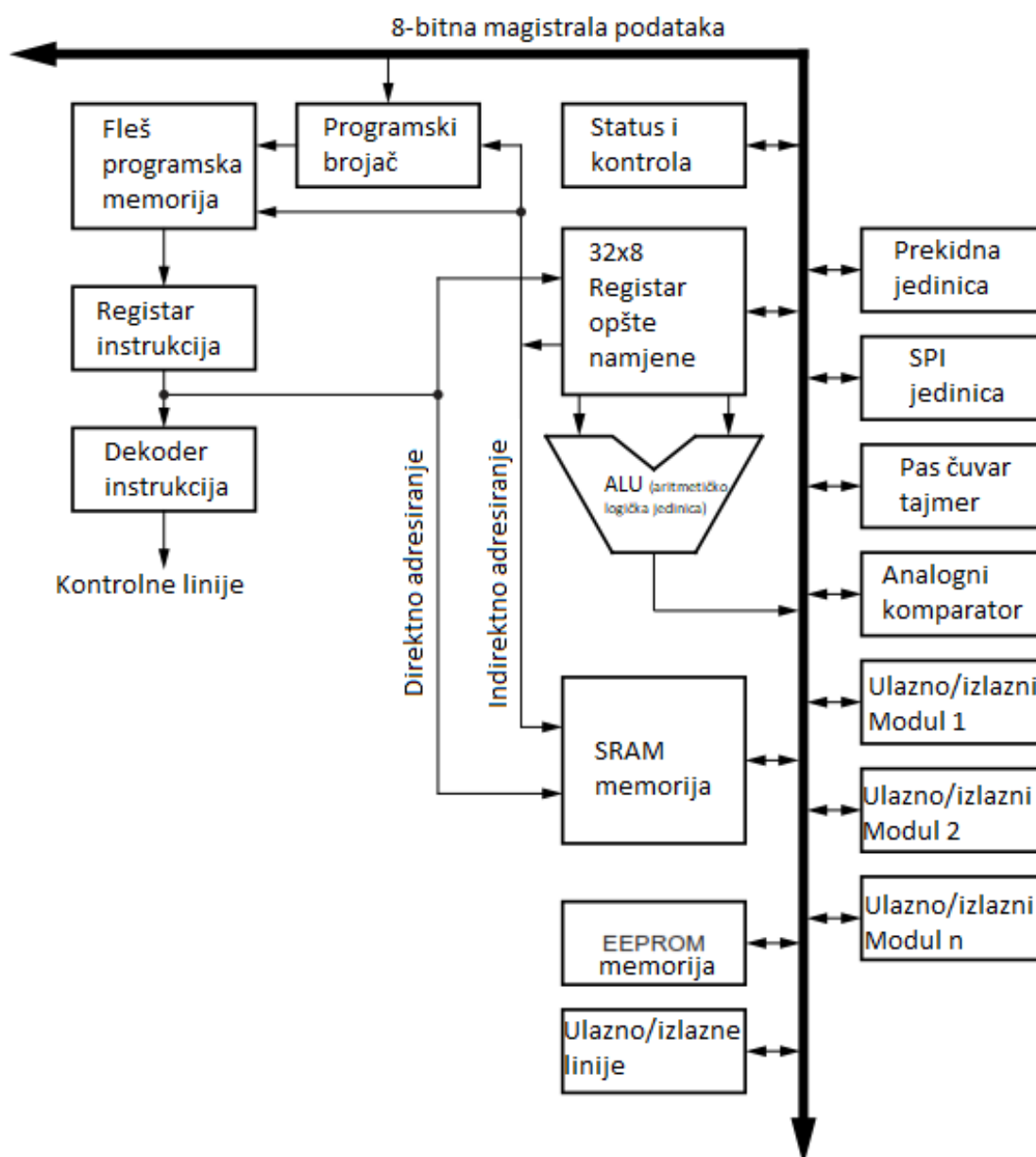
Atmel® ATmega328P pruža sljedeće karakteristike: 32K bajtova programabilnog fleša u sistemu sa mogućnošću čitanja dok upisuje, 1K bajtova EEPROM, 2K bajta SRAM, 23 U/I linije opšte namjene, 32 radna registra opšte namjene, tri fleksibilna tajmera / Brojači sa uporednim režimima, unutrašnjim i eksternim prekidima, serijski programabilni USART, bajt-orijentisani 2-žični serijski interfejs, SPI serijski port, 6-kanalni 10-bitni ADC (8 kanala u TKFP i KFN/MLF paketima), programabilni pas čuvar (watchdog) tajmer sa internim oscilatorom i pet softverskih režima za uštedu energije. Režim mirovanja zaustavlja CPU dok dozvoljava SRAM-u, tajmeru/brojaču, USART-u, 2-žičnom serijskom interfejsu, SPI portu i sistemu za prekide da nastave da funkcionišu. Režim isključivanja čuva sadržaj registra, ali zamrzava oscilator, onemogućujući sve ostale funkcije čipa do sljedećeg prekida ili hardverskog resetovanja. U režimu uštede energije, asinhroni tajmer nastavlja da radi, omogućavajući korisniku da održava bazu tajmera dok ostatak uređaja spava. Režim smanjenja šuma ADC-a zaustavlja CPU i sve I/O module osim asinhronog tajmera i ADC-a, kako bi se minimizirao šum prebacivanja tokom ADC konverzije. U režimu pripravnosti, oscilator kristala/rezonatora radi dok ostatak uređaja spava. Ovo omogućava veoma brzo pokretanje u kombinaciji sa malom potrošnjom energije.

Uređaj je proizveden korišćenjem Atmel tehnologije nepromjenljive memorije visoke gustine. ISP fleš na čipu omogućava da se programska memorija reprogramira u sistemu preko SPI serijskog interfejsa, od strane konvencionalnog programatora trajne memorije, ili pomoću programa za pokretanje na čipu koji radi na AVR jezgru. Program za pokretanje može da koristi bilo koji interfejs za preuzimanje aplikacionog programa u fleš memoriji aplikacije. Softver u fleš odjeljku za pokretanje će nastaviti da radi dok se fleš odjeljak aplikacije ažurira, obezbjeđujući istinsku operaciju čitanja i pisanja. Kombinovanjem 8-bitnog RISC CPU-a sa samoprogramirajućom fleš memorijom u sistemu na monolitnom čipu, čini Atmel ATmega328P moćnim mikrokontrolerom koji pruža veoma fleksibilno i isplativo rješenje za mnoge ugrađene kontrolne aplikacije.

ATmega328P AVR je podržan sa punim paketom programskih i sistemskih razvojnih alata uključujući: C kompajlere, makro asemblere, programski debager/simulatore, emulatoru u krugu i komplete za evaluaciju.

4.4 AVR CPU JEZGRO

Glavna funkcija AVR CPU(eng. Central processing unit) jezgra je da obezbedi ispravno izvršavanje programa. CPU stoga mora biti u mogućnosti da pristupi memoriji, da izvodi proračune, kontroliše periferne uređaje i da rukuje prekidima.



Slika 3.4 Blok dijagram AVR arhitekture (izvor ATmega328P_Datasheet, referenca 40)

Da bi se maksimizirale performanse i paralelizam, AVR koristi harvardsku arhitekturu – sa odvojenim memorijama i magistralama za programe i podatke. Instrukcije u programskoj memoriji se izvršavaju na jednom nivou. Dok se jedna instrukcija izvršava, sljedeća instrukcija se unaprijed preuzima iz programske memorije. Ovaj koncept omogućava izvršavanje instrukcija u svakom ciklusu takta. Programska memorija je systemska reprogramabilna fleš memorija.

Datoteka registra za brzi pristup sadrži 32×8 -bitna radna registra opšte namjene sa vremenom pristupa za jedan takt. Ovo omogućava rad aritmetičko-logičke jedinice (ALU) u jednom ciklusu. U tipičnoj ALU operaciji, dva operanda su izlaz iz datoteke registra, operacija se izvršava, a rezultat se čuva nazad u datoteku registra – u jednom ciklusu takta. Šest od 32 registra se mogu koristiti kao tri 16-bitna pokazivača indirektnog adresnog registra za adresiranje prostora podataka – omogućavajući efikasne proračune adresa. Jedan od ovih adresnih pokazivača se takođe može koristiti kao pokazivač adrese za traženje tabela u fleš programskoj memoriji.

ALU podržava aritmetičke i logičke operacije između registara ili između konstante i registra. Operacije sa jednim registrom se takođe mogu izvršiti u ALU. Nakon aritmetičke operacije, statusni registar se ažurira kako bi odražavao informacije o rezultatu operacije. Tok programa je obezbeđen uslovnim i безусловnim instrukcijama za skok i pozivanje, koje mogu direktno da adresiraju cijeli adresni prostor. Većina AVR® instrukcija ima jedan 16-bitni format riječi. Svaka adresa programske memorije sadrži 16-bitne ili 32-bitne instrukcije.

Prostor programske fleš memorije podijeljen je na dva dijela, odjeljak programa za pokretanje i odjeljak sa programom za aplikacije. Oba odjeljka imaju namjenske bitove za zaključavanje za zaštitu od pisanja i čitanja/pisanja. SPM instrukcija koja upisuje u odjeljak fleš memorije aplikacije mora da se nalazi u odjeljku programa za pokretanje.

Tokom prekida i poziva potprograma, programski brojač povratne adrese (PC) se čuva na steku. Stek se efektivno dodjeljuje u SRAM opštih podataka, i prema tome, veličina steka je ograničena samo ukupnom veličinom SRAM-a i upotrebom SRAM-a. Svi korisnički

programi moraju inicijalizovati SP u rutini resetovanja (prije nego što se podprogrami ili prekidi izvrše). Pokazivač steka (SP) je dostupan za čitanje/upisivanje u I/O prostoru. SRAM-u podataka može se lako pristupiti preko pet različitih načina adresiranja podržanih u AVR arhitekturi.

Svi memorijski prostori u AVR arhitekturi su linearne i regularne memorijske mape.

Fleksibilni modul prekida ima svoje kontrolne registre u I/O prostoru sa dodatnim globalnim bitom za omogućavanje prekida u statusnom registru. Svi prekidi imaju poseban vektor prekida u tabeli vektora prekida. Prekidi imaju prioritet u skladu sa svojom pozicijom vektora prekida. Što je niža adresa vektora prekida, to je veći prioritet.

I/O memorijski prostor sadrži 64 adrese za CPU periferne funkcije kao što su kontrolni registri, SPI i druge I/O funkcije. I/O memoriji se može pristupiti direktno, ili kao lokacijama prostora podataka koje slijede one u registarskoj datoteci, 0k20 - 0k5F. Pored toga, ATmega328P je proširio I/O prostor od 0k60 - 0kFF u SRAM-u gdje se mogu koristiti samo ST/STS/STD i LD/LDS/LDD instrukcije.

ALU – Aritmetičko-logička jedinica

AVR ALU visokih performansi radi u direktnoj vezi sa sva 32 radna registra opšte namjene. U okviru jednog ciklusa takta, izvršavaju se aritmetičke operacije između registara opšte namjene. ALU operacije su podijeljene u tri glavne kategorije – aritmetičke, logičke i bit-funkcije.

STATUSNI REGISTAR

Statusni registar sadrži informacije o rezultatu posljednje izvršene aritmetičke instrukcije. Ove informacije se mogu koristiti za promjenu toka programa kako bi se izvršile uslovne operacije. Statusni registar se ažurira nakon svih ALU operacija, kao što je navedeno u referenci skupa instrukcija. Ovo će u mnogim slučajevima ukloniti potrebu za korišćenjem namjenskih uputstava za poređenje, što će rezultirati bržim i kompaktnijim kodom.

GLAVA 4

DVOOSNI SISTEM ZA PRAĆENJE SUNCA BAZIRAN NA MIKROKONTROLERU

OPŠTE NAMJENE

1. OPIS PREDLOŽENOG DVOOSNOG SISTEMA ZA PRAĆENJE SUNCA

Princip rada sistema je da obezbijedi da fotonaponski moduli budu konstantno usklađeni sa sunčevim zracima, odnosno da budu konstantno pod pravim uglom u odnosu na sunčeve zrake što maksimizira izloženost solarnog panela sunčevom zračenju. Kao rezultat, solarni panel postaje efikasniji, odnosno proizvodi više električne energije.

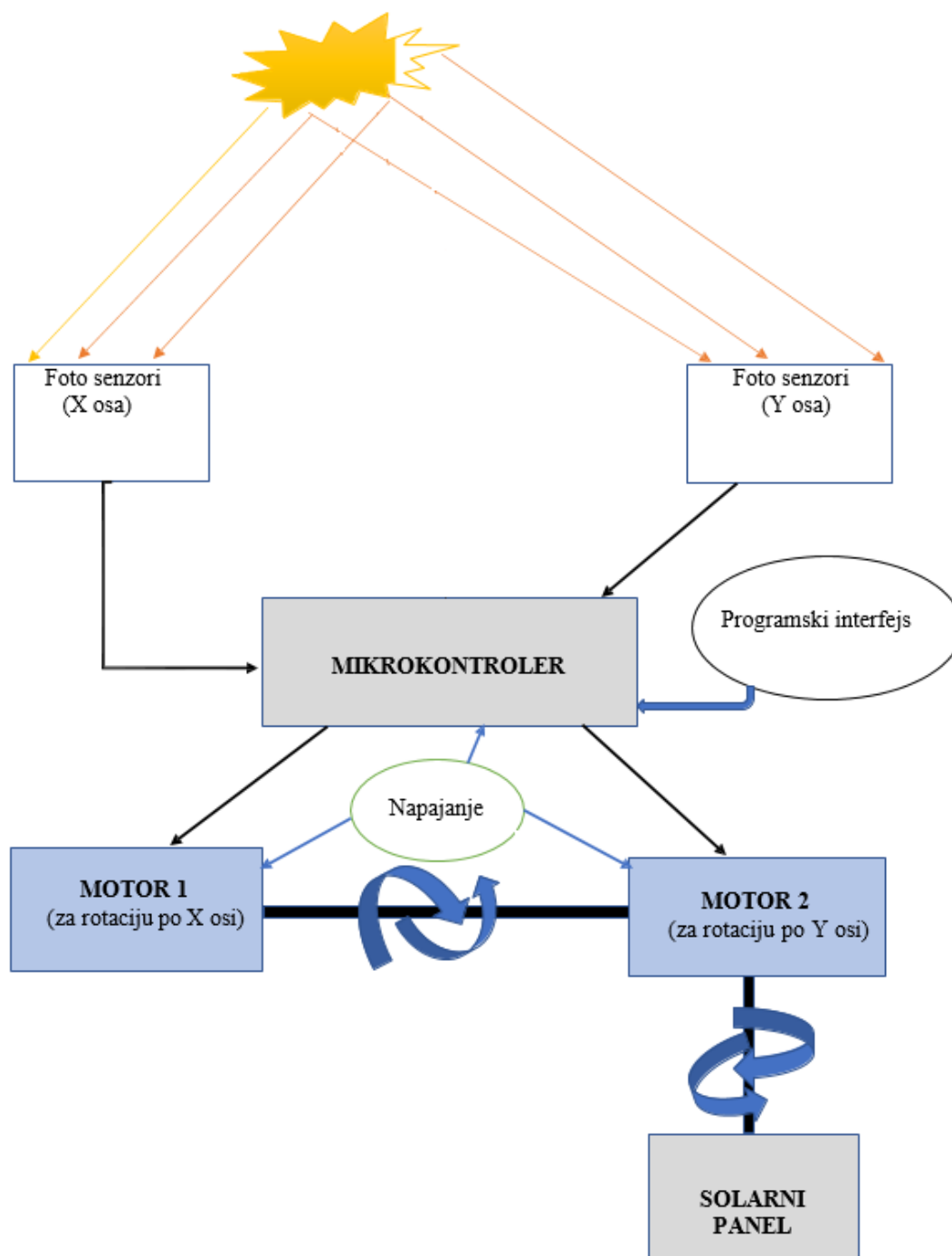
Hardverski model sistema za praćenje sunca dat je na slici 3.1.

Količina rotacije dva servo motora, koji rotiraju solarni panel u dvije ose, određen je mikrokontrolerom, na osnovu ulaza preuzetih sa četiri foto senzora koji se nalaze pored solarnog panela. Foto senzori funkcionišu na bazi otpornika zavisnih od svjetlosti(LDR), koji omogućavaju pretvaranje svjetlosti u napon. Postoje po dva senzora za dvije ose kretanja, u pravcu istok-zapad i sjever- jug.

Svaki LDR šalje ekvivalentan signal svoje odgovarajuće vrijednosti otpora mikrokontroleru koji je konfigurisan potrebnom programskom logikom.

Razlika između napona LDR-a se putem odgovarajućeg algoritma koristi za pokretanje servo motora, kako bi se na taj način osiguralo da dva LDR-a imaju jednak nagib. To znači da će primati istu količinu svjetlosti, a solarni panel će primati sunčevu svjetlost pod uglom od 90° (ravan PV panela će činiti ugao od 90° sa Suncem, a okomica nacrtana na ravni čini ugao 0° sa sunčevim zracima, da bi se obezbedilo maksimalno osvjetljenje: Lambertov kosinusni zakon).

Jedan od dva servo motora jednosmjerne struje je mehanički spojen sa pogonskom osovinom drugog tako da će se prvi kretati rotacijom osovine drugog. Osovine servo motora se koriste za pogon solarnog panela. Servo motori su raspoređeni na takav način da solarni panel može da se kreće duž X-ose(istok-zapad, lijevo-desno) kao i Y-ose(sjever-jug, odnosno gore dolje)

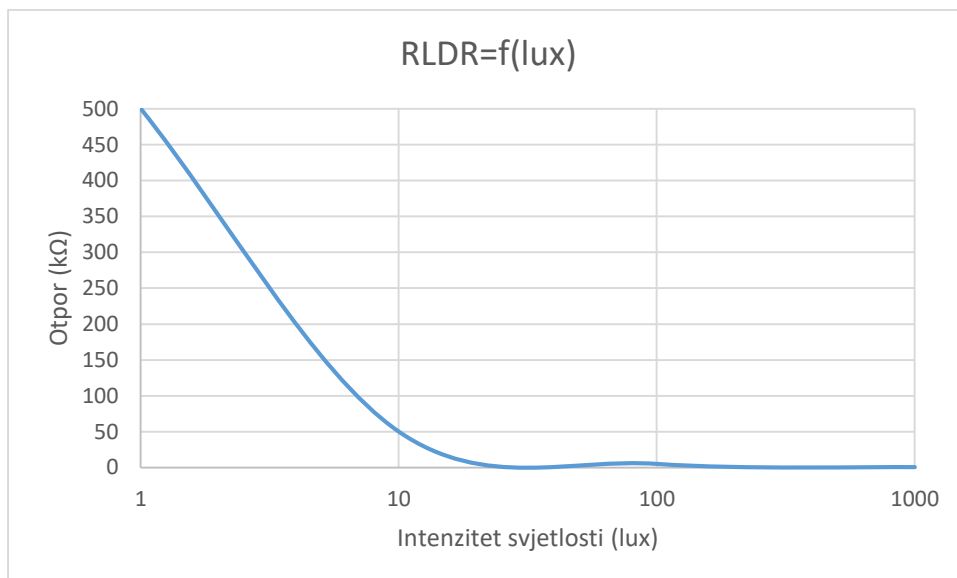


Slika 4.1 - HARDVERSKI MODEL – BLOK DIJAGRAM

(izvor - Sandipan Paul, Debasis Kumar Das, Sourav Basak, „Dual axis solar tracker”, referenca 58)

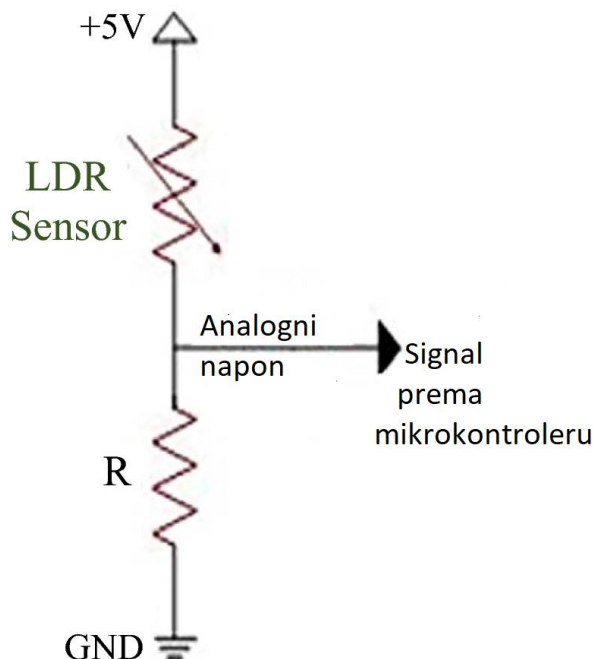
2. PRINCIP RADA FOTO SENZORA:

Otpor LDR senzora zavisi od intenziteta svjetlosti i varira u skladu sa njim. Što je jači intenzitet svjetlosti, manji će biti LDR otpor. Zavisnost otpora foto senzora(LDR) od intenziteta svjetlosti data je na slici 4.2.



Slika 4.2 – zavisnost otpora LDR foto senzora od intenziteta svjetlosti (excel grafik, autor D.Milić)

Pošto je kolo LDR senzora djelilac napona, analogno očitavanje napona sa serijskog otpora će se povećati kako se intenzitet svjetlosti povećava.



Slika 4.3 – Šema kolo LDR foto senzora(Izvor - Hamoumi Aboubakr, "A simple and low-cost active dual-axis solar tracker", referenca 2)

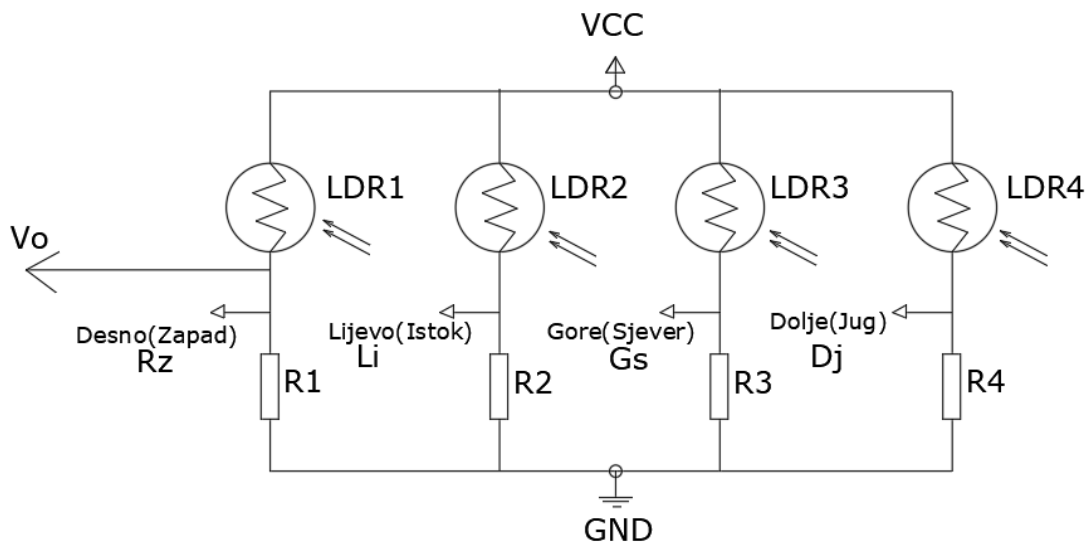


Slika 4.4 – Primijenjeni LDR foto senzor
(fotografija D. Milić)

Kada je izložen svjetlosti, otpor se kreće u rasponu od 5-10 K Ω . Kada je mrak otpor je samo 0,2 m Ω . Na osnovu ove osobine kolo LDR foto senzora pretvara promjenu otpora u promjenu napona. Kada se LDR poveže u kolo na način kako je dato na slici 4.5, onda se potencijal V_o mijenja odnosno povećava ili smanjuje prema sledećoj formuli $V_o = VCC(5V) * LDR1 / (R1 + LDR1)$ (2), odnosno za maksimalno osvetljenje biće iznad 5V, a za minimalno iznad 0V.

Nakon transformacije analognog signala u digitalni (kroz analogni digitalni konverter ADC integrisan u mikrokontroleru), na izlazu se dobija odgovarajući digitalni broj koji se kreće od 0 do 1024, jer je kodiran kao 10-bitni.

Ovo obezbeđuje povratnu informaciju mikrokontroleru koristeći algoritam, odnosno softverski kod. Tragač konačno prilagođava svoju poziciju osjećajući maksimalni intenzitet svjetlosti koja pada okomito na njega i ostaje tamo dok ne primijeti bilo kakvu dalju promjenu.



Slika 4.5 – blok četiri LDR foto senzora
(autor: D.Milić)

R_z , L_i , G_s i D_j su ekvivalentne informacije o intenzitetu svjetlosti sa LDR senzora Desno (Zapad), Lijevo (Istok), Gore (Sjever) and Dolje (Jug).

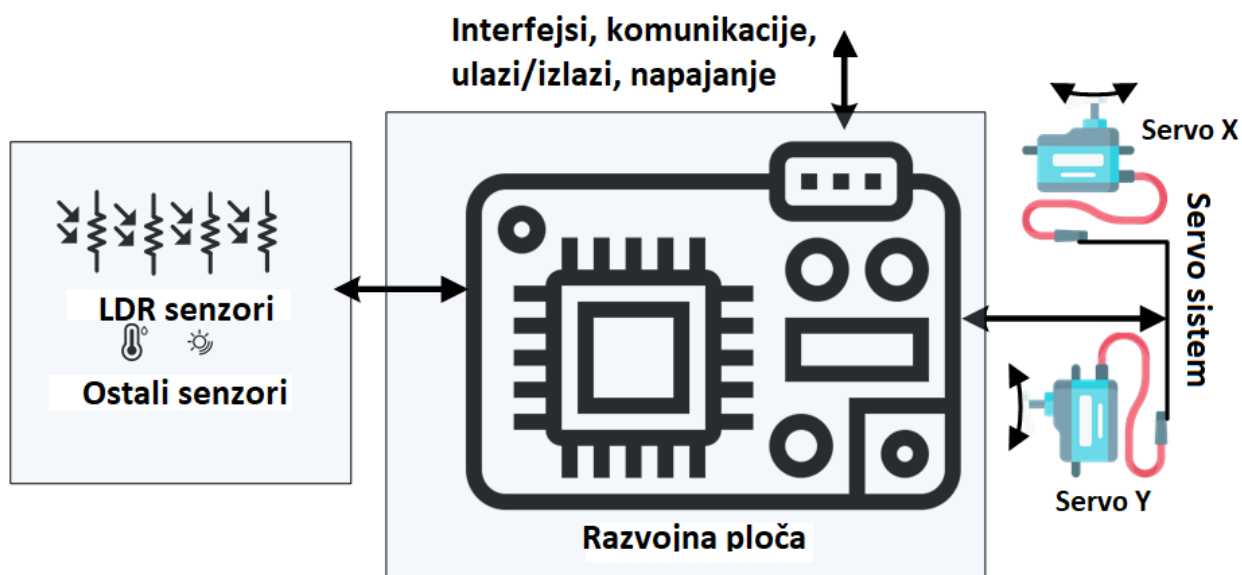
3. OSNOVNA ŠEMA KOLA

Na slici 3.5 prikazan je pregled potrebnog kola za solarni tragač sa dvije ose. Napajanje od 5V se dobija iz USB 5V DC izvora napona preko razvojne ploče Arduino UNO.

Servo X: Rotira solarni panel u pravcu X ose



Servo Y: Rotira solarni panel u pravcu Y ose



Slika 4.6 – pojednostavljena šema kola
(autor: R.Stojanović)

4. RAZVOJNA PLOČA

Arduino UNO razvojna ploča koja je korištena u ovom radu ima 14 digitalnih ulazno/izlaznih pinova (od kojih se 6 mogu koristiti kao PWM izlazi), 6 analognih ulaza, kristalni oscilator od 16 MHz, USB konekciju, priključak za napajanje, 1 ICSP zaglavlje i dugme za resetovanje.

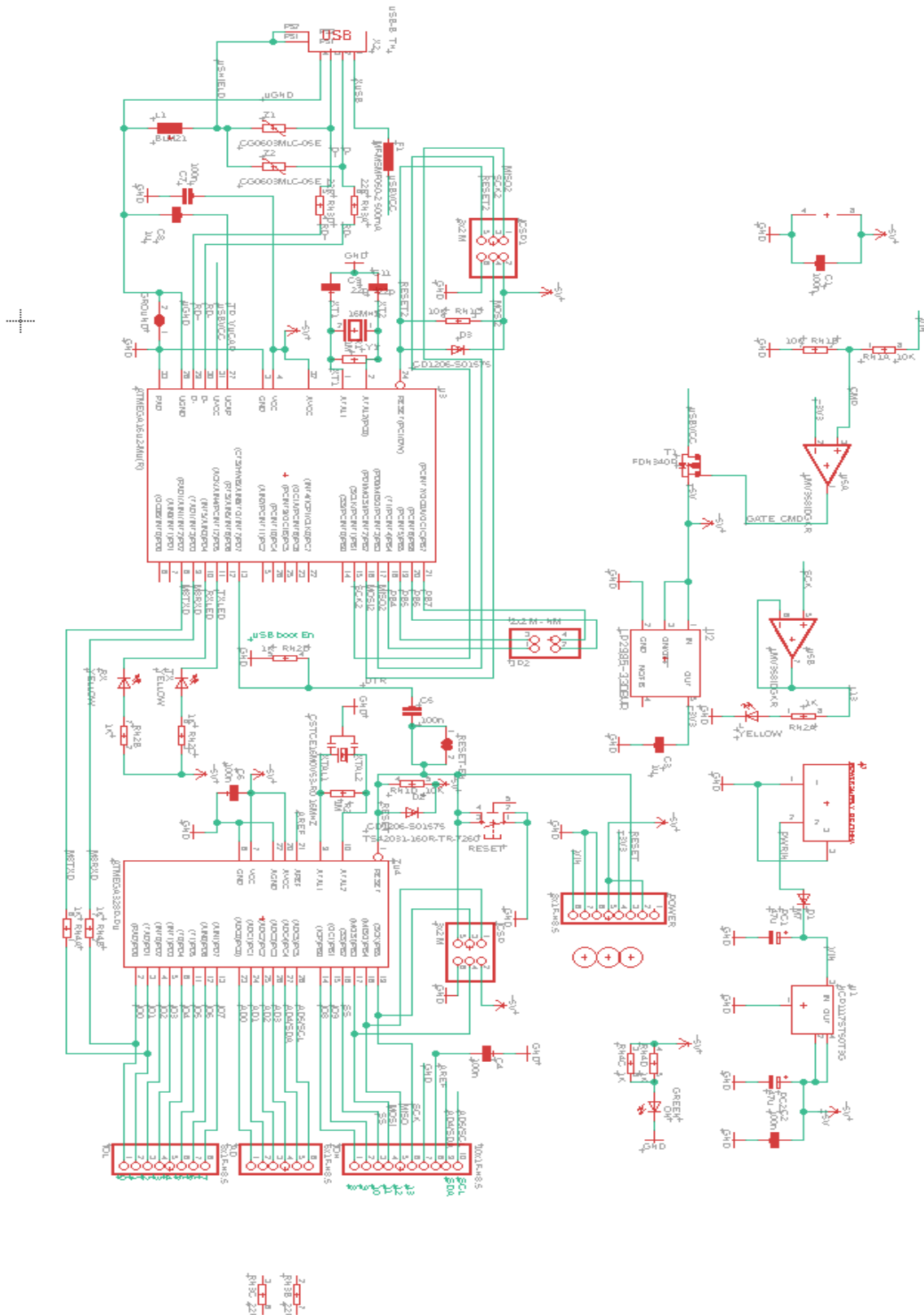
Povezuje se sa računarom preko USB kabla.

Osnovni procesor, odnosno mikrokontroler ove ploče je ATMEGA328P-AU.

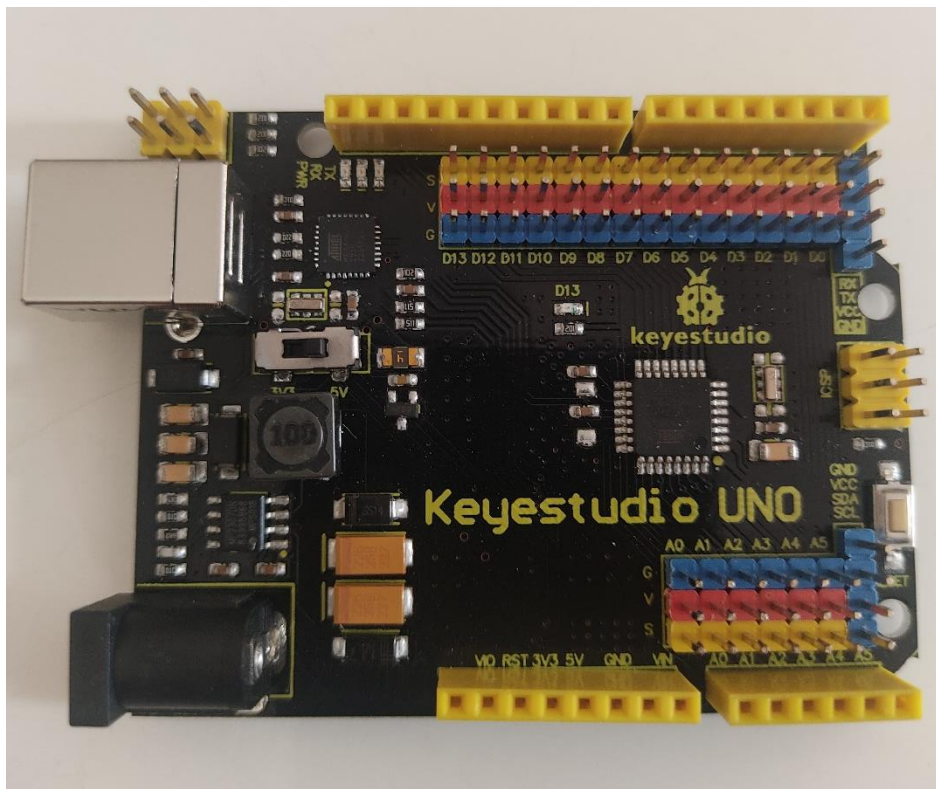
Posjeduje i čip ATMEGA16U2 koji može pretvoriti USB signal u signal serijskog porta (obavlja konverziju UART-u-USB).

Mikrokontroler	ATMEGA328P-AU
Operativni napon	5V
Ulazni napon (preporučeni)	DC7-12V
Digitalni I/O pinovi	14 ↑ (D0-D13)
PWM digitalni I/O pinovi	6 ↑ (D3, D5, D6, D9, D10 D11)
Analogni ulazni pinovi	6 ↑(A0-A5)
Fleš Memorija	32 KB (ATMEGA328P-PU) od kojih 0.5 KB koristi osnovni program(bootloader)
SRAM	2 KB (ATMEGA328P-PU)
EEPROM	1 KB (ATMEGA328P-PU)
Brzina sata(clock)	16 MHz

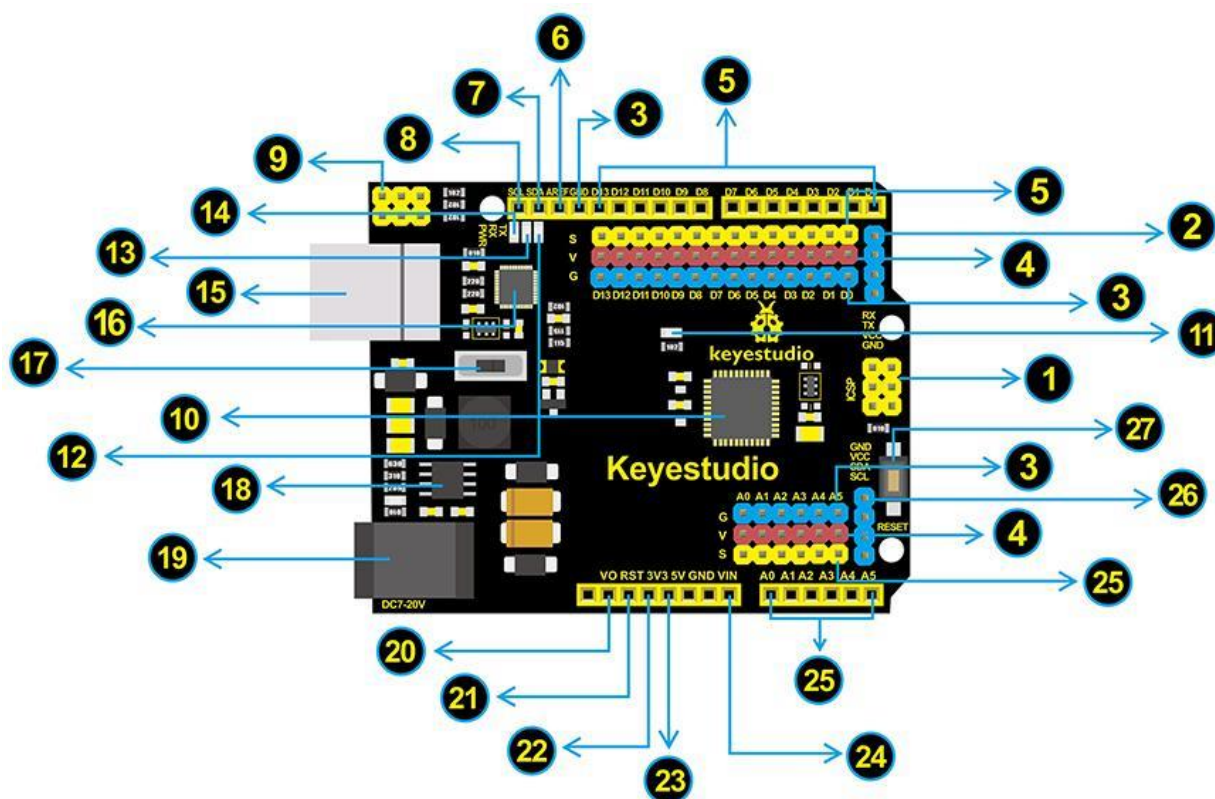
Tabela 4.1 – Osnovne karakteristike razvojne ploče (Izvor - <https://ks0530-keyestudio-solar-tracking-kit.readthedocs.io/en/latest/KS0530.html>)



Slika 4.7 – šema razvojne ploče
(izvor - <https://circuitscheme.com/arduino-uno.html/arduino-uno-schematic>)



Slika 4.8 – razvojna ploča (fotografija D. Milić)



Slika 4.9 – pozicija elemenata i interfejsa razvojne ploče
(Izvor - <https://ks0530-keyestudio-solar-tracking-kit.readthedocs.io/en/latest/KS0530.html>)

1	ICSP (In-Circuit Serial Programming) zaglavlje ICSP je AVR zaglavlje za serijsko programiranje Arduino mikro programa, sastoji se sastoji od MOSI, MISO, SCK, RESET, VCC i GND. Često se naziva SPI (serijski periferni interfejs) i može se smatrati "proširenjem" izlaza. U stvari, podešava izlazne uređaje pod hostom SPI magistrale. Povezan je na mikrokontroler ATMEGA328P-AU i kada se poveže sa računarom, programira firmver na njemu.
2	Pin za serijsku komunikaciju Ima 4 pina (GND, VCC (3.3V ili 5V kontrolisano kliznim prekidačem), RKS, TKS)
3	GND Pinoi za uzemljenje
4	V pinovi (VCC) Napajanje eksternih senzora i modula. Podešava se napon od 3.3V do 5V preko kliznog prekidača.
5	Digitalni ulazi/izlazi (I/O) Ima 14 digitalnih ulazno/izlaznih pinova, označenih od D0 do D13 (od kojih se 6 mogu koristiti kao PWM izlazi). Ovi pinovi se mogu konfigurisati kao pin digitalnog ulaza za čitanje logičke vrijednosti (0 ili 1). Ili se koristi kao digitalno izlazni pin za pogon različitih modula kao što su LED, relej, itd. Pinoi D3, D5, D6, D9, D10 i D11 se mogu koristiti za generisanje PWM-a. Na digitalni port može se konektovati preko ženskih zaglavlja ili preko pinova označenih sa S.
6	AREF AREF je analogni referentni pin za A/D konvertor. Ponekad se koristi za postavljanje spoljnog referentnog napona (0-5V) kao gornje granice analognih ulaznih pinova.
7	SDA IIC komunikacioni pin
8	SCL IIC komunikacioni pin
9	ICSP (In-Circuit Serial Programming) zaglavlje ICSP je AVR zaglavlje za serijsko programiranje Arduino mikro programa, sastoji se od MOSI, MISO, SCK, RESET, VCC i GND. Povezan je na mikrokontroler ATMEGA 16U2-MU i kada se poveže sa računarom, programira firmver na njemu.
10	Mikrokontroler Mikrokontroler ATMEGA328P-AU.
11	D13 LED dioda. LED dioda koju pokreće digitalni pin 13.
12	TX LED TX(transmit) transmisiona LED dioda Kada ploča komunicira preko serijskog porta, TX LED treperi.
13	RX LED RX(receive) prijemna LED dioda. Kada ploča komunicira preko serijskog porta, prima poruke, LED RX treperi.
14	Power LED LED dioda za napajanje, kad je uključena znači da je ploča ispravno uključena. U suprotnom LED je isključen.

15	USB veza Možete napajati ploču preko USB veze. Ili možete da snimate program na ploču preko USB porta. Povežite ploču sa računarom pomoću USB kabla preko USB porta.
16	ATMEGA 16U2-MU ATMEGA 16U2-MU čip pretvara USB signal u signal serijskog porta.
17	Klizni prekidač Služi za kontrolu napona pina V (VCC), 3,3V ili 5V
18	Regulator napona Služi za kontrolu napona za ploču, kao i za stabilizaciju korišćenog DC napona od strane procesora i drugih komponenti. Pretvara spoljni ulazni DC 7-12V napon u DC 5V za potrebe procesora i drugih komponente (struja je 2A).
19	DC priključak za napajanje Ploča se može napajati sa eksternim napajanjem DC 7-12V iz DC priključka za napajanje.
20	IOREF Koristi se za konfigurisanje radnog napona mikrokontrolera.
21	RESET zaglavlje Povezuje eksterno dugme za resetovanje ploče.
22	Pin 3V3 izlaz Obezbjeđuje izlazni napon od 3,3 V
23	Pin 5V izlaz Obezbjeđuje izlazni napon od 5 V
24	Vin Preko ovog pina na ploču se dovodi spoljni naponski ulaz DC7-12V
25	Analogni pinovi Ploča ima 6 analognih ulaza, označenih od A0 do A5. Mogu se koristiti i kao digitalni pinovi, A0=D14, A1=D15, A2=D16, A3=D17, A4=D18, A5=D19. Sa analognim portom, može se povezati preko ženskih zaglavlja, ili preko zaglavlja pinova označenih sa S.
26	IIC komunikacioni pinovi 4 pina (GND, VCC (3.3V ili 5V kontrolisano kliznim prekidačem), SDA, SCL)
27	RESET dugme. Resetuje ploču radi ponovnog pokretanja programa.

Tabela 4.2 – opis elemenata i interfejsa razvojne ploče

(Izvor - <https://ks0530-keyestudio-solar-tracking-kit.readthedocs.io/en/latest/KS0530.html>)

5. SERVO MOTORI

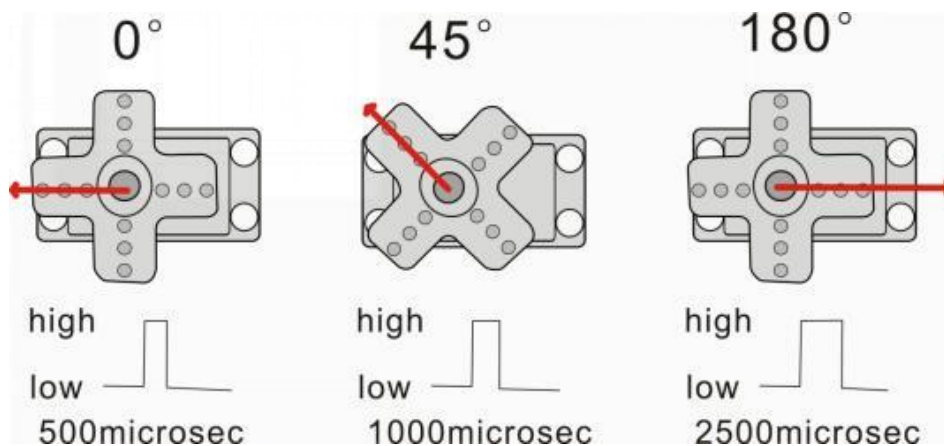
Servo motor je rotacioni aktuator za kontrolu položaja. Sastoji od kućišta, štampane ploče, motora bez jezgra, zupčanika i senzora položaja. Servo motor prima PWM signal sa mikrokontrolera.



Slika 4.10 – servo motor

(Izvor - <https://ks0530-keyestudio-solar-tracking-kit.readthedocs.io/en/latest/KS0530.html>)

Ugao rotacije servo motora se kontroliše regulacijom radnog ciklusa PWM (Pulse-Width Modulation) signala. Standardni ciklus PWM signala je 20ms (50Hz). Teoretski, širina je raspoređena između 1ms-2ms, ali u stvari je između 0,5ms-2,5ms. Širina odgovara uglu rotacije od 0° do 180°.



Slika 4.11 – ugao rotacije servo motora

(Izvor - <https://ks0530-keyestudio-solar-tracking-kit.readthedocs.io/en/latest/KS0530.html>)

Vrijeme trajanja impulsa	Ugao rotacije servo motora
0,5ms	0 stepeni
1ms	45 stepeni
1,5ms	90 stepeni
2ms	135 stepeni
2,5ms	180 stepeni

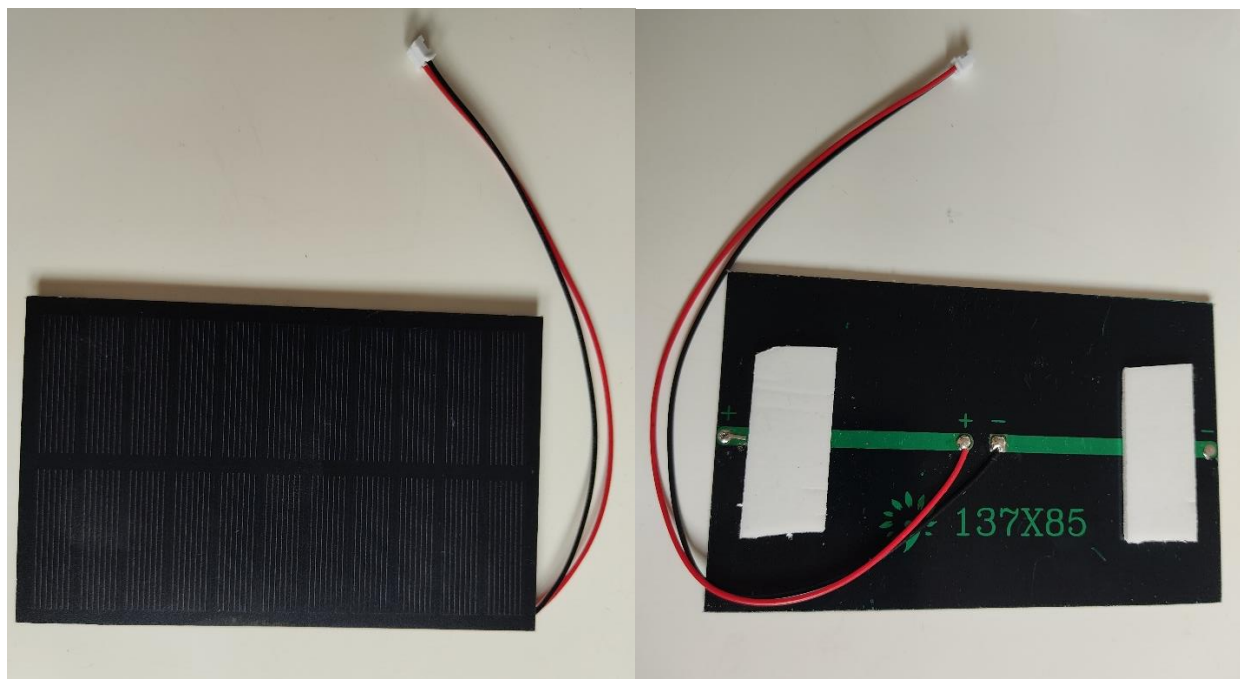
Tabela 4.3 – ugao rotacije servo motora

(Izvor - <https://ks0530-keyestudio-solar-tracking-kit.readthedocs.io/en/latest/KS0530.html>)

Parametri servo motora:

- Radni napon: DC 4.8V ~ 6V
- Opseg radnog ugla: oko 180 ° (na 500 → 2500 msec)
- Opseg širine impulsa: 500 → 2500 msec
- Brzina praznog hoda: 0,12 ± 0,01 sek / 60 (DC 4,8 V) 0,1 ± 0,01 sek / 60 (DC 6V)
- Struja praznog hoda: 200 ± 20 mA (DC 4,8 V) 220 ± 20 mA (DC 6 V)
- Zaustavni moment: 1,3 ± 0,01 kg • cm (DC 4,8 V) 1,5 ± 0,1 kg • cm (DC 6V)
- Zaustavna struja: ≤ 850mA (DC 4.8V) ≤ 1000mA (DC 6V)
- Struja pripravnosti: 3 ± 1 mA (DC 4,8 V) 4 ± 1 mA (DC 6 V)
- Dužina elektrode: 250 ± 5 mm
- Dimenzije: 22,9 * 12,2 * 30 mm
- Težina: 9 ± 1 g (bez servo sirene)

6. SOLARNI FOTONAPONSKI PANEL

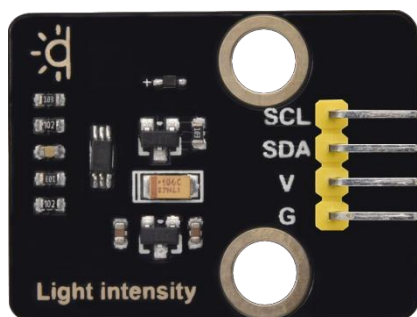


Slika 4.12 – fotografije solarnog panela, prednja i zadnja strana (fotografija D.Milić)

Osnovne karakteristike upotrijebljenog solarnog panela:

Dimenzije: 137x85mm
Tip – polikristalni
Maksimalna snaga: 1,2W
Izlazni napon: 3,7V

7. SENZOR INTENZITETA SVJETLOSTI BH1750



Slika 4.13 – lux senzor (fotografija D.Milić)

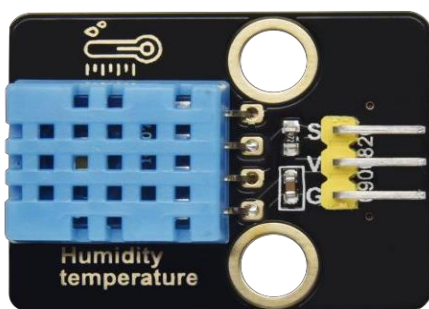
Senzor BH1750 sastoji se od integrisanog čipa BH1750FVI za digitalni intenzitet svjetlosti, fotodiode, operativnog pojačala, ADC(analogni digitalni konverter), kristalnog

oscilatora, itd. Fotodioda pretvara ulazni optički signal u električni signal kroz fotonaponski efekat. Nakon što je pojačan krugom operativnog pojačala, napon prikuplja ADC, a zatim se preko logičkog kola pretvara u 16-bitni binarni broj i skladišti u internom registru.

Karakteristike lux senzora:

- I2C digitalni interfejs, koji podržava maksimalnu brzinu od 400Kbps
- Izlaz je osvetljenje (lux)
- Opseg merenja je 1~65535 lux-a, minimalna rezolucija je 1 lux
- Niska potrošnja energije (isključivanje).
- Zaštite od smetnji izazvanih promjenama na frekvenciji mreže od 50/60Hz
- Podržava dve I2C adrese, koje bira ADDR pin
- Malo odstupanje mjerenja (maksimalna greška tačnosti +/-20%)
- SDA I2C pin podataka magistrale
- SCL I2C pin takta magistrale
- VCC napon napajanja 3-5V

8. SENZOR TEMPERATURE I VLAŽNOSTI – DHT11



Slika 4.14 – senzor temperature i vlažnosti (fotografija D. Milić)

DHT11 je kompozitni senzor koji sadrži kalibrisani digitalni signalni izlaz za temperaturu i vlažnost. Koristi tehnologiju akvizicije digitalnog modula i tehnologiju senzora temperature i vlažnosti, obezbeđujući visoku pouzdanost i odličnu dugoročnu stabilnost.

Parametri:

- Radni napon: +5 V
- Radna temperatura: 0-50 °C greška od ± 2 °C
- Vlažnost: 20-90% RH ± 5 % RH greška
- Interfejs: digitalni port

9. ENERGETSKI MODUL, BATERIJA I MODUL ZA PUNJENJE MOBILNOG TELEFONA

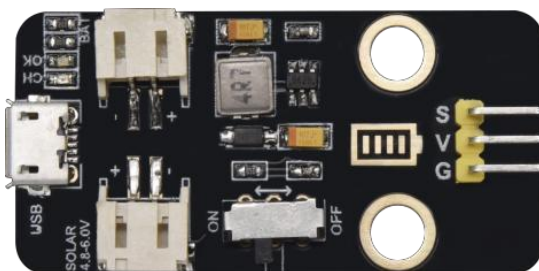
Energetski modul integriše čip za punjenje i pražnjenje, koji se može povezati sa eksternom punjivom baterijom preko PH2.0MM interfejsa.

Ima mikro USB port i priključak za punjenje sa solarnih panela, koji mogu da napajaju spoljnu litijumsku bateriju.

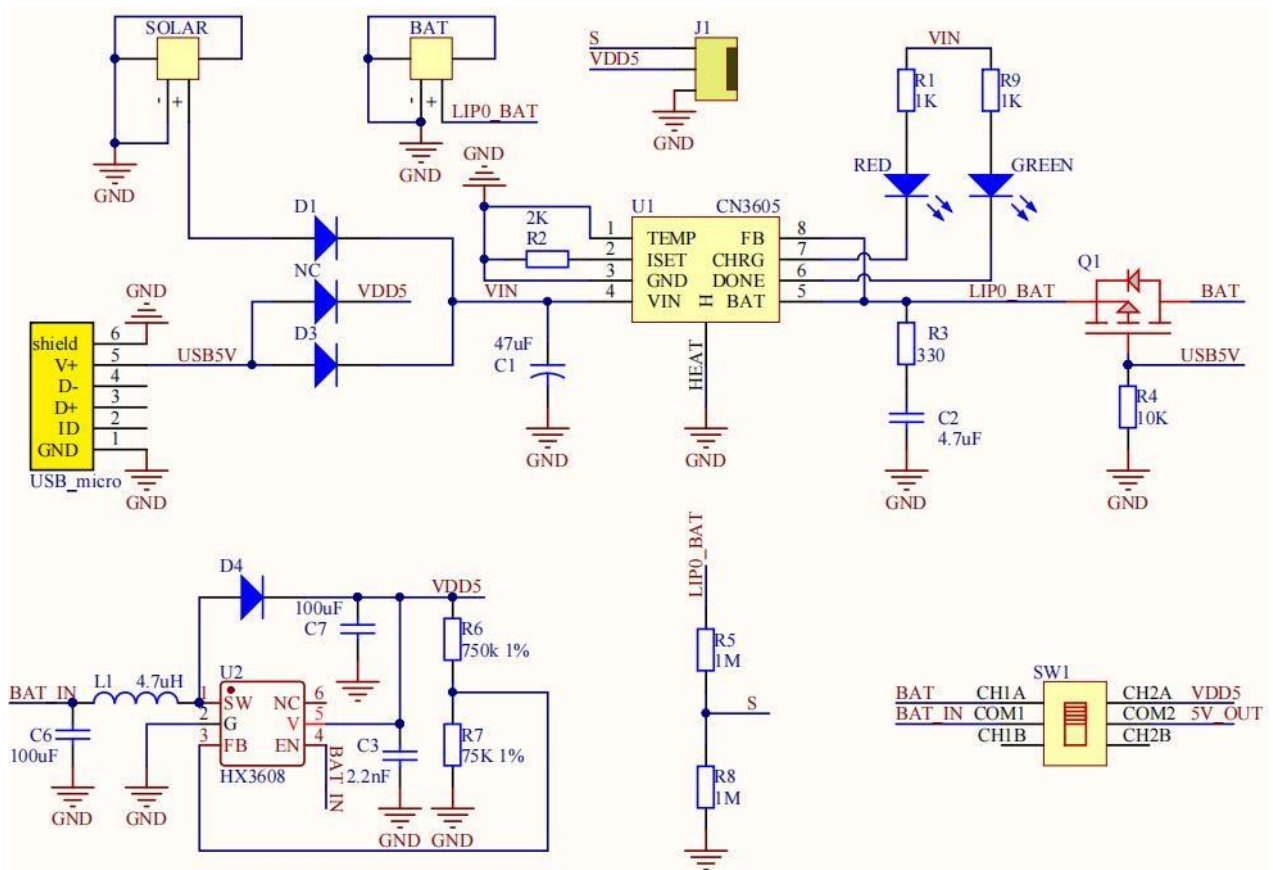
Ima modul za pojačavanje napona koji može povećati napon baterija na 6,6V.

DIP prekidač na modulu je OUTPUT prekidač od 6.6V.

Pin G i V mogu da daju 6,6V, a pin S može da očita napon baterije.



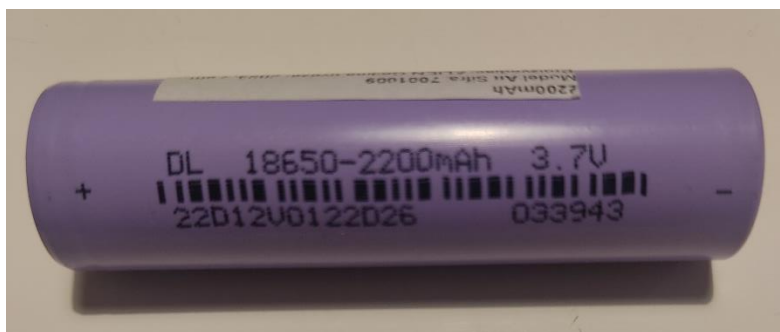
Slika 4.15 – energetski modul napajan solarnom energijom i preko USB
(fotografija D.Milić)



Slika 4.16 – šematski dijagram energetskeg modula
(Izvor - <https://ks0530-keyestudio-solar-tracking-kit.readthedocs.io/en/latest/KS0530.html>)

Port za punjenje	Mikro USB, HP2.0MM port za punjenja sa solarnih panela
Ulazni napon porta za solarne panele	4.4-6V
Konstantni napon punjenja	4.15-4.24V
Maksimalna struja punjenja	800mA
Izlazni port	3 P 2.54mm pin
Ulazni napon	6.6V
Maksimalna izlazna struja	1A
Baterija	Litijumska baterija 18640, 2200mAh, 3,7V

Tabela 4.4 – karakteristike energetskeg modula



Slika 4.17 – Litijum jonska punjiva baterija 3.7V, 2200mAh (fotografija D.Milić)



Slika 4.18 – modul za punjenje mobilnog telefona (fotografija D. Milić)

Modul za punjenje mobilnog telefona napaja se preko litijumske baterije od 3.7V, koja skladišti energiju proizvedenu putem solarnog fotonaponskog panela.

Modula na izlazu daje 5V, 1A preko PH2.0 terminala i USB porta.

Ulazni napon	1-5V
Izlazni napon	$5 \pm 0.1V$
Izlazna struja	1-1.5A napaja se litijumskom baterijom
Efikasnost konverzije	Do 96% .

Radna temperatura	-40°C do +85°C
Zagrijavanje pri punom opterećenju	30°C

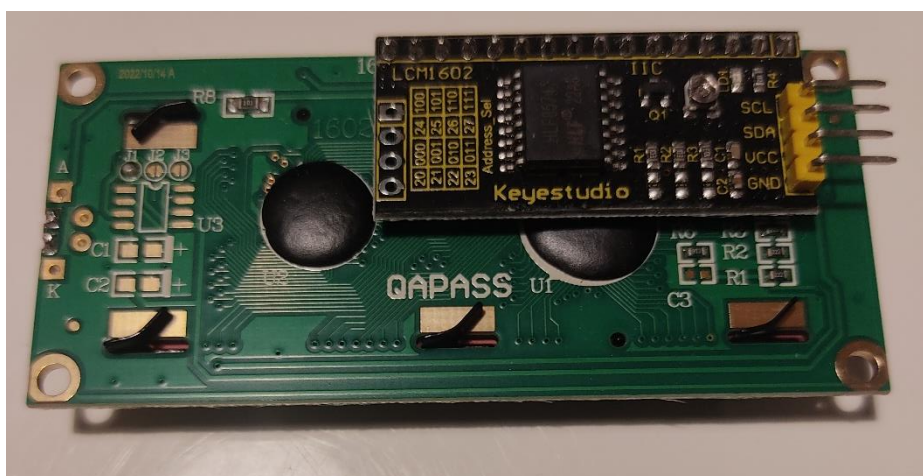
Tabela 4.5 – parametri modula za punjenje mobilnog telefona

10. LCD EKTRAN

LCD ekran sa I2C komunikacionim modulom može da prikaže 2 linije sa 16 znakova u redu.

Prikazuje plavu pozadinu i bijeli tekst, povezuje se na I2C interfejs

Na zadnjoj strani LCD ekrana nalazi se plavi potenciometar za podešavanje pozadinskog osvjetljenja.



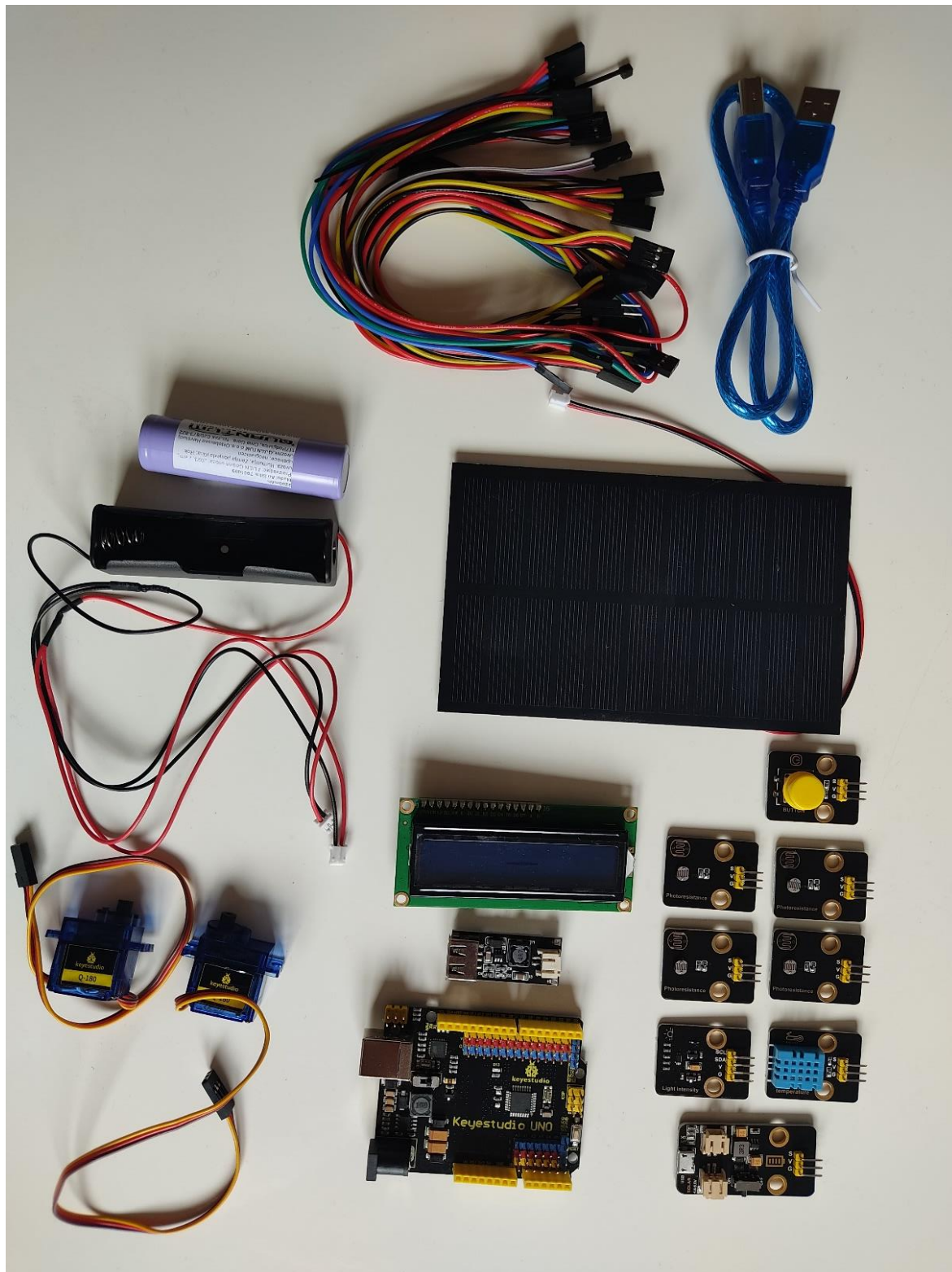
Slika 4.19 - LCD ekran (fotografije D.Milić)

Parametri LCD ekrana:

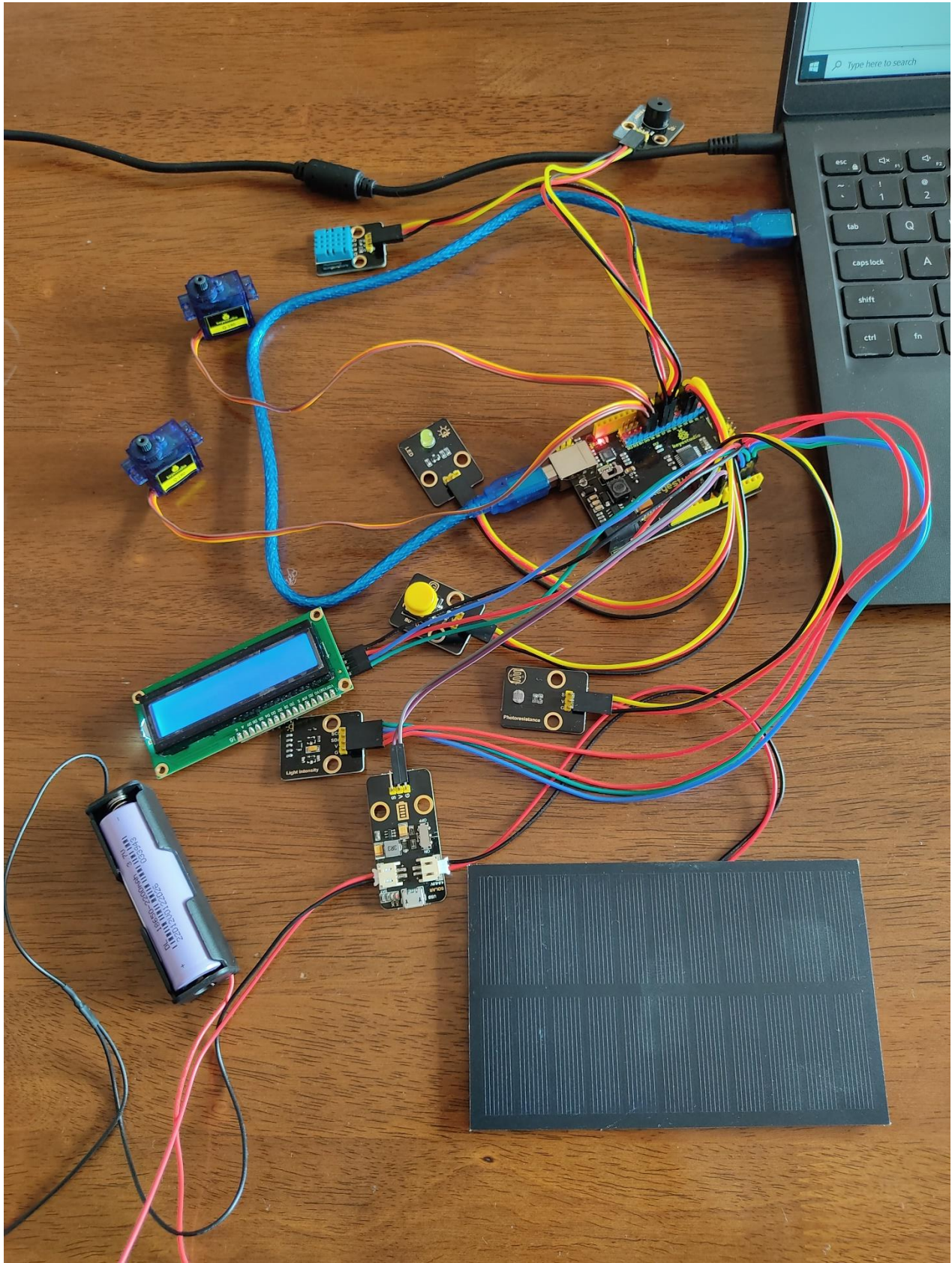
- I2C adresa: 0k27
- Pozadinsko osvjetljenje (plavo, bijelo)
- Napon napajanja: 5V
- Podesiv kontrast
- GND: Pin koji se povezuje sa masom
- VCC: Pin koji se povezuje na +5V napajanje
- SDA: Pin koji se povezuje na analogni port 20 za IIC komunikaciju
- SCL: Pin koji se povezuje na analogni port 21 za IIC komunikaciju

11. POVEZIVANJE I TESTIRANJE KOMPONENTI

Komponente na fotografiji ispod povezane su na razvojnu ploču, a razvojna ploča na računar radi testiranja i ispitivanja funkcionalnosti prije sklapanja prototipa.



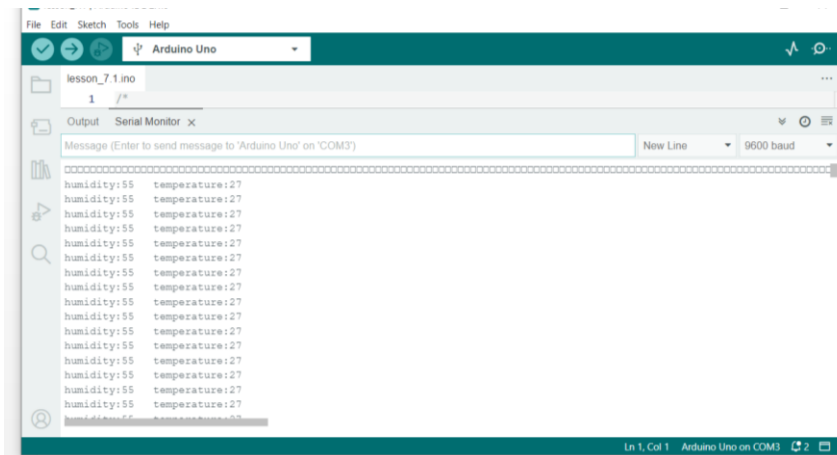
Slika 4.20 – Upotrijebljene komponente sistema (fotografija D.Milić)



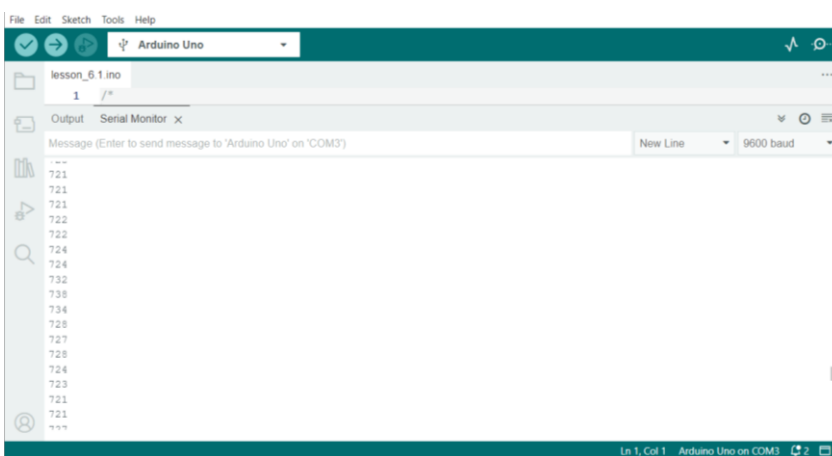
Slika 4.21 – Testiranje komponenti sistema (fotografija D. Milić)

Komponente su testirane upotrebom Arduino Uno softverskog paketa, preko koga su odgovarajući softverski kodovi kompajlirani i snimljeni preko USB kabela na mikrokontroler razvojne ploče radi testiranja funkcionalnosti pojedinih komponenti.

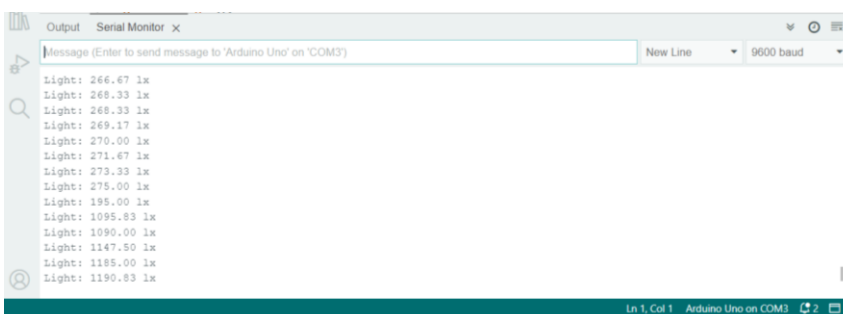
Na slikama ispod dati su primjeri rezultata testiranja, senzora temperature i vlažnosti, foto senzora i lux senzora.



Slika 4.22 – testiranje funkcionalnosti senzora temperature i vlažnost
(print screen D. Milić)



Slika 4.23 – testiranje funkcionalnosti foto senzora (print screen D. Milić)

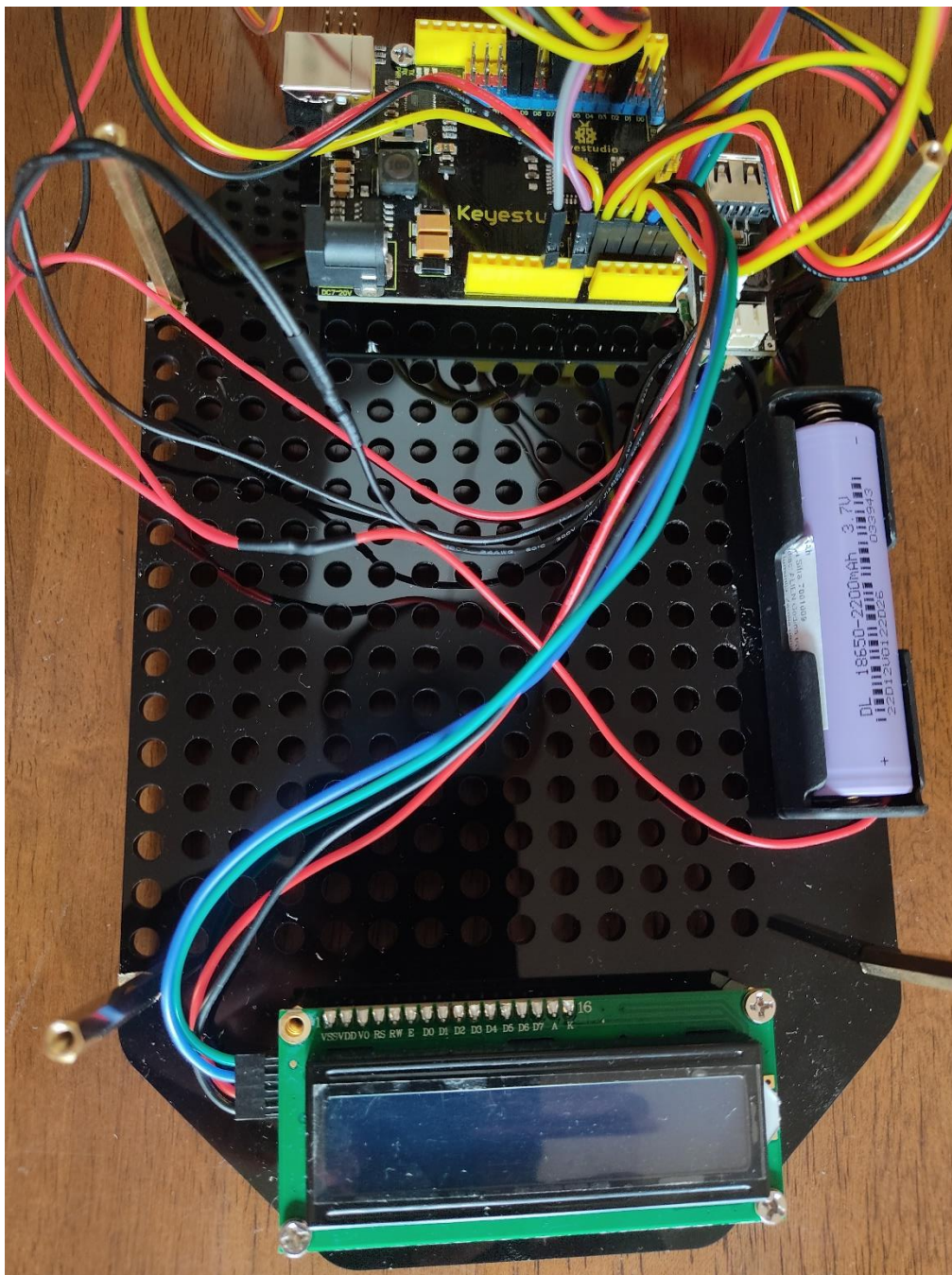


Slika 4.24. – testiranje funkcionalnosti lux senzora (print screen D. Milić)

12. FORMIRANJE PROTOTIPA

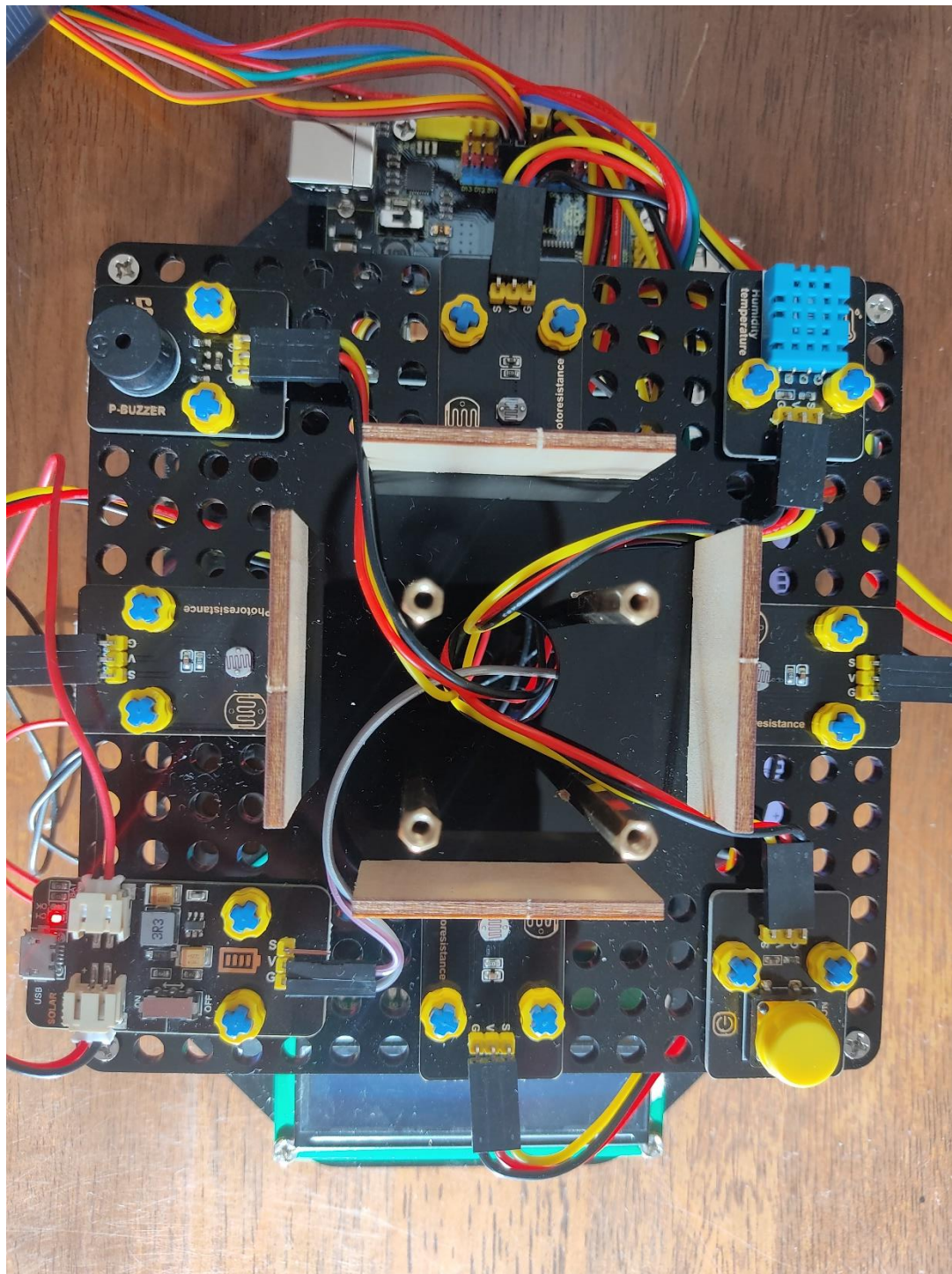
Nakon testiranja svih komponenti pristupilo se sklapanju prototipa montažom komponenti na perforiranim akrilnim pločama.

Na donjoj akrilnoj ploči montirane su razvojna ploča, LCD ekran, litijumska baterija sa držačem i modul za punjenje mobilnog telefona kao što se vidi na fotografiji ispod.



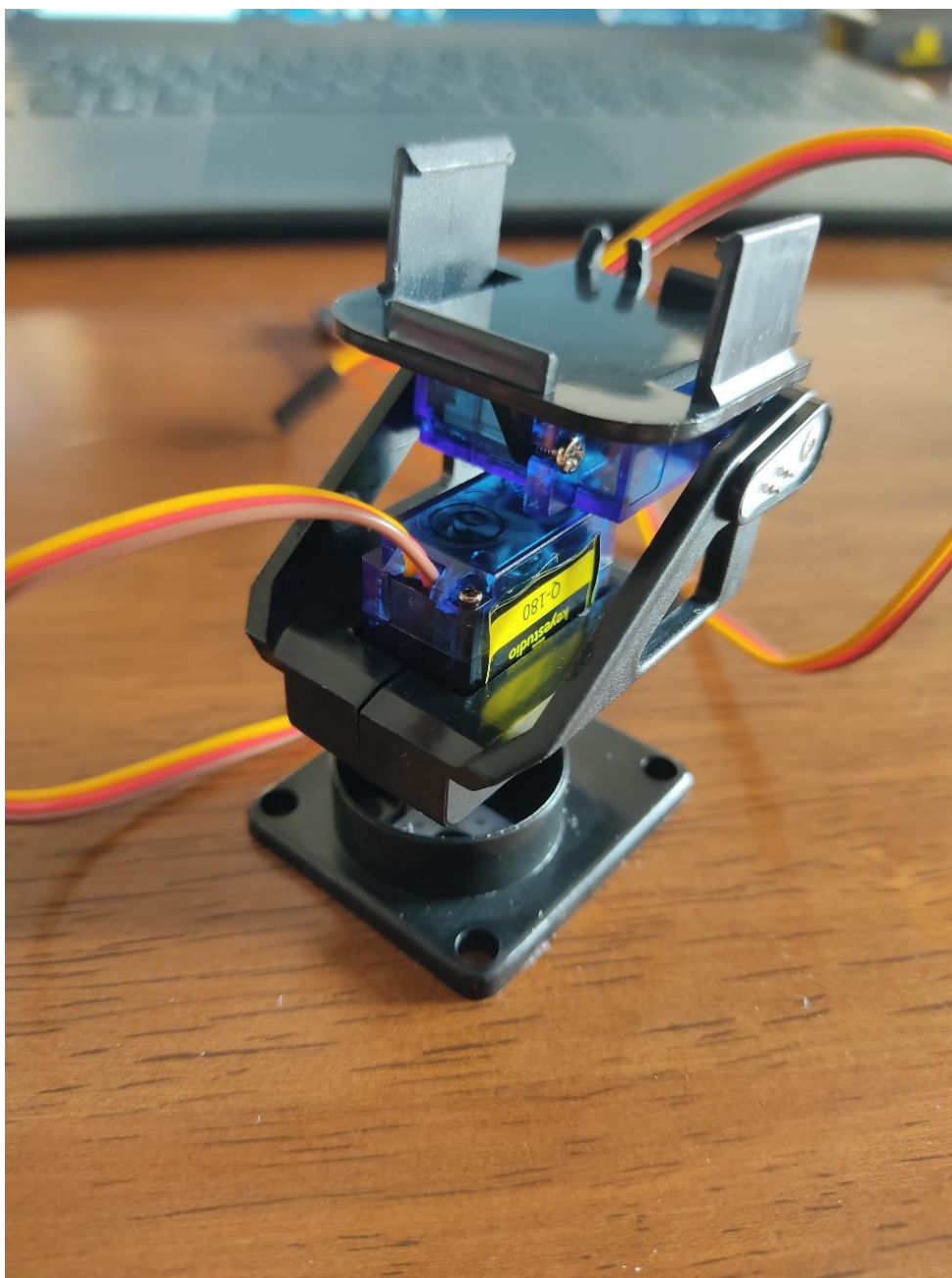
Slika 4.25 – komponente montirane na donjoj ploči (fotografija D.Milić)

Na gornjoj ploči montirani su foto senzori na sve 4 strane svijeta, senzor temperature i vlažnosti, energetski modul i modul sa dugmetom.

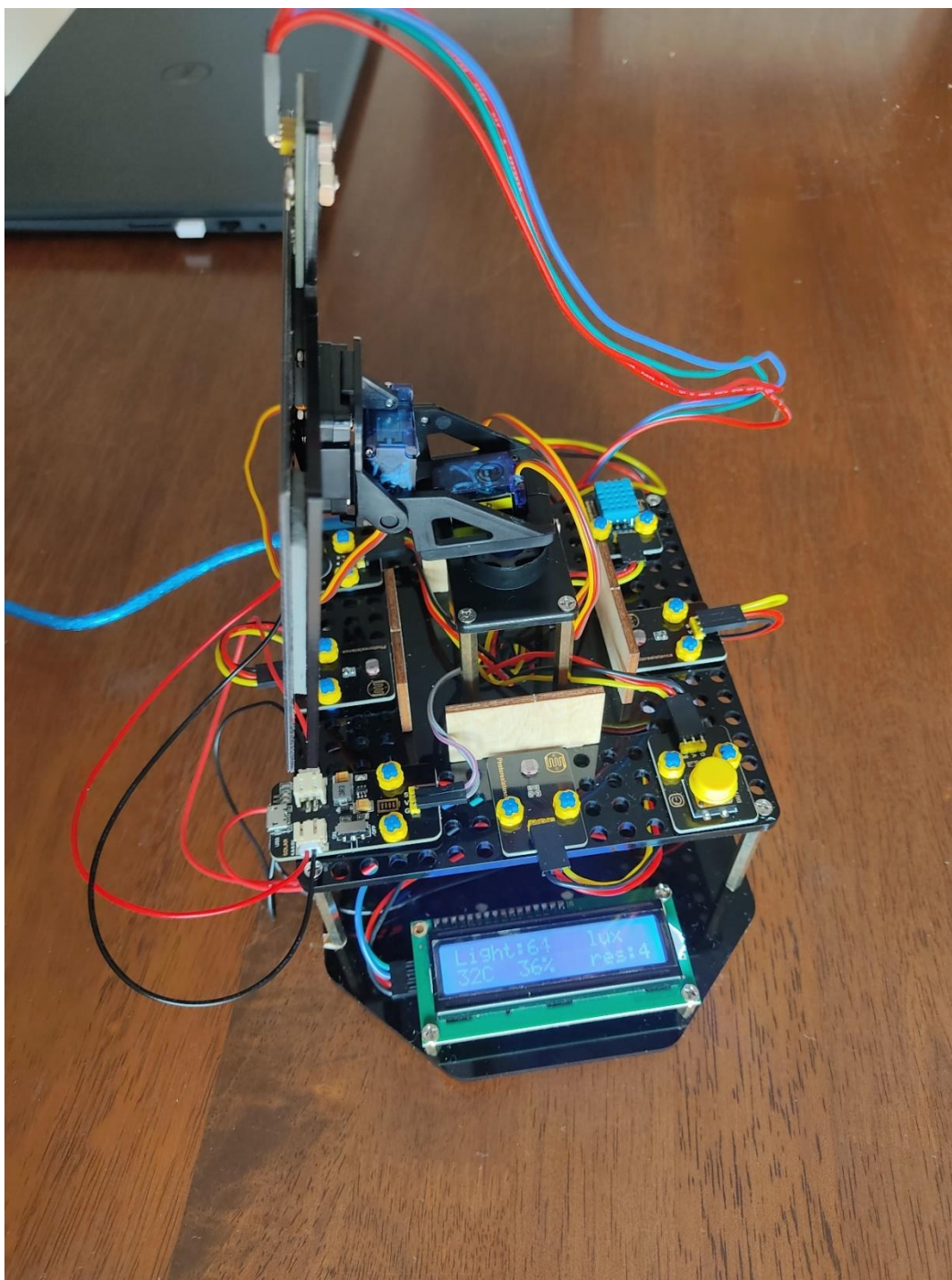


Slika 4.26 – komponente montirane na gornjoj ploči (fotografija D. Milić)

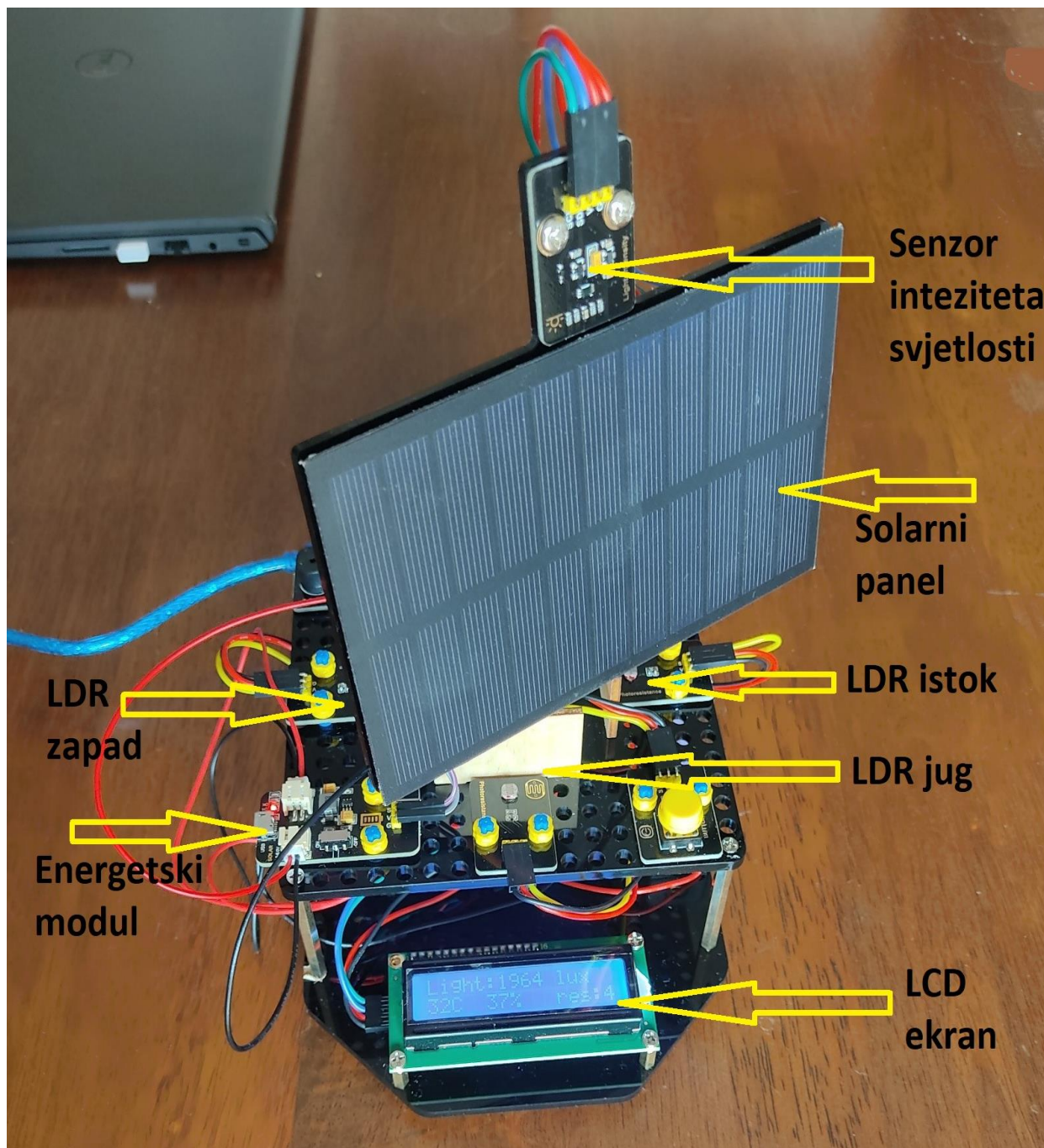
Motori su montirani na pokretni mehanizam na koji je montiran mini solarni fotonaponski panel da bi se omogućilo kretanje panela po dvije ose, po azimutu(istok- zapad, odnosno lijevo-desno) i po uglu nagiba sunčeve putanje(sjever-jug, odnosno gore-dolje), kako bi se omogućilo da panel uvijek bude pod pravim uglom u odnosu na sunčeve zrake, da bi se obezbijedila veća efikasnost u proizvodnji električne energije.



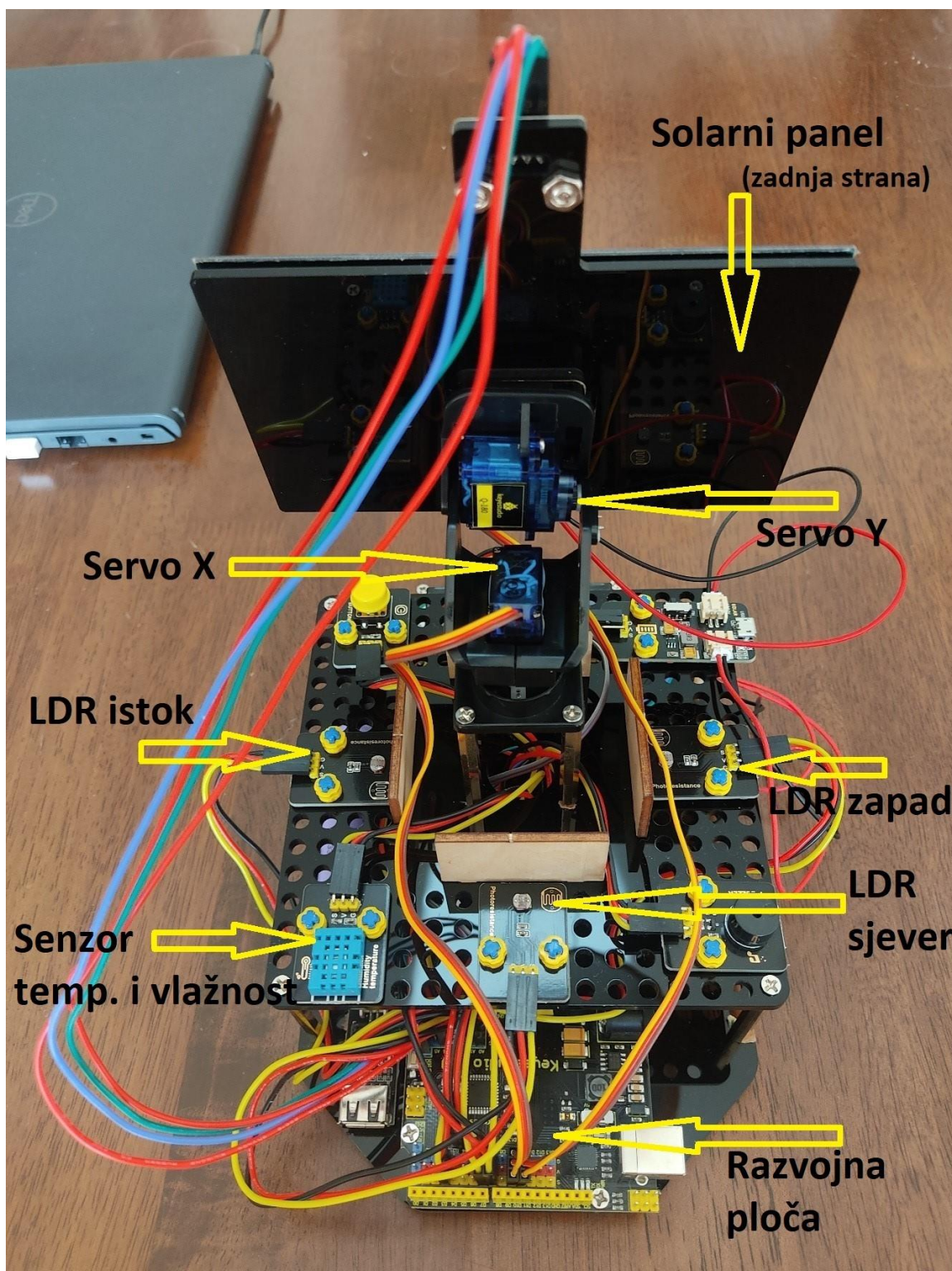
Slika 4.27. Servo motori montirani na pokretni mehanizam (fotografija D. Milić)



Slika 4.28 – Mehanizam sa motorima i solarnom panelom montiran na gornjoj ploči
(fotografija D. Milić)



Slika 4.29 – izgled prototipa sa prednje strane (fotografija i obrada D. Milić)



Slika 4.30 - izgled prototipa sa zadnje strane (fotografija i obrada D. Milić)

13. SOFTVERSKA IMPLEMENTACIJA

Implementacija softvera se sastoji od kodiranja algoritma sistema za praćenje u Arduino IDE okruženju i učitavanja koda u mikrokontroler.

Dijagram toka koji opisuje rad mikrokontrolera predstavljen je na slici 4.31.

Algoritam se zasniva na upoređivanju analognih vrijednosti napona koje daju foto senzori (lijevi, desni, gornji i donji LDR).

Za praćenja azimuta, upoređuju se vrijednosti napona sa lijevog i desnog LDR-a.

Ako lijevi (istočni) LDR primi više svjetlosti, napon na lijevom LDR biće veći od napona na desnom LDR i horizontalni motor će se okretati prema lijevo (na istok).

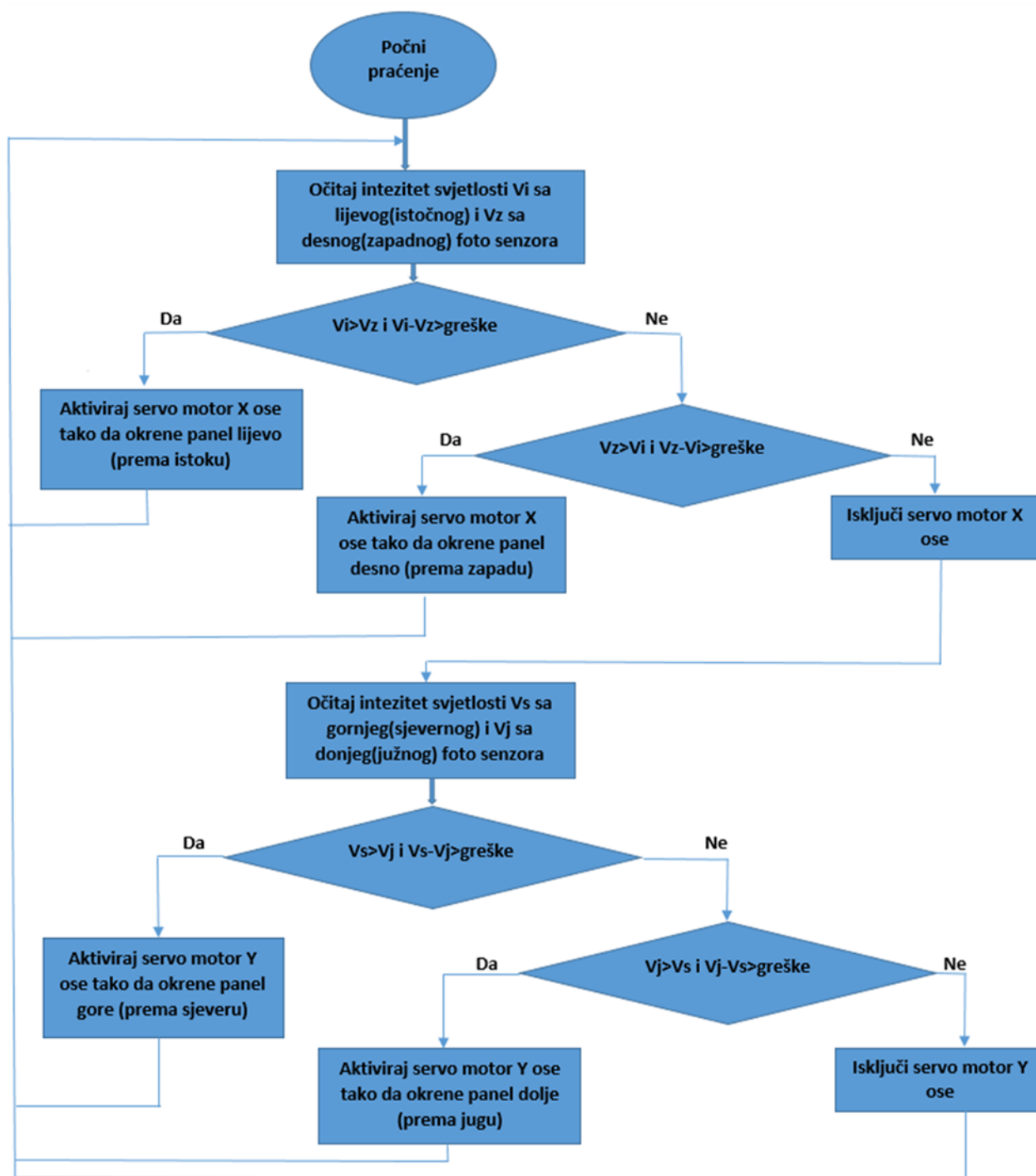
Ako desni (zapadni) LDR primi više svjetlosti, napon na desnom LDR biće veći nego na lijevom i horizontalni servo motor će se kretati u tom smjeru, odnosno desno (prema zapadu).

Za praćenje ugla nagiba, upoređuje se vrijednost napona sa gornjeg i donjeg LDR-a.

Ako gornji (sjeverni) LDR primi više svjetlosti, napon na gornjem LDR biće veći od napona na donjem LDR i vertikalni motor će se okretati prema gore (na sjever).

Ako donji (južni) LDR primi više svjetlosti, napon na donjem LDR biće veći nego na gornjem LDR i vertikalni servo motor će se kretati prema dolje (na jug).

Da bi se izbjeglo stalno kretanje odnosno vibriranje motora, uvedena je minimalni razlika u naponima ("greška"), koja treba da bude manja od razlika u naponima između dva senzora da bi se motor pokrenuo.



Slika 4.31 – algoritam upravljanja (autor D. Milić)

14. PROGRAMSKI KOD

```
/*
  sun_follower
  http://www.keyestudio.com
*/
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);

#include <BH1750.h>
BH1750 lightMeter;

#include <dht11.h> //include the library code:
dht11 DHT;
#define DHT11_PIN 7 //define the DHT11 as the digital pin 7

#include <Servo.h>
Servo lr_servo;//define the name of the servo rotating right and left
Servo ud_servo;//efine the name of the servo rotating upwards and downwards

const byte interruptPin = 2; //the pin of button;the corruption is disrupted

int lr_angle = 90;//set the initial angle to 90 degree
int ud_angle = 10;//set the initial angle to 10 degree;keep the solar panels upright to detect the
strongest light
int l_state = A0;//define the analog voltage input of the photoresistors
int r_state = A1;
int u_state = A2;
int d_state = A3;
const byte buzzer = 6; //set the pin of the buzzer to digital pin 6
const byte lr_servopin = 9;//define the control signal pin of the servo rotating right and lef
const byte ud_servopin = 10;//define the control signal pin of the servo rotating clockwise and
anticlockwise

unsigned int light; //save the variable of light intensity
byte error = 15;//Define the error range to prevent vibration
byte m_speed = 10;//set delay time to adjust the speed of servo;the longer the time, the smaller the
speed
byte resolution = 1; //set the rotation accuracy of the servo, the minimum rotation angle
int temperature; //save the variable of temperature
int humidity; //save the variable of humidity

void setup() {
  Serial.begin(9600); //define the serial baud rate
  // Initialize the I2C bus (BH1750 library doesn't do this automatically)
  Wire.begin();
```

```

lightMeter.begin();
lr_servo.attach(lr_servopin); // set the control pin of servo
ud_servo.attach(ud_servopin); // set the control pin of servo
pinMode(l_state, INPUT); //set the mode of pin
pinMode(r_state, INPUT);
pinMode(u_state, INPUT);
pinMode(d_state, INPUT);

pinMode(interruptPin, INPUT_PULLUP); //the button pin is set to input pull-up mode
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(interruptPin), adjust_resolution, FALLING); //external
interrupt touch type is falling edge; adjust_resolution is interrupt service function ISR

lcd.init(); // initialize the LCD
lcd.backlight(); //set LCD backlight

lr_servo.write(lr_angle); //return to initial angle
delay(1000);
ud_servo.write(ud_angle);
delay(1000);

}

void loop() {
  ServoAction(); //servo performs the action
  read_light(); //read the light intensity of bh1750
  read_dht11(); //read the value of temperature and humidity
  LcdShowValue(); //Lcd shows the values of light intensity, temperature and humidity

  //erial monitor displays the resistance of the photoresistor and the angle of servo
  /*Serial.print(" L ");
  Serial.print(L);
  Serial.print(" R ");
  Serial.print(R);
  Serial.print(" U ");
  Serial.print(U);
  Serial.print(" D ");
  Serial.print(D);
  Serial.print(" ud_angle ");
  Serial.print(ud_angle);
  Serial.print(" lr_angle ");
  Serial.println(lr_angle);*/
  // delay(1000); //During the test, the serial port data is received too fast, and it can be adjusted by
  adding delay time */
}

/*****the function of the servo*****/
void ServoAction(){
  int L = analogRead(l_state); //read the analog voltage value of the sensor, 0-1023
  int R = analogRead(r_state);
  int U = analogRead(u_state);

```

```

int D = analogRead(d_state);
/*****system adjusting left and right序*****/
// abs() is the absolute value function
if (abs(L - R) > error && L > R) { //Determine whether the error is within the acceptable range,
otherwise adjust the steering gear
  lr_angle -= resolution;//reduce the angle
  // lr_servo.attach(lr_servopin); // connect servo
  if (lr_angle < 0) { //limit the rotation angle of the servo
    lr_angle = 0;
  }
  lr_servo.write(lr_angle); //output the angle of the servooutput the angle of servo
  delay(m_speed);
}
else if (abs(L - R) > error && L < R) { //Determine whether the error is within the acceptable
range, otherwise adjust the steering gear
  lr_angle += resolution;//increase the angle
  // lr_servo.attach(lr_servopin); // connect servo
  if (lr_angle > 180) { //limit the rotation angle of servo
    lr_angle = 180;
  }
  lr_servo.write(lr_angle); //output the angle of servo
  delay(m_speed);
}
else if (abs(L - R) <= error) { //Determine whether the error is within the acceptable range,
otherwise adjust the steering gear
  // lr_servo.detach(); //release the pin of servo
  lr_servo.write(lr_angle); //output the angle of servo
}
/*****system adjusting up and down*****/
if (abs(U - D) > error && U >= D) { //Determine whether the error is within the acceptable
range, otherwise adjust the steering gear
  ud_angle -= resolution;//reduce the angle
  // ud_servo.attach(ud_servopin); // connect servo
  if (ud_angle < 10) { //limit the rotation angle of servo
    ud_angle = 10;
  }
  ud_servo.write(ud_angle); //output the angle of servo
  delay(m_speed);
}
else if (abs(U - D) > error && U < D) { //Determine whether the error is within the acceptable
range, otherwise adjust the steering gear
  ud_angle += resolution;//increase the angle
  // ud_servo.attach(ud_servopin); // connect servo
  if (ud_angle > 90) { //limit the rotation angle of servo
    ud_angle = 90;
  }
  ud_servo.write(ud_angle); //output the angle of servo
}

```

```
    delay(m_speed);
  }
  else if (abs(U - D) <= error) { //Determine whether the error is within the acceptable range. If it
is, keep it stable and make no change in angle
    // ud_servo.detach(); //release the pin of servo
    ud_servo.write(ud_angle); //output the angle of servo
  }
}

void LcdShowValue() {
  char str1[5];
  char str2[2];
  char str3[2];
  dtostrf(light, -5, 0, str1); //Format the light value data as a string, left-aligned
  dtostrf(temperature, -2, 0, str2);
  dtostrf(humidity, -2, 0, str3);
  //LCD1602 display
  //display the value of the light intensity
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Light:");
  lcd.setCursor(6, 0);
  lcd.print(str1);
  lcd.setCursor(11, 0);
  lcd.print("lux");

  //display the value of temperature and humidity
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print(temperature);
  lcd.setCursor(2, 1);
  lcd.print("C");
  lcd.setCursor(5, 1);
  lcd.print(humidity);
  lcd.setCursor(7, 1);
  lcd.print("%");

  //show the accuracy of rotation
  lcd.setCursor(11, 1);
  lcd.print("res:");
  lcd.setCursor(15, 1);
  lcd.print(resolution);
  /*if (light < 10) {
    lcd.setCursor(7, 0);
    lcd.print("    ");
    lcd.setCursor(6, 0);
    lcd.print(light);
  } else if (light < 100) {
    lcd.setCursor(8, 0);
    lcd.print("    ");
    lcd.setCursor(6, 0);
    lcd.print(light);
  }
}
```

```

    } else if (light < 1000) {
    lcd.setCursor(9, 0);
    lcd.print("  ");
    lcd.setCursor(6, 0);
    lcd.print(light);
    } else if (light < 10000) {
    lcd.setCursor(9, 0);
    lcd.print("  ");
    lcd.setCursor(6, 0);
    lcd.print(light);
    } else if (light < 100000) {
    lcd.setCursor(10, 0);
    lcd.print("  ");
    lcd.setCursor(6, 0);
    lcd.print(light);
    }*/
}

void read_light(){
  light = lightMeter.readLightLevel(); //read the light intensity detected by BH1750
}

void read_dht11(){
  int chk;
  chk = DHT.read(DHT11_PIN);    // read data
  switch (chk) {
    case DHTLIB_OK:
      break;
    case DHTLIB_ERROR_CHECKSUM: //check and return error
      break;
    case DHTLIB_ERROR_TIMEOUT: //Timeout and return error
      break;
    default:
      break;
  }
  temperature = DHT.temperature;
  humidity = DHT.humidity;
}

/*****function disrupts service*****/
void adjust_resolution() {
  tone(buzzer, 800, 100);
  delay(10); //delay to eliminate vibration
  if (!digitalRead(interruptPin)){
    if(resolution < 5){
      resolution++;
    }else{
      resolution = 1;
    }
  }
}

```

}

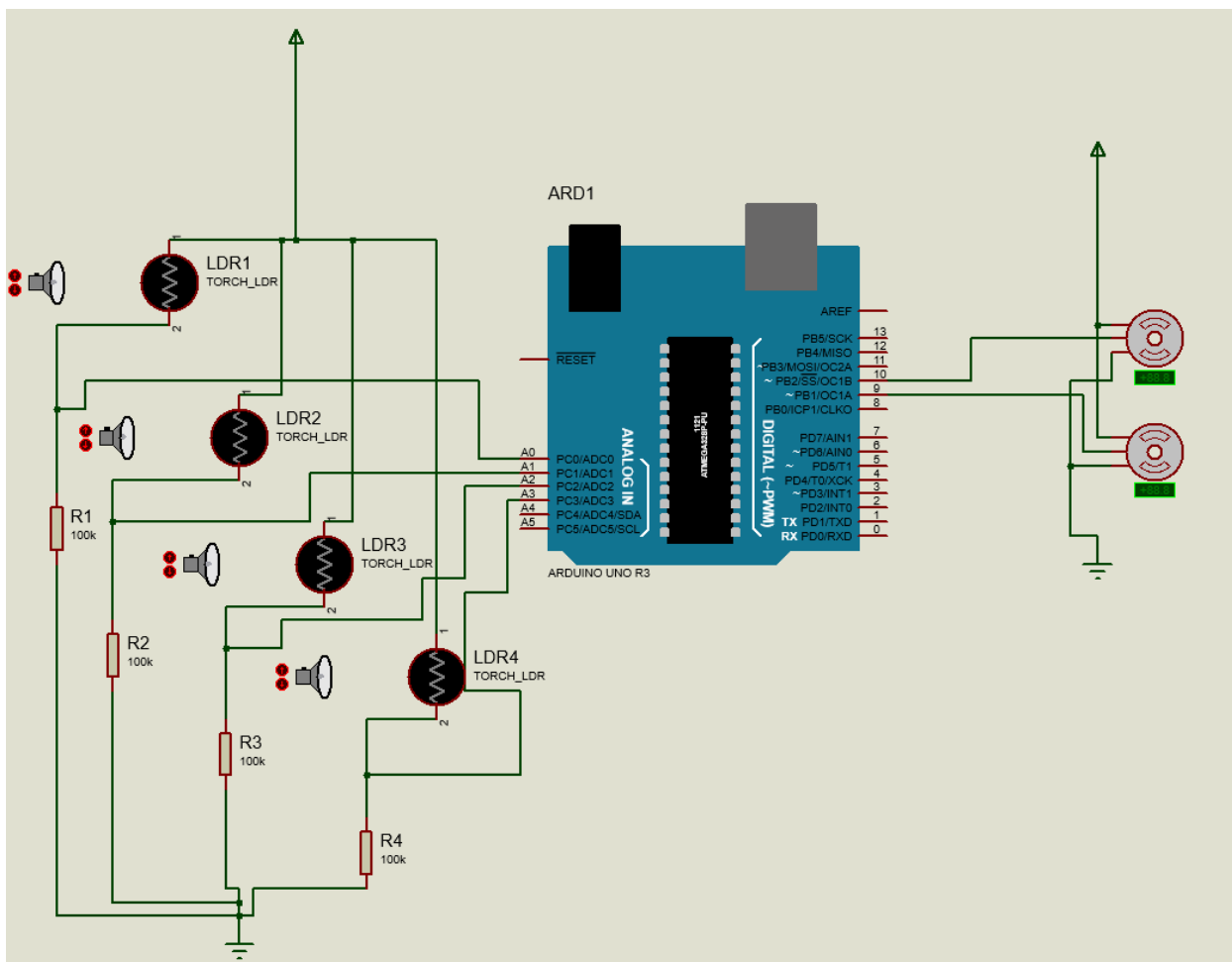
GLAVA 5

REZULTATI SIMULIRANJA, TESTIRANJA I MJERENJA

1. SIMULIRANJE SISTEMA

Simuliranje funkcionisanja sistema obavljeno je na sotverskoj platformi Proteus Professional verzija 8.15., koji ima odgovarajuću podršku za Arduino Uno razvojnu ploču i za Arduino IDE softverski paket.

Komponente sistema su funkcionalno povezane, kao što se vidi na slici 5.1 ispod. Nakon toga uploadovan je fajl sa softverskim kodom koji je ranije pripremljen uz pomoć Arduino IDE softvera, nakon čega je uspješno obavljeno kompajliranje a potom i simuliranje funkcionisanja sistema odnosno pokretanje motora shodno simuliranim promjenama vrijednosti dobijenih sa LDR senzora.

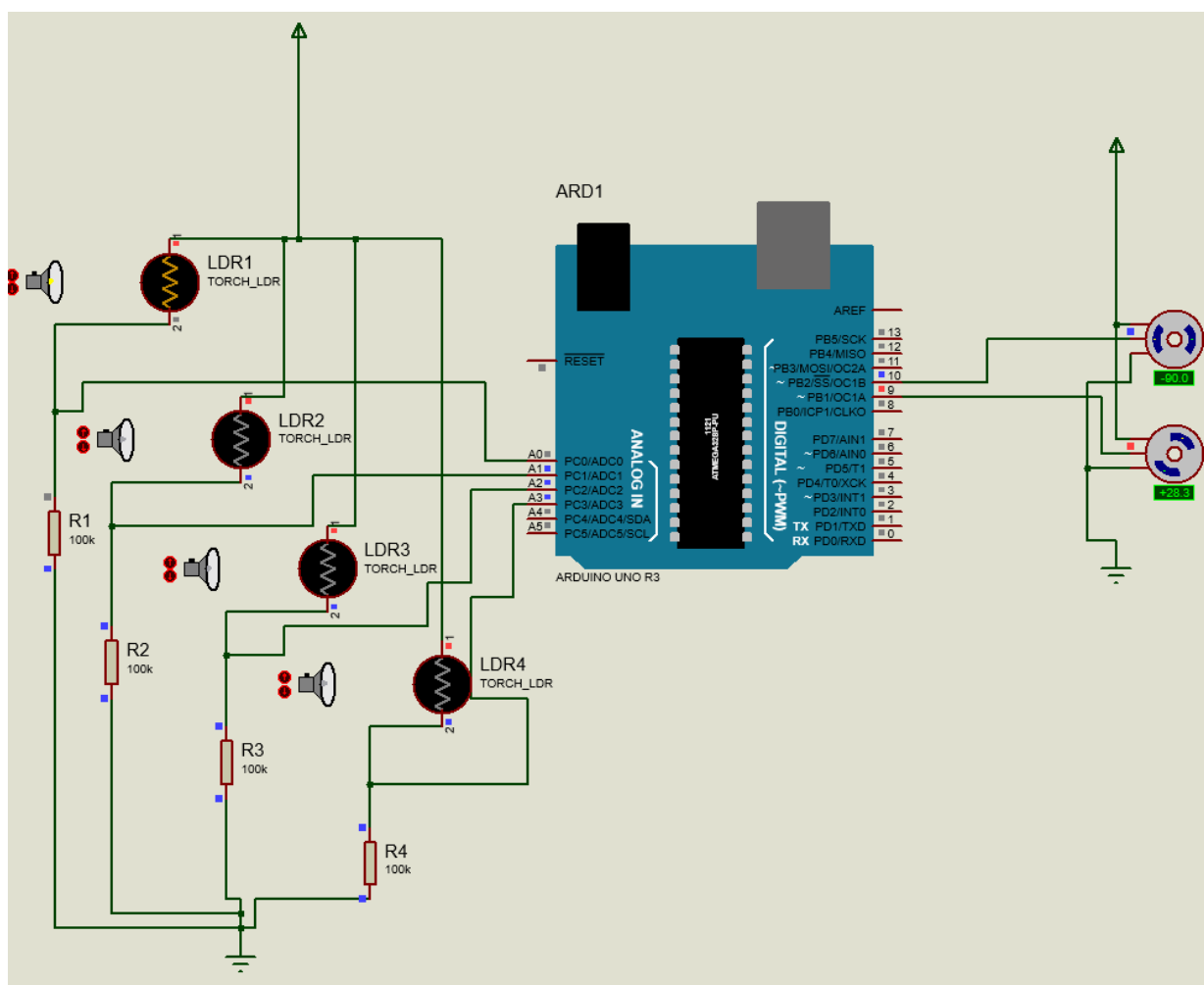


Slika 5.1 Funcionalna šema sistema na softverskoj platformi Proteus Professional (print screen D.Milić)

Gornji motor pokreće panel po horizontalnoj X osi, istok-zapad.
Donji motor pokreće panel po vertikalnoj Y osi, sjever-jug.
Inicijalni položaj za oba motora je -90°

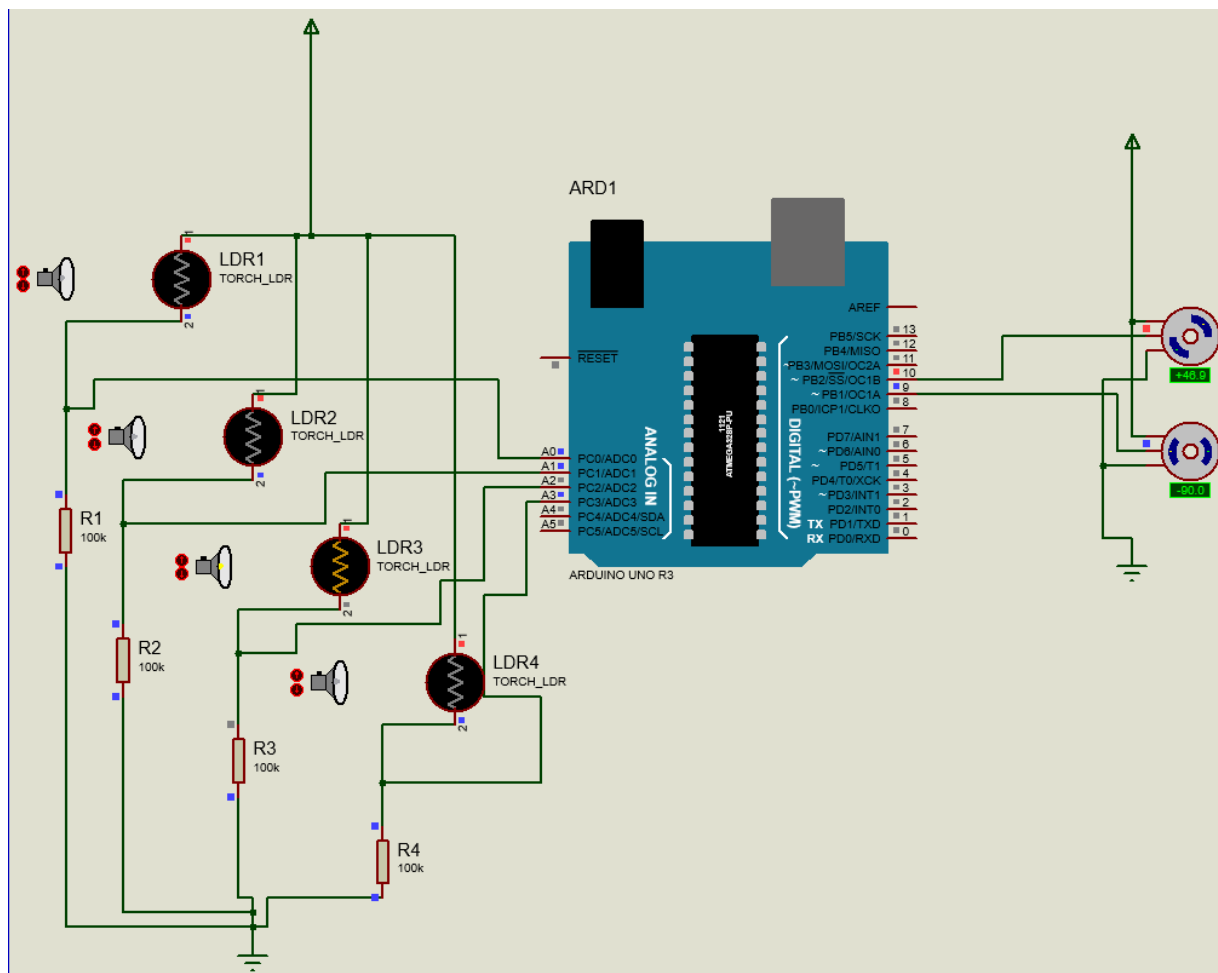
LDR1 i LDR2 odgovaraju sensorima sjever-jug za vertikalnu Y osu.
LDR3 i LDR4 odgovaraju sensorima istok-zapad za horizontalnu X osu.

Da bi se simuliralo pokretanje donjeg motora uvećana je vrijednost senzora LDR1 što je rezultiralo okretanjem motora u smjeru kazaljke na satu, kao što je prikazano na slici 5.2.



Slika 5.2 Simulacija okretanja donjeg motora, X osa (Proteus Professional, print screen D.Milić)

Da bi se simuliralo pokretanje gornjeg motora uvećana je vrijednost senzora LDR3 što je rezultiralo okretanjem motora u smjeru kazaljke na satu, što je prikazano na slici 5.3.

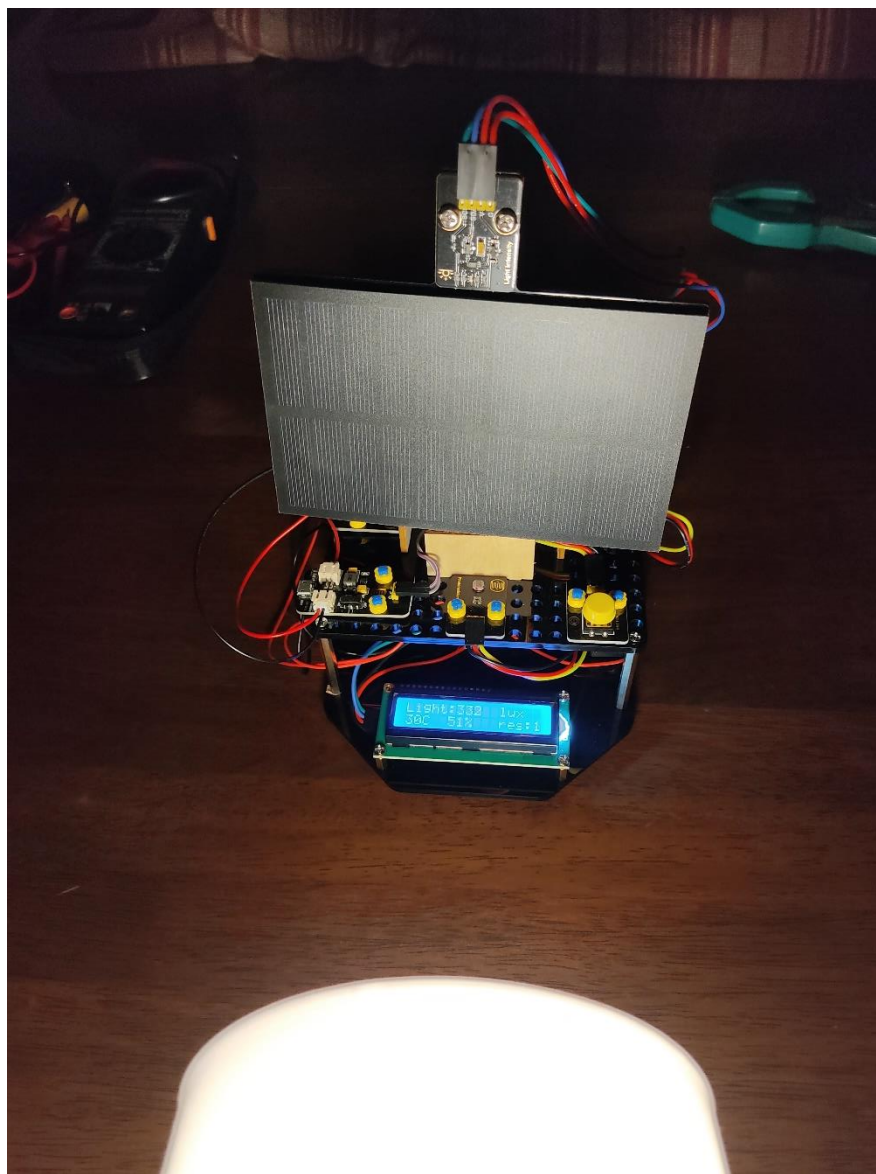


Slika 5.3 Simulacija okretanja gornjeg motora, Y osa (Proteus Professional, print screen D.Milić)

Na sličan način mogu se simulirati pokretanja motora u različitim slučajevima zavisno od vrijednosti LDR senzora.

2. TESTIRANJE FUNKCIONALNOSTI SA VJEŠTAČKIM IZVOROM SVJETLOSTI

Da bi se provjerila praktična funkcionalnost sistema, uspješno je obavljeno je testiranje sa lampom kako bi se ustanovilo da li se panel okreće prema izvoru svjetlosti.



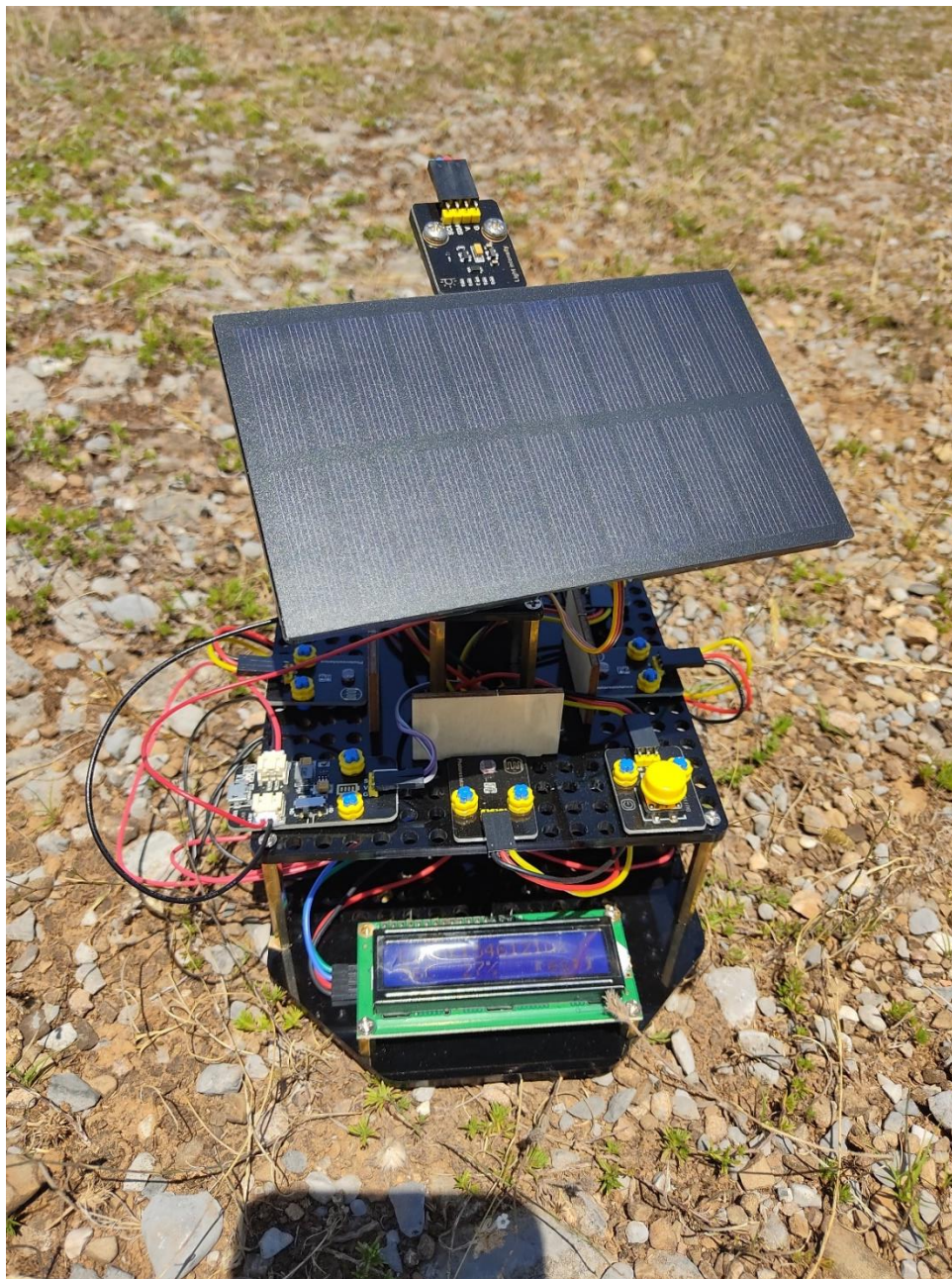
Slika 5.4 Panel automatski pozicioniran upravno u odnosu na vještački izvor svjetlosti (fotografija D.Milić)

Kratak video snimak testiranja na kom se vidi da se panel automatski usmjerava prema vještačkom izvoru svjetlosti dostupan je na linku ispod:

<https://youtube.com/shorts/wTpoHE-4QKo> (autor D. Milić)

3. TESTIRANJE FUNCIONALNOSTI U ODNOSU NA POLOŽAJ SUNCA

Da bi se provjerila praktična funkcionalnost sistema, uspješno je obavljeno je testiranje u prirodnom okruženju, na Čemovskom polju u blizini Podgorice kako bi se ustanovilo da li se panel okreće prema suncu.



Slika 5.5 Panel automatski pozicioniran upravno u odnosu na sunčeve zrake (fotografija D.Milić)

Video snimak na kom se vidi automatsko podešavanje panela u upravni položaj u odnosu na sunčeve zrake dostupan je linku ispod:

<https://www.youtube.com/shorts/Qpte4JErmA8> (autor D. Milić)

4. MJERENJE STRUJE PUNJENJA SA UKLJUČENOM REGULACIJOM

Mjerenje struje punjenja koju proizvodi solarni panel transformacijom energije sunca, pri uključenoj regulaciji za praćenje položaja sunca, obavljeno je u prirodnom okruženju u blizini Podgorice, na Čemovskom Polju, dana 08.07.2023. putem digitalnog uređaja sa amper kliještima, ProsKit, MT-3109, AC/DC mini digital clamp meter.

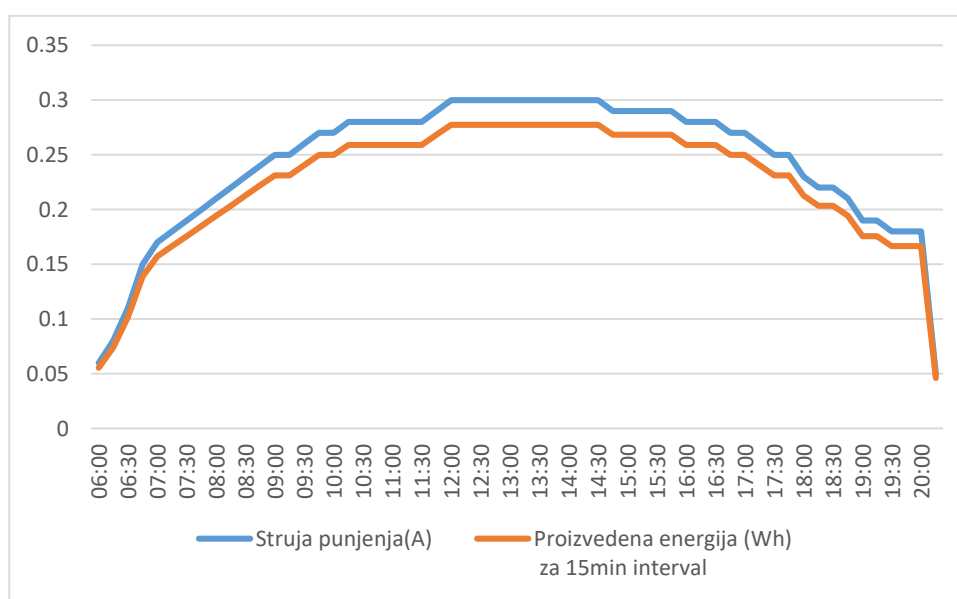
Mjerenje je obavljeno u periodu od 06:00h do 20:15h, u intervalima od po 15minuta.

Proizvedena energija izračunata putem jednačine: $E = I \cdot U \cdot 0.25h$ (II), kao proizvod izmjerene struje punjenja koju proizvodi panel **I**, napona **U** koji daje panel (3.7V) i vremenskog intervala mjerenja (0.25h=15min). Rezultati mjerenja dati u tabeli i grafiku ispod.

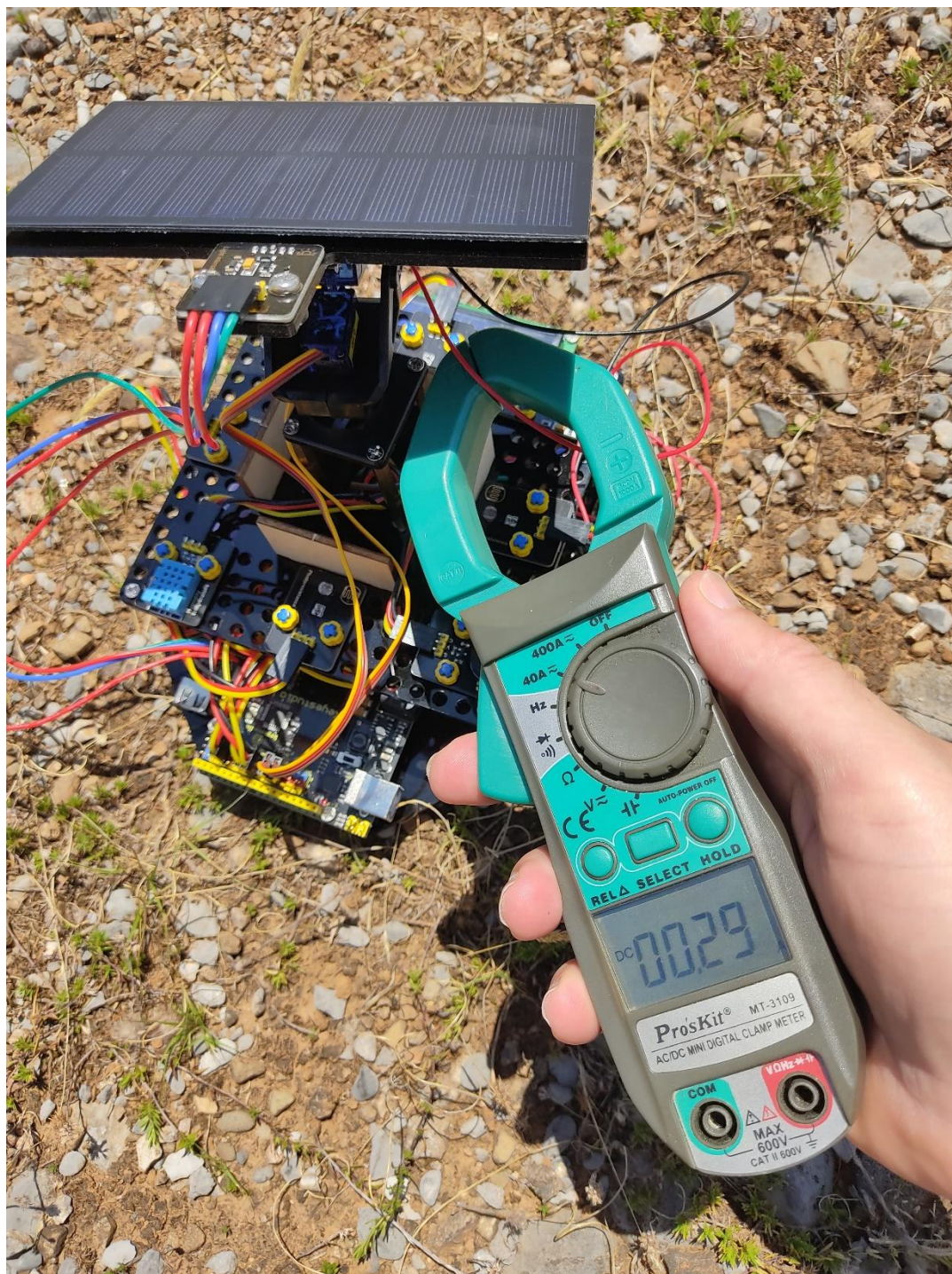
Vrijeme(h:min)	Struja punjenja I(A)	Proizvedena energija E(Wh) za 15min interval
06:00	0.06	0.056
06:15	0.08	0.074
06:30	0.11	0.102
06:45	0.15	0.139
07:00	0.17	0.157
07:15	0.18	0.167
07:30	0.19	0.176
07:45	0.2	0.185
08:00	0.21	0.194
08:15	0.22	0.204
08:30	0.23	0.213
08:45	0.24	0.222
09:00	0.25	0.231
09:15	0.25	0.231
09:30	0.26	0.241
09:45	0.27	0.250
10:00	0.27	0.250
10:15	0.28	0.259
10:30	0.28	0.259
10:45	0.28	0.259
11:00	0.28	0.259
11:15	0.28	0.259
11:30	0.28	0.259
11:45	0.29	0.268
12:00	0.3	0.278
12:15	0.3	0.278
12:30	0.3	0.278
12:45	0.3	0.278
13:00	0.3	0.278
13:15	0.3	0.278
13:30	0.3	0.278
13:45	0.3	0.278
14:00	0.3	0.278

14:15	0.3	0.278
14:30	0.3	0.278
14:45	0.29	0.268
15:00	0.29	0.268
15:15	0.29	0.268
15:30	0.29	0.268
15:45	0.29	0.268
16:00	0.28	0.259
16:15	0.28	0.259
16:30	0.28	0.259
16:45	0.27	0.250
17:00	0.27	0.250
17:15	0.26	0.241
17:30	0.25	0.231
17:45	0.25	0.231
18:00	0.23	0.213
18:15	0.22	0.204
18:30	0.22	0.204
18:45	0.21	0.194
19:00	0.19	0.176
19:15	0.19	0.176
19:30	0.18	0.167
19:45	0.18	0.167
20:00	0.18	0.167
20:15	0.05	0.046
Ukupno(Wh):		
		12.996

Tabela 5.1, rezultati mjerenja struje punjenja pri uključenoj regulaciji (autor D. Milić)



Slika 5.6 – rezultati mjerenja pri uključenoj regulaciji, struja punjenja i proizvedena energija (autor D. Milić)



Slika 5.7- fotografija – prikaz mjerenje pri uključenoj regulaciji
(fotografija D. Milić)

5. MJERENJE STRUJE PUNJENJA PRI ISKLJUČENOJ REGULACIJI

Mjerenje struje punjenja koju proizvodi solarni panel transformacijom energije sunca, pri isključenoj regulaciji za praćenje položaja sunca, obavljeno je u prirodnom okruženju u blizini Podgorice, na Čemovskom Polju, dana 09.07.2023., putem digitalnog uređaja sa amper kliještima, ProsKit, MT-3109, AC/DC digital clamp meter.

Panel je svo vrijeme bio postavljen prema jugu uz vertikalni nagib od 42% kao najpovoljniji za fiskni nagib za predmetnu geografsku poziciju.

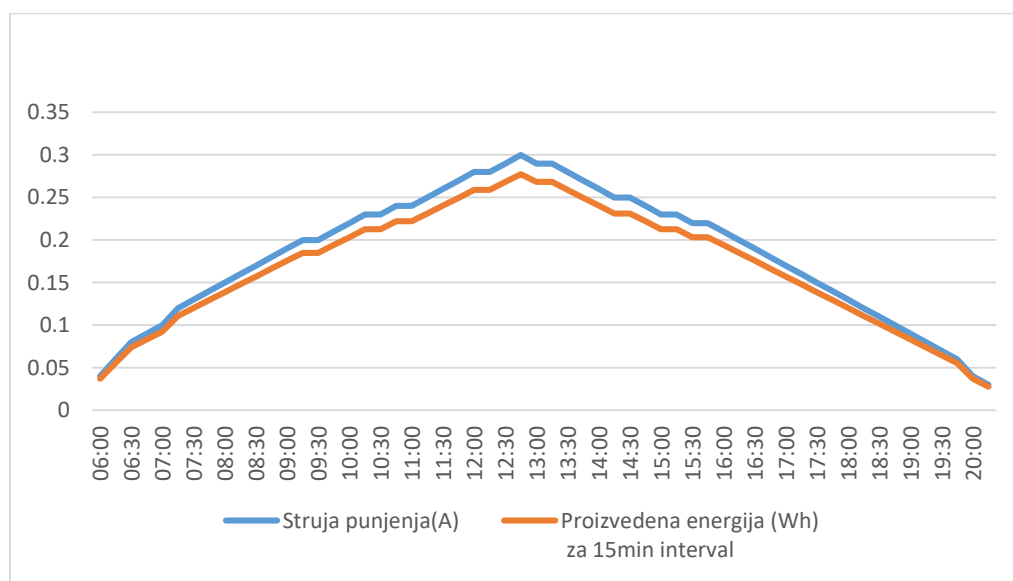
Mjerenje je obavljeno u periodu od 06:00h do 20:15h, u intervalima od po 15minuta.

Rezultati mjerenja dati u tabeli i grafiku ispod:

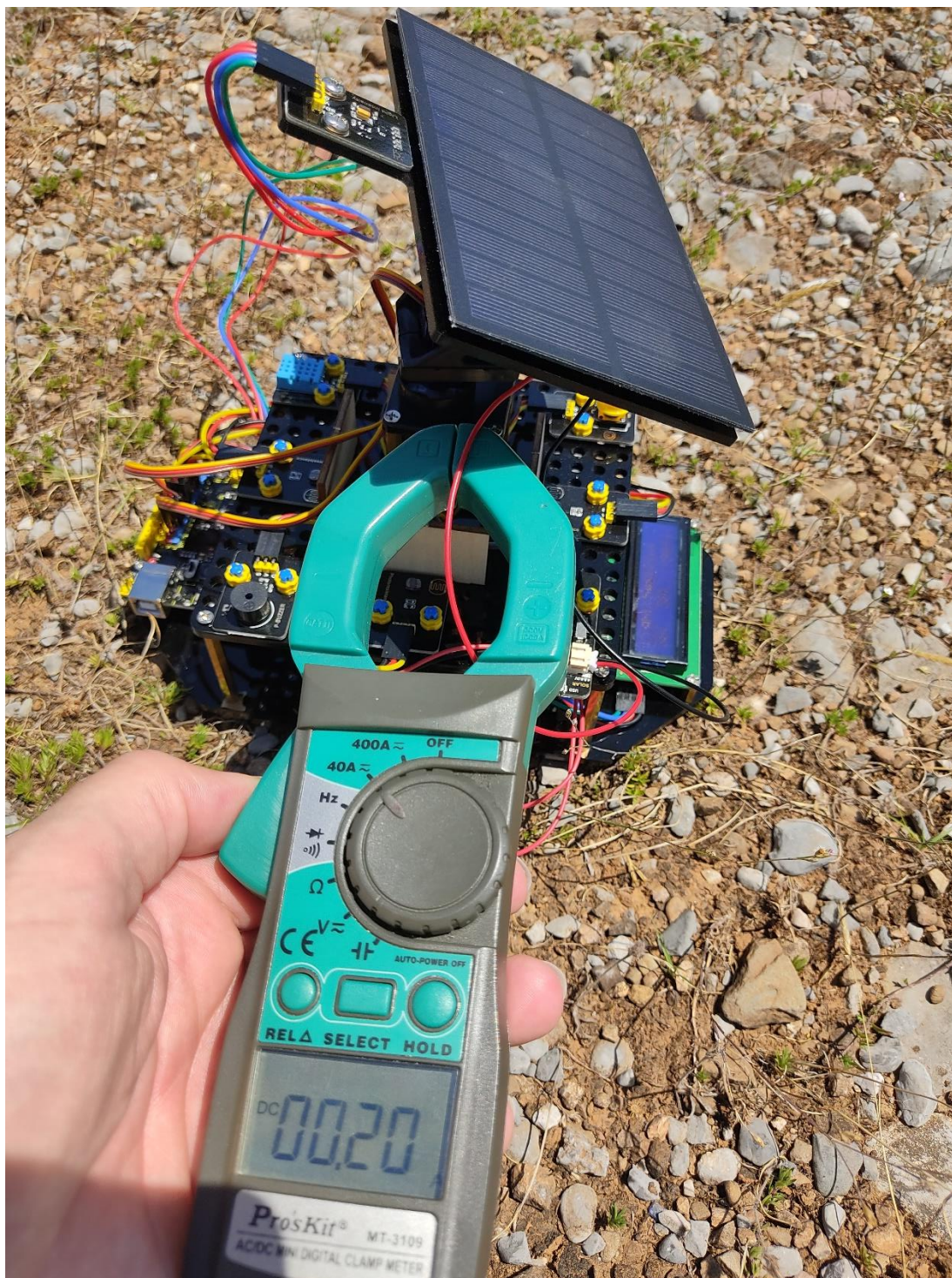
Vrijeme(h:min)	Struja punjenja(A)	Proizvedena energija (Wh) za 15min interval
06:00	0.04	0.037
06:15	0.06	0.056
06:30	0.08	0.074
06:45	0.09	0.083
07:00	0.1	0.093
07:15	0.12	0.111
07:30	0.13	0.120
07:45	0.14	0.130
08:00	0.15	0.139
08:15	0.16	0.148
08:30	0.17	0.157
08:45	0.18	0.167
09:00	0.19	0.176
09:15	0.2	0.185
09:30	0.2	0.185
09:45	0.21	0.194
10:00	0.22	0.204
10:15	0.23	0.213
10:30	0.23	0.213
10:45	0.24	0.222
11:00	0.24	0.222
11:15	0.25	0.231
11:30	0.26	0.241
11:45	0.27	0.250
12:00	0.28	0.259
12:15	0.28	0.259
12:30	0.29	0.268
12:45	0.3	0.278
13:00	0.29	0.268
13:15	0.29	0.268
13:30	0.28	0.259
13:45	0.27	0.250

14:00	0.26	0.241
14:15	0.25	0.231
14:30	0.25	0.231
14:45	0.24	0.222
15:00	0.23	0.213
15:15	0.23	0.213
15:30	0.22	0.204
15:45	0.22	0.204
16:00	0.21	0.194
16:15	0.2	0.185
16:30	0.19	0.176
16:45	0.18	0.167
17:00	0.17	0.157
17:15	0.16	0.148
17:30	0.15	0.139
17:45	0.14	0.130
18:00	0.13	0.120
18:15	0.12	0.111
18:30	0.11	0.102
18:45	0.1	0.093
19:00	0.09	0.083
19:15	0.08	0.074
19:30	0.07	0.065
19:45	0.06	0.056
20:00	0.04	0.037
20:15	0.03	0.028
Ukupno(Wh):		
		9.777

Tabela 5.2, rezultati mjerenja struje punjenja pri isključenoj regulaciji
(autor D. Milić)



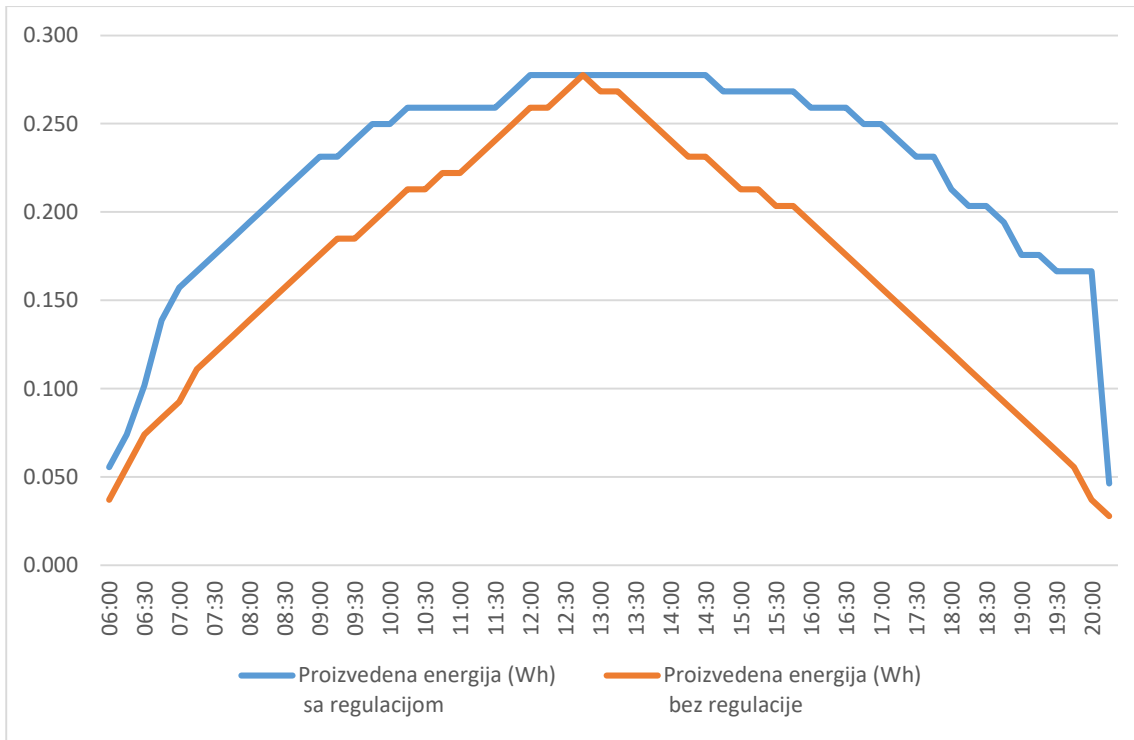
Slika 5.8 – rezultati mjerenja pri isključenoj regulaciji, struja punjenja i proizvedena energija
(autor D. Milić)



Slika 5.9 - fotografija – prikaz mjerenje pri isključenoj regulaciji

6. KOMPARACIJA REZULTATA MJERENJA

Na grafiku ispod prikazano je upoređenje proizvedene električne energije sa i bez regulacije.



Slika 5.10 – komparacija proizvedene električne energije sa i bez regulacije (autor: D. Milić)

Mjerenje je obavljeno na istoj lokaciji u blizini Podgorice, na otvorenom prostoru Čemovskog polja, bez objekata koji bi sprečavali sunčevo zračenje, tokom dva uzastopna dana odnosno 08.07.2023. i 09.07.2023. sa istim meteorološkim prilikama (potpuno vedro, približno isti UV indeks i približno iste temperature), pa se može smatrati da je mjerenje obavljeno u gotovo identičnim uslovima.

Ukupno proizvedena energija u slučaju kada je regulacija aktivna za 32.9% je veća od energije proizvedene kada regulacija nije bila aktivna, što veoma značajna razlika koja ide u prilog primjeni ovakvih sistema u praksi.

GLAVA 6

ZAKLJUČAK:

U uvodnom dijelu rada naglašen je značaj proizvodnje solarne električne energije. Dat je presjek trenutnog stanja u proizvodnji električne energije, ali i buduće projekcije za period do 2040. godine kada se očekuje da prema scenariju neto nulte CO₂ emisije Internacionalne agencije za energiju, solarne električne energije čini čak 40% od globalno proizvedene električne energije, što dovoljno govori o značaju solarne energije u budućnosti.

Da bi se to postiglo potrebno je raditi na povećanju efikasnosti proizvodnje električne energije iz fotovoltaičkih sistema, što je i cilj ovog rada.

U nastavku rada razmotreni su svi postojećim tipovi sistema za praćenje sunca, koji su do sada dizajnirani u cilju optimizacije fotonaponskih sistema. Dat je opis i diskutovane su prednosti i nedostaci svih tipova sistema shodno dostupnoj literaturi.

Navedene su i postojeće računarske platforme koje se koriste za upravljanje sistemima za praćenje položaja sunca, a posvećena je pažnja i opisu AVR mikrokontrolera koji je upotrijebljen u ovom radu.

U praktičnom dijelu rada detaljno je prezentovan hardversko softverski sistem za praćenja položaja sunca, koji je u stanju da poboljša performanse fotonaponskih modula u sistemu za proizvodnju solarne energije, tako što omogućava da fotonaponski modul budu konstantno usklađeni sa sunčevim zracima, što shodno Lambertovom zakonu dovodi do maksimalne moguće izloženosti solarnog panela sunčevom zračenju. Kao rezultat, solarni panel može proizvesti više električne energije.

Rad na projektu obuhvatao je simuliranje sistema na softverskoj platformi kao i testiranje i implementaciju hardverskih komponenti, odnosno razvojne ploče, foto senzora, senzora temperature i vlažnosti, lux senzora, energetskih modula, ekrana, zajedno sa programiranjem softvera za mikrokontrolersku jedinicu solarnog tragača. Sistem koristi ATmega328P

mikrokontroler za kontrolu kretanja dva servo motora, koji rotiraju solarni panel u dvije ose. Količina rotacije je određena mikrokontrolerom, na osnovu ulaza preuzetih sa četiri foto senzora. Foto senzori funkcionišu na bazi otpornika zavisnih od svjetlosti (LDR), koji omogućavaju pretvaranje svjetlosti u napon. Upotrijebljena su četiri LDR senzora, po dva senzora za dvije ose kretanja, u pravcu istok-zapad i sjever- jug. Razlika između napona LDR-a se putem odgovarajućeg algoritma koristi za pokretanje servo motora, kako bi se na taj način osiguralo da dva LDR-a imaju jednak nagib. To znači da će primati istu količinu svjetlosti, a solarni panel će primati sunčevu svjetlost pod uglom od 90° .

Prije hardverskog testiranja obavljeno je uspješno simuliranje sistema na softverskoj platformi Proteus Professional.

Na kraju projekta sve hardverske komponente su povezane u jedan sistem, a putem softverske platforme Arduino IDE kompajliran je i na mikrokontroler snimljen odgovarajući kod, tako da je dobijen funkcionalni sistem za praćenje položaja sunca po dvije ose.

Sistem je u stanju da zadrži solarni panel u ravni sa suncem ili bilo kojim izvorom svjetlosti.

Korištena je Keystudio Arduino Uno razvojna ploča, sa mikrokontrolerom ATMEGA328P.

Za kodiranje je korišćen Arduino IDE softver.

Za simulaciju je korišten softver Proteus Professional, verzija 8.15

BUDUĆI RAD:

U budućem radu poželjno bi bilo dizajnirati hibridni sistem koji bi kombinovao prezentovani sistem za praćenje položaja sunca sa sistemom koji koristi astronomske podatke o položaju sunca.

Na taj način bi se dobio sistem koji bi kada je vedro vrijeme koristio LDR foto senzore za postizanje optimalnog položaja na način kako je to u ovom radu prezentovano, a kada je oblačno koristio bi astronomske podatke radi optimalnog pozicioniranja panela u odnosu na sunce.

REFERENCE

- [1] V. Mohanapriya, V. Manimegalai, V. Praveenkumar and P. Sakthivel, "Implementation of Dual Axis Solar Tracking System", 2021 IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 1084 012073, 2021.
- [2] Aboubakr El Hammoumi, Saad Motahhir, Abdelaziz El Ghzizal, "A simple and low-cost active dual-axis solar tracker", *Energy Sci Eng.* 2018; 6:607–620.
- [3] Hussain S. Akbar1, Abulrahman I.Siddiq, Marwa W. Aziz, "Microcontroller Based Dual Axis Sun Tracking System for Maximum Solar Energy Generation", *American Journal of Energy Research*, 2017, Vol. 5, No. 1, 23-27.
- [4] Abishek Surti, Hanan Mansoori, Sameer Salunke, Sangeeta Jain, "Dual Axis Solar Tracker", *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) ISSN: 2278-0181 Published by, www.ijert.org ICIATE - 2017 Conference Proceedings*
- [5] Saroj Pandey, "Solar Panel Tracking Control", *UiT The Arctic University of Norway*, 2016.
- [6] S. Seme, G. Stumberger, and J. Vorsic, "Maximum efficiency trajectories of a two- axis sun tracking system determined considering tracking system consumption", *IEEE Trans. On Power Electronics*, Vol. 26, No. 4, April 2011. pp. 1280-1290.
- [7] C.Y. Lee, P. C. Chou, C. M. Chiang, and C.F. Lin, "Sun tracking systems: a Review." *Sensors.* 9, pp. 3875-3890, 2009.
- [8] A. Merlaud, M. De Mazière, C. Hermans, and A. Cornet, "Equations

- for solar tracking.” *Sensors*. 12, pp.4074-4090, 2009.
- [9] A. B. Sproul, “Derivation of the solar geometric relationships using vector analysis.” *Renewable Energy*. Vol. 32, No. 7, pp. 1187-05, 2007.
- [10] R. H. McFee, “Power collection reduction by mirror surface nonflatness and tracking error for a central receiver solar power system” . *Appl. Opt.* 1975, 14, pp. 1493-1502.
- [11] R.P. Semma, and M.S. Imamura, "Sun tracking controller for multi-Kw photovoltaic concentrator system.", *In Proceedings of the 3rd International Photovoltaic Sol Energy Conf*, Cannes, France, Oct. pp. 27-31, 1980.
- [12] K.K. Chong and C.W. Wong, “General formula for on-axis sun-tracking system and its application in improving tracking accuracy of solar collector,” *Solar Energy* 83, 2009, pp. 298–305
- [13] S. Abdallah, “The effect of using sun tracking systems on the voltage-current characteristics and power generation of flat plate photovoltaic.” *Energ. Conversion. Manage.* 2004, 45, pp. 1671-1679.
- [14] R. Grena, “An algorithm for the computation of the solar position.” *Solar Energy*. Vol. 82, No. 5, pp. 462-470, 2008.
- [15] M. Blanco-Muriel, D.C. Alarcon-Padilla, T. Lopez-Moratalla, and M. Lara-Coira, “Computing the solar vector.” *Solar Energy*. Vol. 70, No. 5. pp. 431-441, 2001.
- [16] I. Reda, and A. Andreas, “Solar position algorithm for solar radiation applications” *Solar Energy*. Vol. 76, No. 5, pp. 577-589. 2004.
- [17] S. Abdallah and S. Nijmeh, “Two axes sun tracking system with PLC control.” *Energy Conversion and Management* 45, 2004, pp. 1931–1939.
- [18] F. Duarte, P. D. Gaspar, and L. C. Gonçalves, “Two-axis solar tracker based on solar maps, controlled by a low-power microcontroller.” *Proc. of the International Conference on Renewable Energies and Power Quality*. (ICREPQ’10). Granada. Spain. March 23-25, 2010.
- [19] H. Mousazadeh, A. Keyhani, A. Javadi, H. Mobli, K. Abrinia, and A. Sharifi, “A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar

- systems output.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 13, pp. 1800-1818, 2009.
- [20] P. Roth, A. Georgiev and H. Boudinov, “Design and construction of a system for sun- tracking.” *Renewable Energy*, 2004. 29, pp. 393-402.
- [21] P. Roth, A. Georgiev and H. Boudinov, “Cheap two axis sun following device. „*Energy Conversion and Management*, 2005; 46: pp. 1179–1192.
- [22] S.A. Kalogirou, “Design and construction of a one-axis sun-tracking.” *Solar Energy*, 1996, 57(6), pp. 465–469.
- [23] Cheng-Dar Lee, Hong-Cheng Huang, Hong-Yih Yeh, “The Development of Sun- Tracking System Using Image Processing.” *Sensors* 2013, 13, pp. 5448-5459.
- [24] I. Sefa, M. Demirtas, and I. Colak, “Application of one-axis sun tracking system.” *Energy Conversion and Management*, 2009. 50(11), pp. 2709-2718.
- [25] A. Konar, and A. K. Mandal, “Microprocessor based automatic sun tracker.” *IEE Proc. Sci., Meas. Technol.*, Vol. 138, No. 4, 1991
- [26] B. Koyuncu, and K. Balasubramanian, “A microprocessor controlled automatic sun tracker.” *IEEE Trans. Consumer Electron*. Vol. 37, No. 4, 1991.
- [27] A.K. Saxena, and V.K. Dutta, “A versatile microprocessor based controller for solar tracking.” *IEEE. Conf*. Vol. 2, pp.21-25, 1990.
- [28] F.R Rubio, M.G. Ortega, F. Gordillo, and M. Lopez-Martinez, “Application of new control strategy for sun tracking.” *Energy. Conversion. And. Management*. Vol. 48, No. 7, July. 2007, pp. 2174-2184.
- [39] Benzekri Azzouz, “FPGA-Based Intelligent Dual-Axis Solar Tracking Control System”, University M’Hamed BOUGARA – Boumerdes, Institute of Electrical and Electronic Engineering, 2015.
- [40] ATMEL, ATmega328P, 8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash, Datasheet, dostupno na adresi: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf

-
- [41] https://hr.wikipedia.org/wiki/Solarna_fotonaponska_energija
- [42] <https://www.solarnipaneli.org/solarni-paneli-2/>
- [43] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/modules-and-arrays/module-circuit-design>
- [44] <https://www.automatika.rs/baza-znanja/green-engineering/fotonaponska-celija-princip-rada-karakteristike-i-efikasnost.html>
- [45] EMBER – Global electricity review 2023, available at:
<https://ember-climate.org/insights/research/global-electricity-review-2023/>
- [46] <https://www.iea.org/reports/tracking-sdg7-the-energy-progress-report-2022>
- [47] Muhammad E. H. Chowdhury, Amith Khandakar , Belayat Hossain and Rayaan Abouhasera “A Low-Cost Closed-Loop Solar Tracking System Based on the Sun Position Algorithm” Hindawi Journal of Sensors Volume 2019, Article ID 3681031, <https://doi.org/10.1155/2019/3681031>
- [48] Mustafa Hamid Al-Jumaili1 , Hussein M. Haglan, Mohammed Kareem Mohammed, Qusay Hatem Eesee “An automatic multi-axis solar tracking system in Ramadi city: design and implementation” Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science Vol. 19, No. 3, September 2020, pp. 1126~1234 ISSN: 2502-4752, DOI: 10.11591/ijeecs.v19.i3.pp1126-1234
- [49] <https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/microcontroller>
- [50] <https://www.elprocus.com/microcontrollers-types-and-applications>
- [51] <https://greendealflow.com/the-biggest-operational-solar-projects-worldwide>
- [52] „Design of illumination system for an opencast coal mining project“ 2014
<https://www.semanticscholar.org/paper/DESIGN-OF-ILLUMINATION-SYSTEM-FOR-AN-OPENCAST-COAL-Tripathy/e6f6342d6634e197aaa44399299754cd243113d1>
- [53] DI EE, Predavanja 2, 2013, Sunčeva energija i njeno pretvaranje u električnu energiju, dostupno na:
https://www.ucg.ac.me/skladiste/blog_9437/objava_24125/fajlovi/DIEESol%203PR%202018.doc

- [54] Abdulmajid Murad, „Design and Implementation of Solar Tracking System for Photovoltaic Cells“, Norwegian University of Science and Technology
https://www.researchgate.net/publication/322333171_Design_and_Implementation_of_Solar_Tracking_System_for_Photovoltaic_Cells
- [55] Radivoje Đurić, “Solarna energija i fotonaponski sistemi”, ETF Beograd, 2020, http://tnt.etf.bg.ac.rs/~aes/index_files/2020_solar.pdf
- [56] <http://static.astronomija.org.rs/suncsist/Sunce/pomracenje/skretanje.htm>
- [57] <https://www.solarchoice.net.au/blog/solar-trackers/>
- [58] Sandipan Paul, Debasis Kumar Das, Sourav Basak, „Dual axis solar tracker” , Department of Electrical Engineering, RCC Institute of information technology, Maulana Abul Kalam Azad University of Technology, 2018
- [59] <https://ks0530-keyestudio-solar-tracking-kit.readthedocs.io/en/latest/KS0530.html>
- [60] D. C. Huynh, Tuong M. Nguyen, „Comparison between open- and closed-loop trackers of a solar photovoltaic system” 2013 IEEE Conference on Clean Energy and Technology (CEAT),
<https://www.semanticscholar.org/paper/Comparison-between-open-and-closed-loop-trackers-of-Huynh-Nguyen/c443f06931003b37c913d57938d49e20316ab7d6>
- [61] Aurélio Gouvêa Melo, Delly Oliveira Filho, Maury Martins de Oliveira Júnior , Sérgio Zolnier , Aristides Ribeiro, “Development of a closed and open loop solar tracker technology”, Acta Scientiarum. Technology, vol. 39, no. 2, pp. 177-183, 2017, Universidade Estadual de Maringá
<https://www.redalyc.org/journal/3032/303250905007/html/>
- [62] Cătălin Alexandru, “A Novel Open-Loop Tracking Strategy for Photovoltaic Systems”, 2013, Article ID 205396
<https://www.hindawi.com/journals/tswj/2013/205396/>
- [63] M.H.M. Sidek, W. Z. Wan Hasan, Zainal Kadir, Suhaidi Shafie, “GPS based portable dual-axis solar tracking system using astronomical equation”, DOI:10.1109/PECON.2014.7062450
https://www.researchgate.net/publication/282271883_GPS_based_portable_dual-axis_solar_tracking_system_using_astronomical_equation

- [64] Mustafa Aljumaili, Hussein M. Haglan, Mohammed kareem Mohammed, “An Automatic Multi-Axis Solar Tracking System in Ramadi City Design and Implementation” June 2020, Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, DOI:10.11591/ijeecs.v19.i3.pp1126-1234
https://www.researchgate.net/publication/341344753_An_Automatic_Multi-Axis_Solar_Tracking_System_in_Ramadi_City_Design_and_Implementation
- [65] Danko Milić, Nedeljko Lekić, Nebojša Šolaja, „FPGA bazirani PWM kontroler“(eng. FPGA based PWM Controller), Proc. 50th ETRAN Conference, Belgrade, June 6-8, 2006, Vol. I.
[https://www.etrans.rs/common/archive/ETAN_1955-2006/ET\(R\)AN_1955-2006/eTRAN.50.ETAN.2006.1/EL/Milic%20Lekic%20Solaja.ETAN2006.pdf](https://www.etrans.rs/common/archive/ETAN_1955-2006/ET(R)AN_1955-2006/eTRAN.50.ETAN.2006.1/EL/Milic%20Lekic%20Solaja.ETAN2006.pdf)
- [66] Radovan Stojanovic, Tina Golubovic, Ivan Vojinovic and Jovan Djurkovic, DC Motor Control Using FPGA Generated PWM, Technical report, 2020, DOI: 10.13140/RG.2.2.25672.47364,
https://www.researchgate.net/publication/339274946_DC_Motor_Control_Using_FPGA_Generated_PWM
- [67] Danko Milić, Radovan Stojanović, A simple embedded system for solar tracking, Special Issue on selected papers of Works in Progress Session within 26th Euromicro Conference on Digital System Design (DSD) and 49th Euromicro Conference Series on Software Engineering and Advanced Applications (SEAA), e Durres, Albania, Sept. 6th - Sept. 8th, 2023.
<https://dsd-seaa2023.com/wp-content/uploads/2023/09/WiP-Special-issue-v2.pdf>
- [68] Proteus professional software official website:
<https://www.labcenter.com/simulation/>
- [69] <https://www.arduino.cc/en/software>
- [70] <https://www.arduino.cc/en/hardware>
- [71] <https://www.theengineeringprojects.com/2021/03/download-proteus-library-of-arduino-modules.html>

