



Univerzitet Crne Gore
Elektrotehnički fakultet Podgorica
Automatika



Spec. sci Dražen Jovanović

Poređenje izlaznih karakteristika i estimacija
parametara jednodiodnog i dvodiodnog modela
solarnih ćelija
-Master rad-

Podgorica, 2020. godine

PODACI I INFORMACIJE O MAGISTRANDU

Ime i prezime: Jovanović Dražen

Datum i mjesto rođenja: 08.06.1995. godine, Cetinje, Crna Gora

Naziv završenog osnovnog studijskog programa i godina diplomiranja: Energetika i automatika, 2017.

Naziv završenog specijalističkog studijskog programa i godina diplomiranja: Automatika, 2018.

INFORMACIJE O MAGISTARSKOM RADU

Elektrotehnički fakultet Podgorica

Postdiplomske magistarske akademske studije

Smjer: Automatika

Naslov rada: Poređenje izlaznih karakteristika i estimacija parametara jednodiodnog i dvodiodnog modela solarnih ćelija

OCJENA I ODBRANA MAGISTARSKOG RADA

Datum prijave magistarskog rada: 30. 05. 2019. godine

Datum sjednice Vijeća univerzitetske jedinice na kojoj je prihvaćena tema: 12. 09. 2019. godine

Komisija za ocjenu teme:

Prof. dr Vladan Vujičić

Univerzitet Crne Gore,

Elektrotehnički fakultet Podgorica

Prof. dr Vesna Rubežić

Univerzitet Crne Gore,

Elektrotehnički fakultet Podgorica

Doc. dr Martin Čalasan

Univerzitet Crne Gore,

Elektrotehnički fakultet Podgorica

Mentor: Doc. dr Martin Čalasan,
Univerzitet Crne Gore,
Elektrotehnički fakultet, Podgorica

Komisija za ocjenu rada:

Prof. dr Vladan Vujičić

Univerzitet Crne Gore,
Elektrotehnički fakultet Podgorica, predsjednik

Doc. dr Martin Čalasan

Univerzitet Crne Gore,
Elektrotehnički fakultet Podgorica, mentor

Prof. dr Vesna Rubežić

Univerzitet Crne Gore,
Elektrotehnički fakultet Podgorica, član

Komisija za odbranu rada:

Prof. dr Vladan Vujičić

Univerzitet Crne Gore,
Elektrotehnički fakultet Podgorica, predsjednik

Doc. dr Martin Čalasan

Univerzitet Crne Gore,
Elektrotehnički fakultet Podgorica, mentor

Prof. dr Vesna Rubežić

Univerzitet Crne Gore,
Elektrotehnički fakultet Podgorica, član

Datum odbrane: 09.10.2020. godine

Datum promocije:

PREDGOVOR

Sve veće potrebe savremenog društva za energijom, ograničenost resursa neobnovljivih izvora energije i njihov negativan uticaj na životnu sredinu dovode do sve većeg korišćenja obnovljivih izvora energije. Od svih obnovljivih izvora energije, kako u naučnim publikacijama tako i u praksi, najzastupljenija je upotreba solarne energije. Štaviše, direktno korišćenje Sunčeve energije pomoću solarnih ćelija, tj. fotonaponskih sistema, sve više dobija na značaju.

U cilju projektovanja, optimizacije i generalno korišćenja fotonaponskih sistema potrebno je poznavati adekvatan model, tj. zamjensku šemu, kao i odgovarajuće vrijednosti parametara istih. Međutim, odabir tačnog modela tj. zamjenske šeme, i posebno, vrijednosti njegovih parametara, predstavljaju veoma izazovan i naučni i stručni zadatak. Tome u prilog ide i činjenica da je posljednjih dvadesetak godina, ova problematika postala izuzetno aktuelna tema brojnih istraživanja publikovanih u referentnim naučnim časopisima.

Većina literaturno dostupnih optimizacionih metoda za estimaciju parametara solarnih ćelija se zasniva na upotrebi njenih kataloških podataka ili na upotrebi izmjerenih vrijednosti struje i napona. Štaviše, pojedine metode se primjenjuju samo na jednodiodne, a druge na dvodiodne modele. Pristup za određivanje parametara solarnih ćelija koji se bazira na korišćenju kataloških podataka ne zahtijeva mjerenja u radnom stanju solarnih ćelija/panela. Međutim, parametri modela određeni na osnovu pomenutih podataka u bitnom se razlikuju od podataka koji se dobijaju na osnovu izmjerenih struja-napon karakteristika. Razlog za to leži u činjenici da su solarni paneli podložni uticaju ambijentalnih i radnih uslova. Zbog toga se parametri koji su dobijeni na osnovu izmjerenih podataka smatraju i za realnije i za pouzdanije.

U ovom radu su razmatrani i određivani parametri jednodiodnog i dvodiodnog električnog modela solarne ćelije, ne zanemarujući njihov nijedan parametar. Za estimaciju parametara modela solarnih ćelija predložen je Haotični optimizacioni algoritam zasnovan na Teoriji haosa. Bitno je naglasiti da su u master radu korišćena oba prethodno pomenuta tipa ulaznih podataka.

Performanse predloženog optimizacionog algoritma predstavljene u ovom radu predstavljaju polaznu tačku budućih istraživanja koja će biti orjentisana ka aplikativnom *real-time* određivanju izlaznih karakteristika i parametara solarnih ćelija. Ovaj pravac istraživanja će biti veoma važan za primjenu u sistemima upravljanja, kao što su npr. metodi praćenja maksimalne izlazne snage solarnih sistema.

U Podgorici, jun 2020.

REZIME

Predmet istraživanja ovog rada je poređenje izlaznih karakteristika (struja-napon i snaga-napon), kao i određivanje parametara jednodiodnih i dvodiodnih električnih modela solarnih ćelija/panela.

Za estimaciju parametara jednodiodnog i dvodiodnog modela solarnih ćelija predložen je Haotični optimizacioni algoritam (HOA). Predloženi metod estimacije parametara zasnovan je na jednačinama koje opisuju logističko preslikavanje. Pomoću ovog metoda estimirano je pet parametara jednodiodnog i sedam parametara dvodiodnog modela solarnih ćelija.

U matematičkom smislu, postupak određivanja parametara solarne ćelije svodi se na problem minimizacije razlike između izmjerene i proračunate vrijednosti struje solarne ćelije/panela, tj. na proračun srednje kvadratne greške (Root mean square error - RMSE). U radu su estimirani parametri različitih solarnih ćelija i panela. Preciznost predloženog metoda je provjeravana upoređivanjem izlaznih karakteristika solarnih ćelija sa karakteristikama dobijenim za parametre određene drugim estimacionim metodama, kao i eksperimentalno mjerenim vrijednostima.

U svim analiziranim slučajevima strujno-naponske i snaga-naponske karakteristike dobijene za parametre određene primjenom predloženog algoritma veoma dobro aproksimiraju mjerene karakteristike solarne ćelije čak i za slučaj upotrebe malog broja ulaznih tačaka (npr. kod upotrebe podataka sa natpisne pločice). Štaviše, strujno-naponske i snaga-naponske karakteristike dobijene za parametre određene primjenom predloženog algoritma mnogo bolje poklapaju mjerene karakteristike u poredjenju sa odgovarajućim karakteristikama dobijenim za parametre određene brojim drugim metodama optimizacije publikovanim u časopisima sa SCI liste. Prema tome, u radu je pokazana jednostavnost primjene, efikasnost i tačnost upotrebe predloženog algoritma kako za estimaciju parametara jednodiodnih tako i za estimaciju parametara dvodiodnih modela solarnih ćelija.

Ključne riječi: Haotični optimizacioni algoritam, Parametri električnog modela solarne ćelije, jednodiodni model, dvodiodni model.

ABSTRACT

The subject of this paper is the comparison of output characteristics (current-voltage and power-voltage), as well as the determination of parameters of one-diode and two-diode electrical models of solar cells / panels.

A Chaotic Optimization Algorithm (HOA) has been proposed for estimating the parameters of the one - diode and two - diode models of solar cells. The proposed method of parameter estimation is based on equations describing logistic mapping. Using this model, five parameters of the one-diode and seven parameters of the two-diode model of solar cells were estimated.

In the mathematical sense, the procedure of determining the parameters of the solar cell is reduced to the problem of minimizing the difference between the measured and calculated value of the current of the solar cell / panel, ie. to the Root mean square error (RMSE) calculation. The paper estimates the parameters of different solar cells and panels. The accuracy of the proposed method was checked by comparing the output characteristics of solar cells with the characteristics obtained for the parameters determined by other estimation methods, as well as experimentally measured values.

In all analyzed cases, the current-voltage and power-voltage characteristics obtained for the parameters determined by applying the proposed algorithm very well approximate the measured characteristics of the solar cell even for the use of a small number of entry points (eg when using data from the nameplate). Moreover, the current-voltage and power-voltage characteristics obtained for the parameters determined by applying the proposed algorithm match the measured characteristics much better compared to the corresponding characteristics obtained for the parameters determined by a number of other optimization methods published in SCI list journals. Therefore, the paper demonstrates the simplicity of application, efficiency and accuracy of using the proposed algorithm for both the estimation of single - diode parameters and the estimation of parameters of two - diode solar cell models.

Keywords: Chaotic optimization algorithm, Solar cell electrical model parameters, one-diode model, two-diode model.

SADRŽAJ

1	UVOD.....	8
2	SOLARNE ČELIJE	11
2.1	Električni modeli solarnih ćelija	13
2.1.1	Jednodiodni model solarne ćelije.....	13
2.1.2	Dvodiodni model solarne ćelije.....	14
3	PREDLOG NOVOG METODA ZA ESTIMACIJU PARAMETARA SOLARNE ČELIJE	16
3.1	Haotični algoritam za estimaciju parametara solarne ćelije	16
3.2	Opis realizovanog algoritma	20
4	PRIMJENA PREDLOŽENOG METODA U ESTIMACIJI PARAMETARA SOLARNE ČELIJE	29
4.1	Opšti podaci o solarnoj ćeliji i panelu	29
4.1.1	R.T.C France Cell	29
4.1.2	BP MSX – 60.....	29
4.2	Estimacija parametara solarnih ćelija koristeći izmjerene struja-napon karakteristike.....	30
4.2.1	Estimacija parametara jednodidnog modela R.T.C. France cell solarne ćelije	30
4.2.2	Estimacija parametara dvodiodnog modela R.T.C. France Cell solarne ćelije	45
4.3	Estimacija parametara solarnih ćelija na osnovu kataloških podataka (natpisna pločica)	52
4.3.1	Estimacija parametara jednodiodnog modela R.T.C France Cell solarne ćelije	52
4.3.2	Estimacija parametara jednodiodnog modela solarnog panela BP MSX - 6056	
4.3.3	Estimacija parametara dvodiodnog modela R.T.C France cell.....	60
4.3.4	Estimacija parametara dvodiodnog modela solarnog panela BP MSX - 60 – DDM	62
5	EKSPERIMENTALNI REZULTATI.....	65
5.1	Opis laboratorijske postavke i procedura mjerenja	65
5.2	Estimacija parametara jednodiodnog modula hoa algoritma sa sdm kriterijumskom funkcijom	69
5.3	Estimacija parametara jednodiodnog modela primjenom hoa algoritma sa lambertw kriterijumskom funkcijom	70
5.4	Dvodiodni model – DDM	72

6	ZAKLJUČAK.....	75
7	REFERENCE	76

Udio solarne energije u ukupnoj proizvodnji električne energije je u stalnom rastu. S obzirom da se cijena solarnih pretvarača i solarnih panela stalno smanjuje, većina zemalja energetska politiku zasniva na većem korištenju solarne energije. Studije o energetske sistemima, a posebno testiranje integracije izvora solarne energije u elektroenergetske sisteme, zahtevaju tačan proračun izlazne snage solarne elektrane, a samim tim i što tačnije modelovanje solarnih ćelija (PV cell – photovoltaic cell). Zbog toga, modelovanje solarnih ćelija (proračun parametara ekvivalentnih električnih modela solarnih ćelija) predstavlja veoma popularno polje za istraživanje.

U literaturi koja se bavi solarnom energijom najčešće se pominju dva električna modela solarnih ćelija - jednodiodni model (single diode model - SDM) [1] i dvodiodni model (double diode model - DDM) [2]. Jednodiodni model je prostiji model, pa je samim tim i češće zastupljen. U matematičkom smislu on se opisuje jednačinama sa pet nepoznatih koeficijenata. Pri nižim vrednostima insolacije i niskim temperaturama, dvodiodni model (DDM) daje mnogo tačniju strujno-naponsku karakteristiku u poređenju sa jednodiodnim modelom (SDM). Samim tim, dvodiodni model daje preciznije karakteristike za različite spoljašnje uslove (insolacija i temperatura), ali i zahtjeva određivanje sedam nepoznatih parametara. Zbog složenosti DDM-a, neki autori smanjuju broj nepoznatih parametara [3-4], što uveliko može uticati na tačnost modela [5]. U ovom master radu su razmatrani i određivani parametri SDM i DDM električnog modela solarne ćelije, ne zanemarujući nijedan parameter.

Za estimaciju parametara modela solarnih ćelija u literaturi se koriste sljedeća dva tipa ulaznih podataka i to:

- podaci sa natpisne pločice [6-7].
- podaci sa izmjerenih I-V karakteristika [8].

Treba naglasiti da se u naučnim publikacijama dominantno koristi jedan od njih, dok su rijetke publikacije gdje se koriste oba tipa ulaznih podataka. U najvećem broju istraživanja, za estimaciju parametara solarnih ćelija koriste se podaci sa natpisne pločice (napon praznog hoda, struja kratkog spoja, napon i vrijednost struje u tački maksimalne snage) koje daju proizvođači fotonaponskih (PV) materijala za nominalne uslove rada. Međutim, nedavna istraživanja [7] pokazuju da korišćenjem samo ova tri karakteristična podatka sa natpisne pločice ne daju jedinstveno rešenje, već se dobijaju višestruke strujno-naponske (I-V) karakteristike. Ovaj problem dobijanja jedinstvene i što tačnije I-V karakteristike PV ćelije se može prevazići korišćenjem eksperimentalnih podataka sa izmjerene I-V karakteristike [7]. Istraživanje prezentovano u [7] ukazuje da samo pristupi zasnovani na eksperimentalnim podacima daju tačnije modele.

Metodi za određivanje performansi solarnih ćelija (ili PV panela), tj. preciznu estimaciju parametara električnih modela, mogu se kategorisati na sljedeći način:

- analitičke tehnike [9-13]
- numeričke metode [13]
- metaheurističke tehnike [14-23]

Primjenom analitičkih tehnika definišu se matematički izrazi čijim rešavanjem se, a na osnovu nekoliko ulaznih podataka (podaci proizvođača ili / i podaci dobijeni mjerenjima), dobijaju parametri kola. Pregled i poređenje rezultata dobijenih neiterativnim metodama za određivanje parametara jednodiodnog modela fotonaponskih modula dat je u [11]. Generalno, analitičke tehnike daju brzo rešenje. Međutim, primjenom ovih tehnika prisutne su značajne razlike između estimiranih i mjerenih izlaznih karakteristika solarnih ćelija [12].

Numeričke tehnike zasnivaju se na primjeni nekih od numeričkih tehnika, kao što su Njutonova metoda, Levenberg–Marquardt algoritam, brojnih iterativnih procedura i slično. Međutim, primena ovakvih metoda kod nelinearnih jednačina je prilično složena, pa je numeričko određivanje parametara električnih modela solarne ćelije postalo nepopularno [14].

U poslednje vrijeme su predloženi brojni metaheuristički algoritmi za određivanje parametara modela solarnih ćelija [14-22]. Oni algoritmi ne nameću ograničenja u definisanju problema, odlični su u radu sa nelinearnim jednačinama, i mogu se primijeniti za različit broj nepoznatih parametara. Sve predložene tehnike, u pogledu tačnosti i efikasnosti imaju približno slične karakteristike; neke brže konvergiraju, druge zahtijevaju duže/kraće vrijeme po jednoj iteraciji, treće daju veoma bliske rezultate i za veći broj startovanja algoritma itd. Međutim, upravo veliki broj istraživanja u ovom polju bio je glavni podsticaj za izradu ovog master rada. U ovom radu je predložena primjena Haotičnog optimizacijskog algoritma (HOA) za estimaciju parametara SDM i DDM solarnih ćelija.

U poslednje vrijeme HOA se koristi u rešavanju različitih problema optimizacije: određivanje parametara histerezisne petlje po modelu Džils-Aterton (eng. *Jiles-Atherton*) [23], procijena parametra jednofaznih transformatora [24], dizajn PID parametara za automatsko regulisanje napona sinhronne mašine [25], određivanja dijagrama zračenja anteskkih sistema [26-27]. Glavne prednosti HOA u odnosu na druge tehnike optimizacije su jednostavna primjena i kratko vrijeme izvršenja [28]. Treba napomenuti da su različite verzije haotičnih algoritma korišćene za estimaciju parametara modela solarnih ćelija [16] [29-33]. U radu je predložen HOA zasnovan na jednačinama koje opisuju logističko preslikavanje. Jednačine koje opisuju logističko preslikavanje imaju jednostavan oblik sa jednom promenljivom i jednim kontrolnim parametrom i mogu proizvesti haotično ponašanje slično složenijim haotičnim sistemima [34]. Efikasnost predloženog metoda biće procijenjena na različitim solarnim ćelijama (za različite napone i struje, odnosno ćelije sa različitim snagama) koje se nalaze u literaturi i u laboratorijskom okruženju. Pored toga, određivanje parametara zasnovano na primjeni HOA algoritma biće upoređeno sa rezultatima dobijenim pomoću velikog broja različitih tehnika opisanih u literaturi.

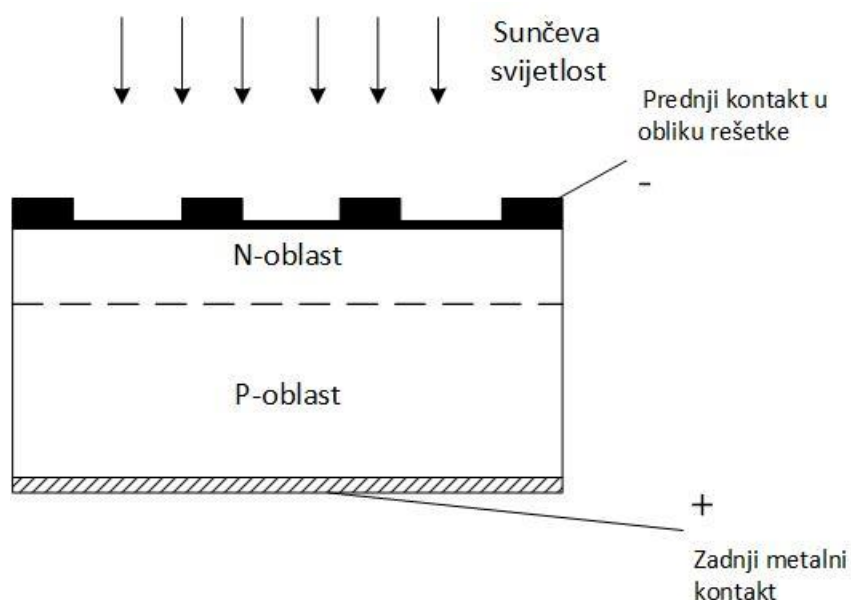
Ovaj rad je organizovan na sledeći način: u drugom poglavlju su dati opšti pojmovi o solarnoj energiji; dat je opis konstrukcije solarne ćelije, kao i pregled električnih modela

solarnih ćelija. Treće poglavlje rada je posvećeno opisu predloženog Haotičnog optimizacionog algoritma u estimaciji parametara solarnih ćelija. U ovom poglavlju detaljno je prikazan tok samog algoritma sa posebnim osvrtom na izbor kriterijumske funkcije. Četvrto poglavlje rada prikazuje rezultate dobijene primjenom predloženog metoda u estimaciji parametara solarne ćelije. U ovom poglavlju su dati rezultati estimacije parametara, i odgovarajuće izlazne karakteristike solarnih ćelija za parametre određene na osnovu kataloških podataka (natpisna pločica), kao i na osnovu izmjerenih struja-napon karakteristika. Struja-napon karakteristike solarne ćelije izmjerene na realizovanoj eksperimentalnoj postavci date su u petom poglavlju ovog rada. Ovo poglavlje takođe sadrži i opis eksperimentalne postavke, kao i opis procedure mjerenja strujno-naponskih karakteristika pri različitim vrijednostima temperature i insolacije. Takođe, u ovom poglavlju su prikazana i poređenja simuliranih i mjerenih izlaznih karakteristika korišćenih solarnih ćelija za različite vrijednosti insolacije i temperature. U zaključnom poglavlju je dat osvrt na kompletno istraživanje, kao i završna razmatranja i smjernice za buduća istraživanja.

2 SOLARNE ĆELIJE

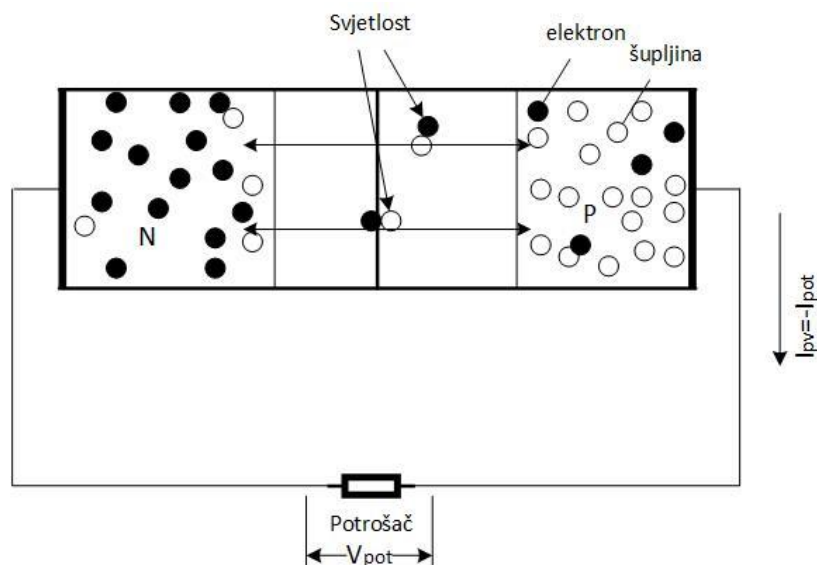
Sunčevo zračenje, neposredno ili posredno, je izvor skoro sve raspoložive energije na zemlji. Zbog smanjenja zaliha fosilnih goriva i njihovog štetnog uticaja na čitav ekosistem, u novije vrijeme se sve više pažnje posvećuje direktnom korišćenju Sunčeve energije pomoću solarnih ćelija. Solarne ćelije su specijalno dizajnirane komponente koje direktno pretvaraju energiju Sunca u električnu energiju.

Na slici 2.1 je prikazan poprečni presjek jedne silicijumske solarne ćelije. Solarna ćelija je dioda (pn spoj) na čijoj se prednjoj površini nalazi metalna rešetka, a na zadnjoj strani je kompaktan metalni kontakt. Rešetkasti kontakt na prednjoj strani, radi skupljanja naelektrisanja nastalih apsorbicijom fotona sunčevog zračenja, ne treba da prekrije više od 5% ukupne površine. Efikasnost ćelije se povećava tako što se prednja strana prekriva providnim antireflektujućim slojem koji smanjuje refleksiju sunčeve svjetlosti.



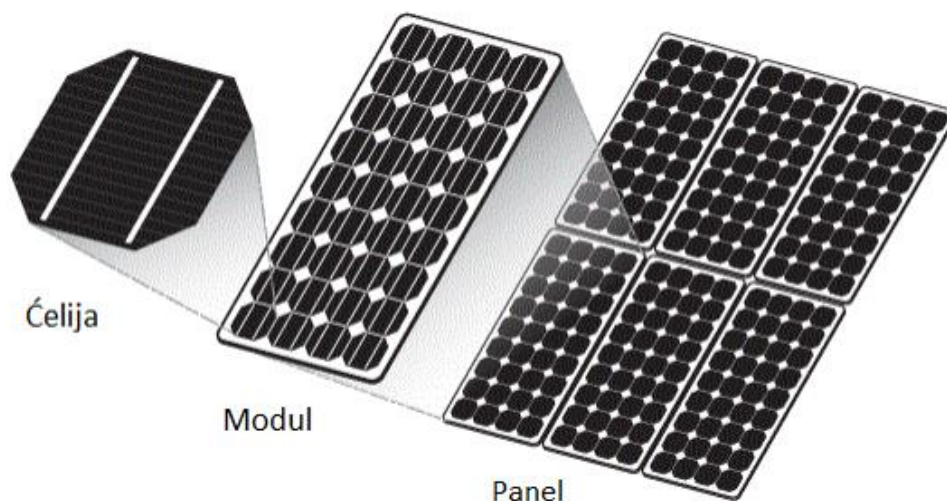
Slika 2.1 Poprečni presjek silicijumske (Si) solarne ćelije

Osvjetljavanjem solarne ćelije apsorbirani fotoni proizvode parove elektron-šupljina. U slučaju apsorbicije fotona koja se desi daleko od pn spoja par elektron-šupljina se vrlo brzo rekombinuje. Međutim, u slučaju apsorbicije unutar ili blizu pn spoja, unutrašnje električno polje, koje postoji u osiromašenom području, razdvaja nastali elektron i šupljinu. Elektron se kreće prema n -strani, a šupljina prema p -strani. To nagomilavanje naelektrisanja na odgovarajućim stranama pn spoja uzrokuje na krajevima solarne ćelije elektromotornu silu. Štaviše, ako je solarne ćelija spojena sa potrošačem i osvijetljena kroz potrošač će proteći struja I (slika 2.2).



Slika 2.2 Šematski prikaz osvijetljene solarne ćelije

Solarne ćelije stvaraju napon oko 0.5V uz gustinu struje oko 20 mA/cm². Pošto je snaga pojedinačne ćelije mala, ćelije se vežu paralelno ili serijski da bi se dobila odgovarajuća snaga. Na taj način se konstruišu moduli solarnih ćelija, koji se slažu u fotonaponske panele i zajedno sa ostalim elementima (pretvaračima, regulatorima i sl.) čine fotonaponski sistem (slika 2.3).



Slika 2.3 Ćelija, modul i panel

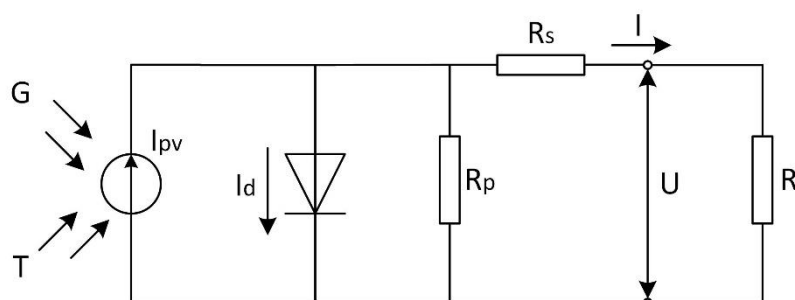
Jedan od problema koji se javlja kod redne veze ćelija jeste u tome što je struja ovakve veze ograničena vrijednošću struje ćelije koja je najmanje osvijetljena. Takođe, unutrašnji otpor ćelije koja nije osvijetljena raste, što dovodi do povećanja disipacije snage na njoj, njenom grijanju i samim tim dovodi do pojave vrućih tačaka na fotonaponskom panelu. U slučaju da je neka od ćelija u rednoj vezi oštećena, ili u mraku, ona predstavlja otvoreno strujno kolo, pa i čitav niz postaje otvoreno strujno kolo. Ovaj problem se izbjegava korišćenjem povratnih (*bypass*) dioda, koje se postavljaju paralelno svakoj solarnoj ćeliji.

2.1 ELEKTRIČNI MODELI SOLARNIH ĆELIJA

Modelovanje solarnih ćelija podrazumijeva poznavanje adekvatne zamjenske šeme kao i vrijednosti njenih parametara. Najzastupljeniji modeli solarnih ćelija su jednodiodni i dvodiodni modeli, a koji su i opisani u ovom poglavlju.

2.1.1 Jednodiodni model solarne ćelije

Na slici 2.4 prikazan je jednodiodni model solarne ćelije.



Slika 2.4 Jednodiodni model solarne ćelije

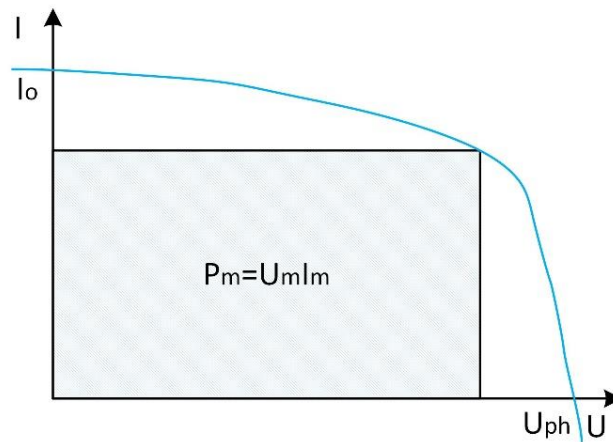
Izvor stalne struje (osvijetljena solarna ćelija) je paralelno vezan sa diodom i paralelnim otporom R_p , čija vrijednost zavisi od osobina ćelije, i koji se zbog svoje velike vrijednosti, za brze proračune, može i zanemariti (R_p ima vrijednost od oko 500Ω za silicijumske ćelije). Redna otpornost R_s je otpornost pn spoja i zavisi od vrste materijala od koga je izgrađena solarna ćelija. U poređenju sa paralelnim otporom R_p , vrijednost redne otpornosti je veoma mala (za silicijumske solarne ćelije je obično manja od 0.1Ω).

Vrijednosti izlazne struje solarne ćelije je kod jednodiodnog modela predstavljena preko sljedećeg izraza:

$$I = I_{pv} - I_d - \frac{U + IR_s}{R_p} = I_{pv} - I_o \left(e^{\frac{q(U+IR_s)}{\alpha k T}} - 1 \right) - \frac{U + IR_s}{R_p} \quad (2.1)$$

gdje je: I_o - inverzna struja zasićenja diode, I_{pv} - generisana fotostruja, R_s - redna otpornost, R_p - paralelna otpornost, U - izlazni napon, I - izlazna struja, q - količina naelektrisanja elektrona, k - Bolcmanova konstanta, α - faktor idelanosti diode i T - temperatura u Kelvinima.

Na slici 2.5 je prikazana I - V karakteristika solarne ćelije. Na pomenutoj slici, struja I_m i napon U_m odgovaraju vrijednosti struje i napona pri kojima je snaga solarne ćelije maksimalna.



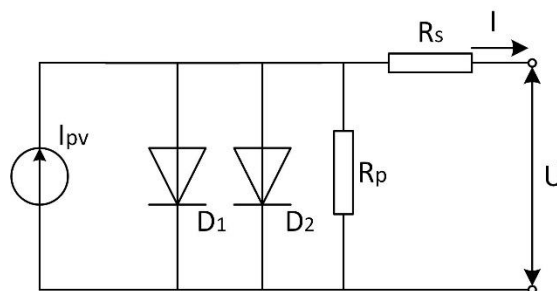
Slika 2.5 Radno područje solarne ćelije

Radno područje ćelije, tj. kada se iz iste dobija električna energija se nalazi u četvrtom kvadrantu i najčešće se crta samo to područje. Uzimajući pozitivne vrijednosti struje i napona na slici 2.6 je dat uobičajni prikaz I - V karakteristike solarne ćelije gdje šrafirani pravougaonik odgovara maksimalnoj snazi koju ćelija može dati.

Potrebno je naglasiti da, matematički posmatrano, jednodiodni model solarne ćelije ima pet nepoznatih parametara.

2.1.2 Dvodiodni model solarne ćelije

Na slici 2.7 je prikazan dvodiodni model solarne ćelije.



Slika 2.5 Dvodiodni model solarne ćelije

Za razliku od jednodiodnog modela ovaj model pored strujnog izvora, diode D_1 , kao i otporosti R_s i R_p , sadrži i drugu diodu D_2 . Ovaj model se najčešće koristi za modelovanje polikristalnih solarnih ćelija i radi dobijanja preciznijih I - V karakteristika.

Na osnovu date šeme može se napisati jednačina izlazne struje I :

$$I = I_{pv} - I_{o1} \left(e^{\frac{q(U+IR_s)}{\alpha_1 kT}} - 1 \right) - I_{o2} \left(e^{\frac{q(U+IR_s)}{\alpha_2 kT}} - 1 \right) - \frac{U + IR_s}{R_p} \quad (2.2)$$

gdje je: I_{o1} - difuziona struja zasićenja, I_{o2} - rekombinaciona struja zasićenja, α_1 i α_2 - faktor idelanosti prve i druge diode.

Shodno prethodnom, jasno ja da, matematički posmatrano, dvodiodni model solarnih ćelija ima sedam nepoznatih parametara.

3 PREDLOG NOVOG METODA ZA ESTIMACIJU PARAMETARA SOLARNE ĆELIJE

Brojni prirodni procesi, kao i procesi kod vještačkih sistema imaju haotičan karakter. Analizom i opisivanjem haotičnih pojava otkriven je prostor za njihovu primjenu kod brojnih optimizacionih metoda. Naime, haotični sistemi imaju nekoliko karakteristika koji ih čine veoma pogodnim za upotrebu u optimizacionim metodama pretraživanja, kao što su: osjetljivost na izbor početnih uslova, oblik signala sličan šumu, neponovljivost i dugoročna nepredvidljivost. Detaljni opis haotičnih sistema je dat u [35-36].

Haotični sistemi su našli veliku primjenu u inženjerskoj praksi, a često se koriste i za poboljšavanje karakteristika drugih optimizacionih metoda [27] [37-39]. Ovi sistemi se lako primjenjuju i imaju veliku preciznost i kratko vrijeme izvršavanja. Takođe, upotrebom ovih sistema pretraživanja izbjegava se zadržavanje u lokalnim minimumima [38] [40]. U literaturi se mogu naći različiti tipovi haotičnih jednačina kojima se isti mogu opisati.

3.1 HAOTIČNI ALGORITAM ZA ESTIMACIJU PARAMETARA SOLARNE ĆELIJE

U matematičkom smislu strujno-naponska jednačina jednodiodnog modela ima svoje analitičko rešenje u sledećem obliku:

$$I_{est} = \frac{R_p(I_{pv} + I_o) - U_{iz}}{R_s + R_p} - a \frac{V_t}{R_s} LambertW(W) \quad (3.1)$$

$$W = \frac{I_o R_s R_p}{a V_t (R_s + R_p)} e^{\frac{R_p (R_s I_{pv} + R_s I_o + U_{iz})}{a V_t (R_s + R_p)}} \quad (3.2)$$

Prema tome ako je poznata vrijednost napona na krajevima solarne ćelije primjenom prethodne jednačine lako se može proračunati vrijednost struje solarne ćelije. Međutim, kod dvodiodnih modela solarnih ćelija ne postoji analitički izraz za vrijednosti struje u funkciji napona.

U naučnim radovima, koji se bave estimacijom parametara solarnih ćelije, mogu se naći sledeći pristupi:

- SDM (*Single Diode Model*) – za jednodiodne modele, kod kojeg se parametri dobijaju minimizacijom sledeće funkcije:

$$f(U, I) = I_{pv} - I_o \left(e^{\frac{q(U + IR_s)}{akT}} - 1 \right) - \frac{U + IR_s}{R_p} - I \quad (3.3)$$

- LambertW – za jednodiodne modele, kod koje se vrijednosti struje proračunavaju gore već navedenom jednačinom (3.1) i (3.2)
- DDM (*Double Diode Model*) – za dvodiodne modele, kod kojih se vrijednost struje dobija minimizacijom sljedećeg izraza:

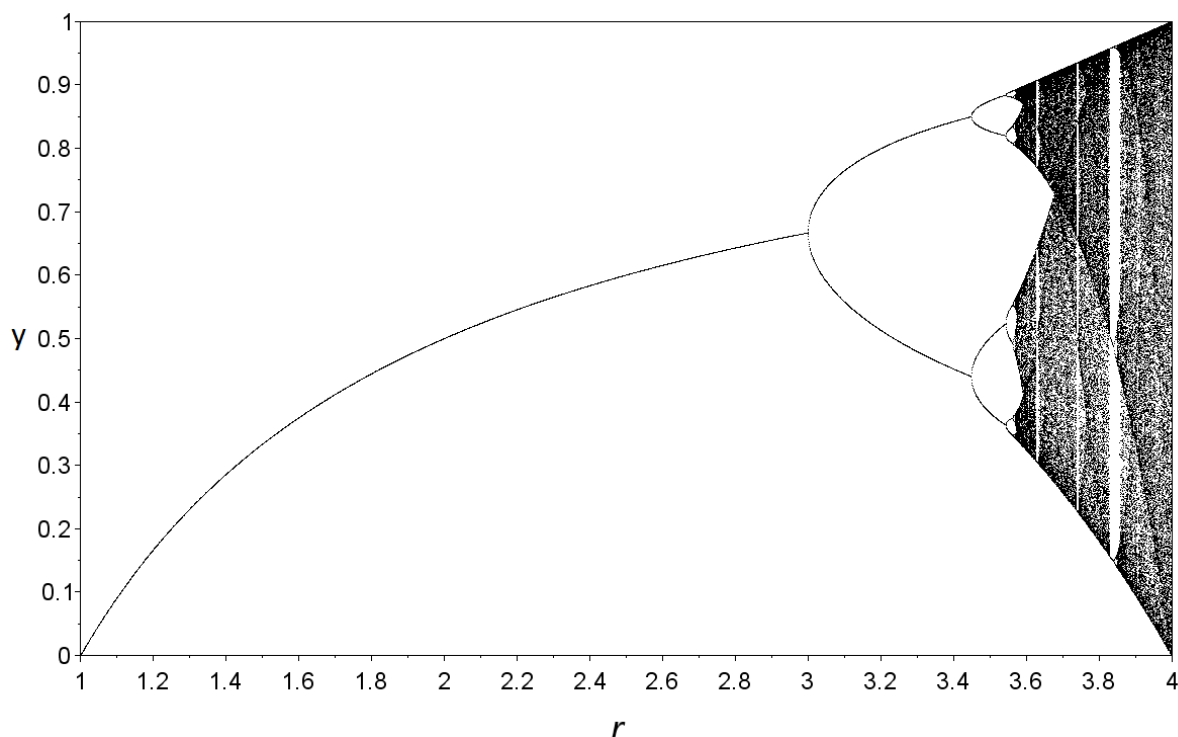
$$f(U, I) = I_{pv} - I_{o1} \left(e^{\frac{q(U+IR_s)}{\alpha_1 kT}} - 1 \right) - I_{o2} \left(e^{\frac{q(U+IR_s)}{\alpha_2 kT}} - 1 \right) - \frac{U + IR_s}{R_p} - I \quad (3.4)$$

U ovom radu predložen je Haotični optimizacioni algoritam (HOA) zasnovan na logističkom preslikavanju [36]. Logistička jednačina predstavlja matematički model za predviđanje brojnosti biološke populacije. Jednačina ima sljedeći oblik:

$$y_{t+1} = r y_t (1 - y_t) \quad (3.5)$$

gdje y_t predstavlja broj jedinki u trenutnoj populaciji, y_{t+1} je broj jedinki u sledećoj populaciji, a r predstavlja konstantu proporcionalnosti. Broj jedinki posmatra se u interval od 0 do 1, pri čemu se smatra da 0 predstavlja potpuno istrebljenje populacije, a 1 njen rast u beskonačnost.

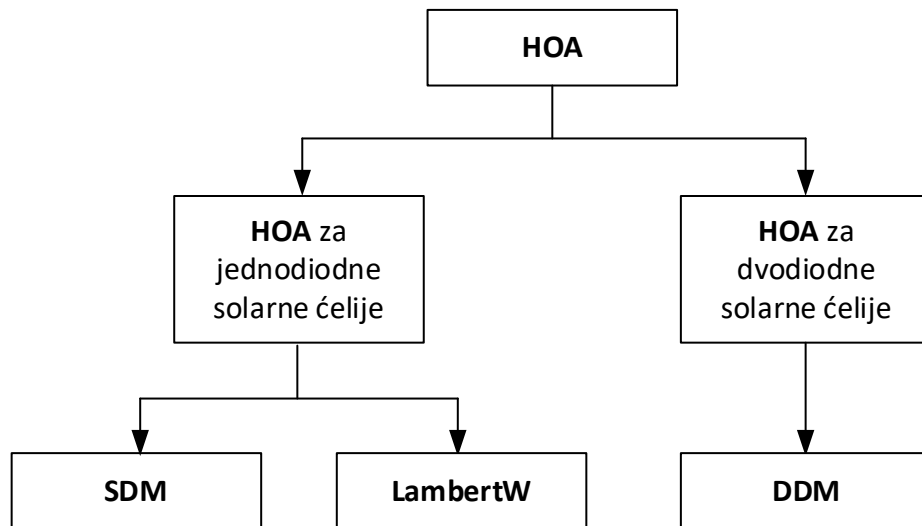
Grifički prikaz brojnosti populacije u zavisnosti od konstante proporcionalnosti dat je na slici 3.1.



Slika 3.1 Grafik bifurkacije za jednačinu populacije

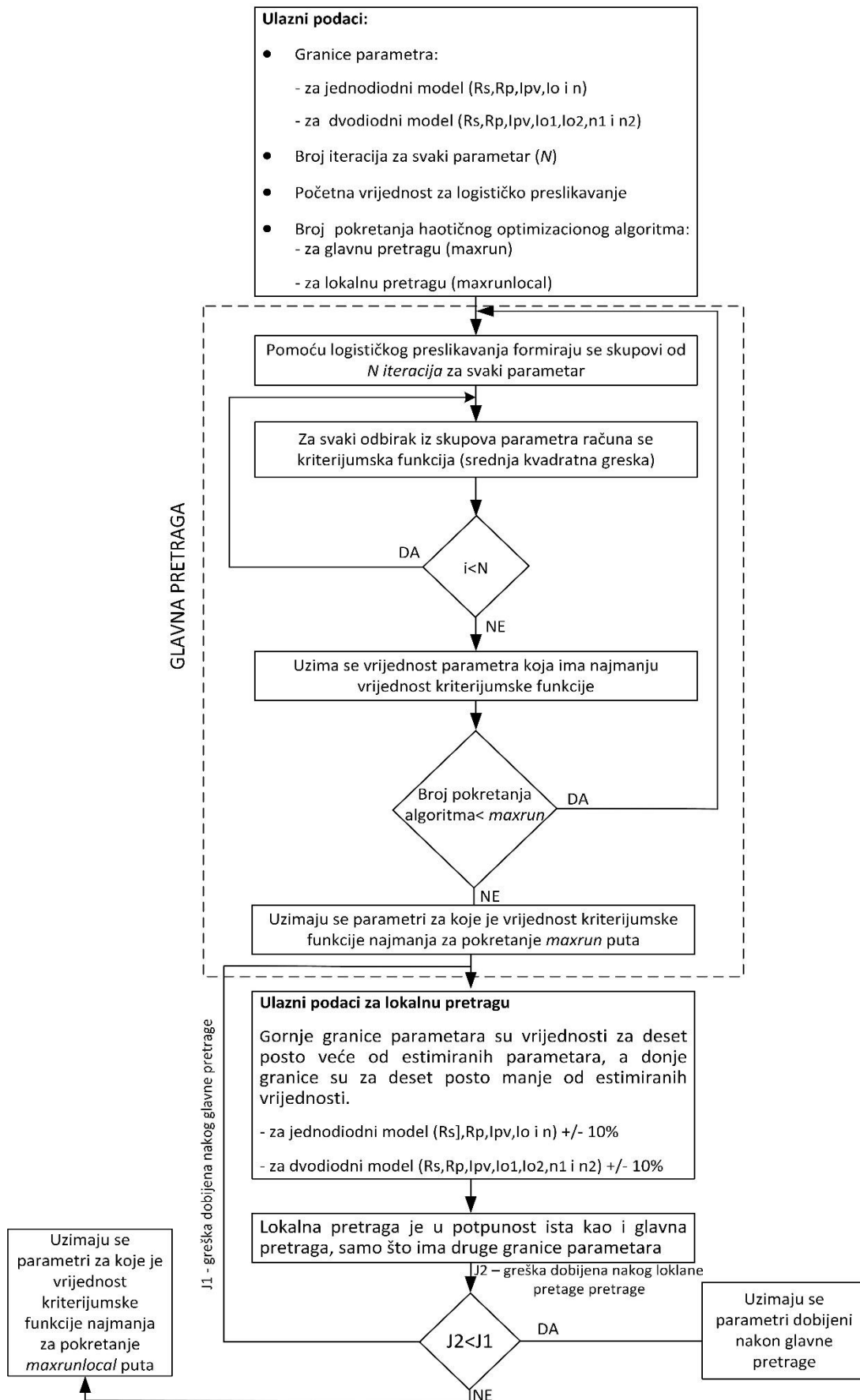
Može se primijetiti da za male vrijednosti r brojnost populacije ima jedinstvenu i konačnu vrijednost. Međutim za r veće od 3 grafik se dijeli na dva dijela (dolazi do bifurkacije) što znači da će brojnost populacije oscilirati između dvije vrijednosti. Sa daljim povećanjem konstante proporcionalnosti udvostručavaju se ciklusi perioda, odnosno vrijednosti između kojih populacija oscilira. Grafik će se ponašati na ovaj način sve dok se vrijednost konstante proporcionalnosti ne poveća do 3.54409 kada on počinje da pokazuje haotično ponašanje. Za sve vrijednosti r između 3.54409 i 4 brojnost populacije će konvergirati uvijek ka različitim tačkama, zadržavajući se u opsegu između 0 i 1. Ukoliko bismo nastavili sa povećavanjem r brojnost populacije izašla bi iz ovog intervala, zbog čega se može reći da sistem divergira.

Na slici 3.2 prikazana je podjela HOA algoritama na algoritam za estimaciju parametara jednodiodnog modela koji kao kriterijumske funkcije koristi SDM ili Lambert funkciju i algoritma za estimaciju parametara dvodiodnog modela koji kao kriterijumsku funkciju koristi DDM (jednačina 3.4).



Slika 3.2 Podjela HOA algoritma

Blok diagram haotične optimizacije parametara je prikazan na slici 3.3.



Slika 3.3 Blok diagram HOA algoritma

3.2 OPIS REALIZOVANOG ALGORITMA

U ovom dijelu poglavlja detaljno je opisan svaki dio realizovanog Haotičnog algoritma za estimaciju parametara solarnih ćelija. Takođe, dati su dijelovi realizovanog Matlab koda.

- **Ulazni podaci**

Pokretanje algoritma zahtjeva definisanje ulaznih podataka. Matlab kodom 1 je prikazano definisanje ulaznih podataka algoritma za estimaciju parametara jednodiodne ćelije.

MATLAB® kod 1 Definisane ulaznih podataka za jednodiodnu solarnu ćeliju

```
%% R.T.C France Cell
% Granice parametara
%   Rs      Rp      Ipv  Io  a
Lb=[0.032    50     0.6   30  0.8]; %donje granice
Ub=[0.04     58     0.9   35  2]; %gornje granice
po=0.9; %Pocetne vrijednosti
n=1000000; % Broj tacaka
maxrun=100; % Broj pokretanja algoritma
maxrunlocal=20; % Broj pokretanja lokalne pretrage algoritma
```

Prema tome, ovim dijelom koda se definiše: broj pokretanja algoritma za glavnu pretragu (**maxrun**), broj pokretanja algoritma za lokalnu pretragu (**localmaxrun**), broj odbiraka za svaki parametar koji se estimira (**n**), početna vrijednost logističkog preslikavanja (**po**) i granice u kojima se pretražuju vrijednosti parametara solarne ćelije (**Lb** - set donjih granica, **Ub** – set gornjih granica parametara). Broj estimiranih parametara u slučaju jednodiodnog modela je pet, a u slučaju dvodiodnog modela je sedam.

Matlab kodom 2 je prikazano definisanje ulaznih podataka algoritma za estimaciju parametara dvodiodne ćelije.

MATLAB® kod 2 Definisane ulaznih podataka za dvodiodnu solarnu ćeliju

```
%% R.T.C France Cell
% Granice parametara
%   Rs      Rp      Ipv  Io1  a1  Io2  a2
Lb=[0.025    50     0.6   70  1.5  17  1]; %lower bounds of
variables
Ub=[0.04     58     0.9   90  3    27  1.6]; %upperboundsof
variables
po=0.9; %Pocetne vrijednosti
n=1000000; % Broj tacaka
maxrun=100; % Broj pokretanja algoritma
maxrunlocal=20; % Broj pokretanja lokalne pretrage algoritma
```

Podaci kao što su: izmjerene vrijednost napona (U_{iz}), izmjerene vrijednost struje (I_{iz}), termalni napon (V_t) i broj izmjerenih tačaka (N) uzimaju se iz m fajla *podaci*. U ovom *m fajlu* su dati svi podaci koji su važni za određeni panel ili ćeliju. Primjer jednog takvog m fajla je dat Matlab kodom 3.

Termalni napon solarne ćelije se računa na sljedeći način:

$$V_t = \frac{N_s k T}{q} \quad (3.6)$$

gdje su: N_s – broj redno vezanih solarnih ćelija, k – Bolcmanova konstanta, T – temperatura u Kelvinima i q – količina naelektrisanja elektrona.

MATLAB® kod 3 Podaci za solarnu ćeliju R.T.C. France Cell

```

% Struja kratkog spoja
Iks=0.7603;
% Napon praznog hoda
Uph=0.5728;
% Struja u tacki maksimalne snage
Im=0.6894;
% Napon u tacki maksimalne snage
Um=0.4507;
% Broj redno vezanih celija
Ns=1;
% Nominalna temperatura celije
Tn=25+273.15;
% Stvarna temperatura celije
T=33+273.15;
% Strujno-temperaturna konstanta
Ki=3.18*10^-3;
% Naponsk-temperaturna konstanta
Kv=-0.123;
% Insolacija
G=1000;
% Nominalna insolacija
Gn=1000;
% Razlika T
dT=T-Tn;
% Bolcmanova konstanta
k=1.3806503*10^-23;
% Kolicin naelektrisanja elektrona
q=1.60217646*10^-19;
% Termalni napon
Vt=N*s*k*T/q;
%% Mjerenja
% Struje
Iiz=[0.7640 0.7620 0.7605 0.7605 0.7600 0.7590 0.7570
0.7570 0.7555 0.7540 0.7505 0.7465 0.7385 0.7280 0.7065
0.6755 0.6320 0.5730 0.4990 0.4130 0.3165 0.2120 0.1035 -
0.0100 -0.1230 -0.2100];

```

```

% Naponi
    Uiz=[-0.2057  -0.1291  -0.0588  0.0057  0.0646  0.1185
0.1678  0.2132  0.2545  0.2924  0.3269  0.3585  0.3873  0.4137
0.4373  0.4590  0.4784  0.4960  0.5119  0.5265  0.5398  0.5521
0.5633  0.5736  0.5833  0.5900];
% Broj mjerenja
    N=length(Uiz);

```

- **Glavni dio koda**

Za estimaciju parametara solarne ćelije mogu se koristiti dva pristupa. Prvi pristup koristi podatke sa natpisne pločice, dok drugi pristup osim poznavanja nekih podataka sa natpisne pločice zahtijeva i poznavanje vrijednosti izmjerene struja-napon karakteristike date solarne ćelije.

Glavni dio HOA algoritma koji se koristi za estimaciju parametara jednodiodnog modela bez korišćenja lokalne haotične pretrage dat je Matlab kodom 4.

MATLAB® kod 4 Glavna pretraga za jednodiodnu solarnu ćeliju

```

%% Teorija HAOS-a -----start
% Globalna pretraga
for run=1:maxrun
    run

    [Rs,Rp,Ipv,Io,a]=inicijal(Lb,Ub,po,n);
%   Parametri za estimaciju
    x=[Rs;Rp;Ipv;Io;a];
%   Racunanje fitnes funkcije
    for i=1:n
        f(i,1)=kriterijum(x(:,i),Uiz,Iiz,Vt,N);
    end
%   Uzimanje najboljeg seta parametara
    [fmin,index]=min(f); %
%   Cuvanje najmanje vrijednosti fitnes funkcije
    fffmin(run)=fmin;
    pbest(:,run)=x(:,index);

end
% Odredjivanje najmanje fitnes funkcije za pozivanje
maxrun puta
[fffmin,bestrun]=min(fffmin);
gbest=pbest(:,bestrun);
%Najbolja vrijednost prije lokalne pretrage
J1=fffmin;
gbest=pbest(:,bestrun);

```

Glavni dio HOA algoritma koji se koristi za estimaciju parametara dvodiodnog modela bez korišćenja lokalne haotične pretrage dat je Matlab kodom 5.

MATLAB® kod 5 Glavna pretraga za dvodiodnu solarnu ćeliju

```

for run=1:maxrun
    run

    [Rs,Rp,Ipv,Io1,a1,Io2,a2]=inicijal(Lb,Ub,po,n);
%   Parametri za estimaciju
    x=[Rs;Rp;Ipv;Io1;a1;Io2;a2];
%   Racunanje fitnes funkcije
    for i=1:n
        f(i,1)=kriterijum(x(:,i),Uiz,Iiz,Vt,N);
    end
%   Uzimanje najboljeg seta parametara
    [fmin,index]=min(f); % finding out the best particle
%   Cuvanje najmanje vrijednosti fitnes funkcije
    fmin(run)=fmin;
    pbest(:,run)=x(:,index);

end
% Odredjivanje najmanje fitnes funkcije za poyivanje maxrun
puta
[ffmin,bestrun]=min(fmin); % finding out the best particle
gbest=pbest(:,bestrun);
%Najbolja vrijednost prije lokalne pretrage
J1=ffmin;
%
gbest=pbest(:,bestrun);

```

Nakon definisanja potrebnih ulaznih podataka ulazi se u glavnu *for* petlju HOA algoritma i poziva se funkcijski fajl *inicijal* prikazan Matlab kodom 6. Ovaj dio koda (funkcijski fajl *inicijal*) na osnovu jednačine logističkog preslikavanja (3.5) kreira niz od n vrijednosti za svaki parametar solarne ćelije.

MATLAB® kod 6 Funkcijski fajl inicijal

```

function [Rs,Rp,Ipv,Io,a]=inicijal(L,U,po,n)
%% Rs-----
start
y(1)=po*rand;
for s=1:n+1;
    y(s+1)=4*y(s)*(1-y(s));
    Rs(s)=L(1)+y(s)*(U(1)-L(1));
end
t=1:n+2;
T=t;

```

```

%% Rp-----
start
y(1)=po*rand;
for s=1:n+1;
    y(s+1)=4*y(s)*(1-y(s));
    Rp(s)=L(2)+y(s)*(U(2)-L(2));
end
t=1:n+2;
T=t;
%% Ipv-----
-start
y(1)=po*rand;
for s=1:n+1;
    y(s+1)=4*y(s)*(1-y(s));
    Ipv(s)=L(3)+y(s)*(U(3)-L(3));
end
t=1:n+2;
T=t;
%% Io-----
start
y(1)=po*rand;
for s=1:n+1;
    y(s+1)=4*y(s)*(1-y(s));
    Io(s)=(L(4)+y(s)*(U(4)-L(4)))*10^-8;
end
t=1:n+2;
T=t;
%% a-----
start
y(1)=po*rand;
for s=1:n+1;
    y(s+1)=4*y(s)*(1-y(s));
    a(s)=L(5)+y(s)*(U(5)-L(5));
end
t=1:n+2;
T=t;

```

U kodu 3 su dati osnovni podaci ćelije ili panela koji su potrebni za estimaciju parametara i to: podaci sa natpisne pločice, mjerene vrijednosti napona i struje, temperatura i insolacija u trenutku mjerenja, kao i broj redno vezanih ćelija. Funkcijskim fajlom (kod 6) pomoću logističkog preslikavanja inicijalizuje se za svaki parametar (kod jednodiodne solarne ćelije to je pet parametara, a kod dvodiodne solarne ćelije sedam parametara) kao niz od n brojeva. Nakon toga se kreira matrica \mathbf{x} gdje je svaki red jedan niz. Pomoću logističkog preslikavanja kreiraju se haotični nizovi za sve parametre pomoću funkcije *inicijal*. Nakon kreiranja datih nizova računa se fitnes funkcija pomoću funkcijskog fajla *kriterijum*. U zavisnosti da li se koristi LambertW ili SDM kriterijumska funkcija data su dva različita kriterijumska *m fajla*. Kao ulazni podaci za funkciju *kriterijum* uzima se po jedna kolona matrice \mathbf{x} koja ustvari predstavlja po

jedan odbirak svih parametara. Takođe, uzimaju se nizovi izmjerenih vrijednosti struja (***I_{iz}***) i napona (***U_{iz}***) solarne ćelije čiji parametri se estimiraju. Broj ***N*** je broj odbiraka ova dva niza, odnosno broj izmjerenih tačaka solarne ćelije.

MATLAB® kod 7 Računanje fitnes Lambert W funkcije za jednodiodni model solarne ćelije

```
function f=kriterijum(x,Uiz,Iiz,Vt,N)
% Uzimanje vrijednosti parametara za odredjeni odbirak i
Rs=x(1);
Rp=x(2);
Ipv=x(3);
Io=x(4);
a=x(5);

%% LambertW-----Kriterijumska funkcija-----
greska=0;
% Odredjivanje greske za sve odbirke
for t=1:N

W=Io*Rs*Rp/a/Vt/(Rs+Rp)*exp((Rp*(Rs*Ipv+Rs*Io+Uiz(t)))/a/V
t/(Rs+Rp));
Iest=(Rp*(Ipv+Io)-Uiz(t))/(Rs+Rp)-a*Vt/Rs*lambertw(W);
greska(t)=(Iiz(t)-Iest)^2;
end
RMSE=sqrt(sum(greska)/N);
%% Fitnes funkcija
f=abs(RMSE);
```

U Matlab kodu 7 se kao funkcija cilja ili kriterijumska funkcija koristi Lambert W funkcija. Nakon postavljanja promjenjive ***greska*** na vrijednost 0 ulazi se u *for* petlju u kojoj, za date odbirke nizova parametara, računa vrijednost struje I_{est} . U formuli za računanje I_{est} koristi se vrijednost eksperimentalno izmjerenog napona U_{iz} . Prvo se računa izraz W (3.2), a zatim I_{est} (3.1). Nakon toga, računa se promenljiva ***greska*** tako što se oduzimaju kvadratne vrijednosti I_{est} i I_{iz} . Postupak se ponavlja za sve odbirke nizova ***U_{iz}*** i ***I_{iz}***. Na kraju se računa srednja kvadratna greška shodno izrazu (3.7) [41].

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (I_{izm i} - I_{est i})^2} \quad (3.7)$$

Matlab kodom 8 je prikazan dio programa kojim se računa promenljiva ***greška*** u slučaju kada se koristi kriterijumska SDM funkcija.

MATLAB® kod 8 Računanje fitnes SDM funkcije za jednodiodni model solarne ćelije

```

% SDM model-----Kriterijumska funkcija-----
greska=0;
% Odredjivanje greske za sve odbirke
for t=1:length(Uiz)
    greska(t)=(Ipv-
Io*(exp((Uiz(t)+Iiz(t)*Rs)/Vt/a)-1)-(Uiz(t)+Iiz(t)*Rs)/Rp-
Iiz(t))^2;
end
% Nalazenje srednje kvadratne greske
RMSE=sqrt(sum(greska)/N);
    
```

Izrazom (3.4) je data kriterijumska funkcije SDM koja je izvedena iz (2.1) [41]. Ako se koristi SDM, srednja kvadratna greška (RMSE) se računa na sljedeći način:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(U, I)^2} \quad (3.8)$$

U slučaju estimacije parametara dvodiodnog modela solarne ćelije (sedam parametara) koristi se DDM kriterijumska funkcija. Matlab kodom 9 je dat funkcijski fajl **kriterijum** za slučaj dvodiodnog modela.

MATLAB® kod 9 Računanje fitnes DDM funkcije za dvodiodni model solarne ćelije

```

function f=kriterijum(x,Uiz,Iiz,Vt,N)
% Uzimanje vrijednosti parametara za odredjeni odbirak i
Rs=x(1);
Rp=x(2);
Ipv=x(3);
Io1=x(4);
a1=x(5);
Io2=x(6);
a2=x(7);

% DDM model-----Kriterijumska funkcija-----
greska=0;
% Odredjivanje greske za sve odbirke
for t=1:length(Uiz)
    greska(t)=(Ipv-Io1*(exp((Uiz(t)+Iiz(t)*Rs)/Vt/a1)-
1)-Io2*(exp((Uiz(t)+Iiz(t)*Rs)/Vt/a2)-1)-
(Uiz(t)+Iiz(t)*Rs)/Rp-Iiz(t))^2;
end
% Nalazenje srednje kvadratne greske
RMSE=sqrt(sum(greska)/N);
    
```

```
%% Fitnes funkcija
f=abs (RMSE) ;
```

Razlika između funkcijskog fajla **kriterijum** za slučaj jednodiodnog i dvodiodnog modela je u sljedećem: kod dvodiodnog modela solarne ćelije estimira se sedam parametara, a samim tim je matrica **x** veća za dva reda. Izrazom (3.4) je data kriterijumska funkcija DDM. Greška se računa isto kao islučaju jednodiodne solarne ćelije (3.6).

Nakon računanja srednje kvadratne greške za jedan odbirak iz **n** nizova parametara, kao izlaznu vrijednost funkcija **kriterijum** daje grešku koja se čuva u nizu **f**. Ova procedura se odradi za sve odbirke **n**. Matlab kodom 10 uzima se najmanja greška i njena pozicija (**index**) u nizu grešaka.

MATLAB® kod 10 Uzimanje najboljeg seta parametara

```
% Uzimanje najboljeg seta parametara
[fmin, index]=min (f) ;
```

Matlab kodom 11 u **pbest** se upisuje set parametara sa najmanjom greškom tako što iz matrice **x** uzima **index** kolone.

MATLAB® kod 11 Određivanje pbest parametara koji se određuju nakon završenog run-a

```
pbest (:, run)=x (:, index) ;
```

Prethodno opisano predstavlja jedan **run** i cjelokupni postupak se ponavlja za definisani **run** puta.

Matlab kodom 12 definisano je određivanje **gbest** parametara (globalne vrijednosti) koji se određuju nakon završenih svih zadatih pokretanja, a prije lokalne pretrage. Na ovaj način se dobijaju estimirani parametri datog električnog modela solarne ćelije ili panela.

MATLAB® kod 123 Određivanje gbest parametara koji se određuju nakon završenih run-ova

```
[ffmin, bestrun]=min (ffmin) ;
gbest=pbest (:, bestrun) ;
```

Matlab kodom 13 je definisana lokalna pretraga za slučaj jednodiodnog modela.

MATLAB® kod 13 Lokalna pretraga

```
% Lokalna pretraga
for run=1:maxrunlocal
    run

    for i=1:5
        l1 (i)=gbest (i) -0.1*gbest (i) ;
```

```

        Ul(i)=gbest(i)+0.1*gbest(i);
    end

    [Rs,Rp,Ipv,Io,aaa]=inicijal(Ll,Ul,po,n);

    x=[Rs;Rp;Ipv;Io;aaa];
    % evaluating fitness
    for i=1:n
        f(i,1)=kriterijum(x(:,i),Uiz,Iiz,Vt,N);
    end
    [fmin,index]=min(f); % finding out the best particle

    ffmin(run)=fmin; % storing best fitness
    pbest(:,run)=x(:,index);

end
[J2,bestrun]=min(ffmin);

```

Kod za lokalnu pretragu je u potpunosti isti kao i glavni kod, kako za estimaciju parametara jednodiodnog modela tako i za estimaciju parametara dvodiodnog modela. Jedina razlika je u tome što se donje i gornje granice parametara definišu na osnovu već dobijenih estimiranih vrijednosti parametara. U ovom slučaju gornje granice parametara su vrijednosti za deset posto veće od estimiranih parametara, a donje granice su za deset posto manje od estimiranih vrijednosti. U Matlab kodu 13 pozivaju se funkcije *inicijal* i *kriterijum*, koje su identične kao u glavnom kodu. Izračunate greške se upisuju u ***pbest*** set parametara sa najmanjom greškom. Najmanja greška dobijena nakon estimacije parametara lokalnom pretragom upisuje se u promenljivu ***J2***. Greška dobijena estimacijom parametara korišćenjem lokalne pretrage (***J2***) Matlab kodom 14 se upoređuje sa greškom dobijenom nakon korišćenja glavne pretrage (***J1***).

MATLAB® kod 14 upoređivanje najmanjih grešaka lokalne i glavne pretrage

```

[J2,bestrun]=min(ffmin);
if(J1>J2)
    gbest=pbest(:,bestrun);
end

```

U slučaju da je greška dobijena korišćenjem lokalne pretrage manja, vrijednost estimiranih parametara na taj način se upisuju u *gbest* i uzimaju se kao konačne vrijednosti parametara.

4 PRIMJENA PREDLOŽENOG METODA U ESTIMACIJI PARAMETARA SOLARNE ĆELIJE

Pomoću Haotičnog optimizacionog algoritma (HOA) estimirani su parametri jednodiodnog i dvodiodnog modela solarne ćelije R.T.C. FranceCell i solarnog panela BP solar MSX-60. Estimacija parametara električnog modela predloženim algoritmom izvršena je na dva načina: koristeći izmjerene struja-napon karakteristike i koristeći katalogske podatke (natpisna pločica).

Parametri jednodiodnog modela su estimirani HOA algoritmom koji koristi kao kriterijumske funkcije LambertW i SDM funkcija. Parametri dvodiodnog modela estimirani su HOA algoritmom sa DDM kriterijumskom funkcijom.

4.1 OPŠTI PODACI O SOLARNOJ ĆELIJI I PANELU

U ovom dijelu su dati opšti podaci o solarnoj ćeliji i solarnom panelu.

4.1.1 R.T.C France Cell

U Tabeli 4.1 dati su podaci sa natpisne pločice solarne ćelije R.T.C. France Cell. Podaci o solarnoj ćeliji i mjerene vrijednosti (mjerjenje je izvršeno u 26 tačaka pri temperaturi od 33 °C i insolaciji od 1000 W/m²) su preuzeti iz [42].

Tabela 4.1 Podaci sa natpisne pločice R.T.C France Cell

U_{ph} (Napon praznog hoda)	0.5728
I_{ks} (Struja kratkog spoja)	0.7603
U_m (Napon u tački maksimalne snage)	0.4507
I_m (Struja u tački maksimalne snage)	0.6894

4.1.2 BP MSX – 60

Solarni panel BP MSX-60 se sastoji od 36 redno vezanih ćelija. Podaci sa natpisne pločice su dati u Tabeli 4.2. Podaci o solarnom panelu i mjerene vrijednosti (mjerjenje je izvršeno u 60 tačaka, pri nominalnim uslovima (STC), tj. temperaturi 25°C i insolaciji od 1000 W/m²) su preuzeti iz [43].

Tabela 4.2 Podaci sa natpisne pločice BP MSX - 60

U_{ph} (Napon praznog hoda)	21.1
I_{ks} (Struja kratkog spoja)	3.8
U_m (Napon u tački maksimalne snage)	17.1
I_m (Struja u tački maksimalne snage)	3.5

4.2 ESTIMACIJA PARAMETARA SOLARNIH ĆELIJA KORISTEĆI IZMJERENE STRUJA-NAPON KARAKTERISTIKE.

U ovom poglavlju su dati rezultati dobijeni estimacijom parametara jednodiodnog i dvodiodnog modela solarne ćelije R.T.C. France cell i solarnog panela BP solar MSX-60 predloženim algoritmom koristeći izmjerene struja-napon karakteristike.

U slučaju jednodiodnog modela u HOA algoritmu su korišćene dvije kriterijumske funkcije: SingleDiodeModel (SDM) (3.3),(3.8) i LambertW (3.1),(3.2) i (3.3). Kod dvodiodnog modela u HOA algoritmu je korišćena DupleDiodeModel (DDM) kriterijumska funkcija (3.5)(3.6).

4.2.1 Estimacija parametara jednodiodnog modela R.T.C. France cell solarne ćelije

Granične vrijednosti parametara jednodiodnog modela solarne ćelije estimiranih HOA algoritmom, kada se kao kriterijumska funkcija koristi SDM funkcija, date su u Tabeli 4.3

Tabela 4.3 Granične vrijednosti parametara jednodiodnog modela solarne ćelije - SDM kriterijumska

	R_s	R_p	I_{pv}	$I_o (10^{-8})$	a
DONJA GRANICA	0.03	40	0.6	25	0.8
GORNJA GRANICA	0.45	60	1	38	1.8

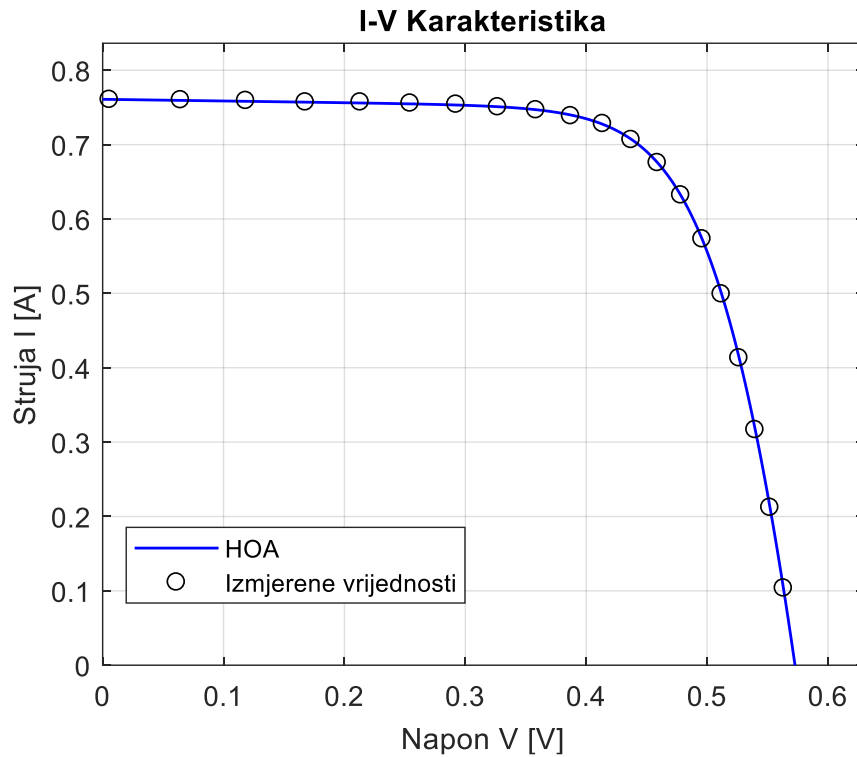
Za određivanje parametara korišćeno je milion odbiraka ($n=1000000$) i sto pokretanja algoritma ($maxrun=100$).

U Tabeli 4.4 date su dobijene vrijednosti parametara i srednja kvadratna greška.

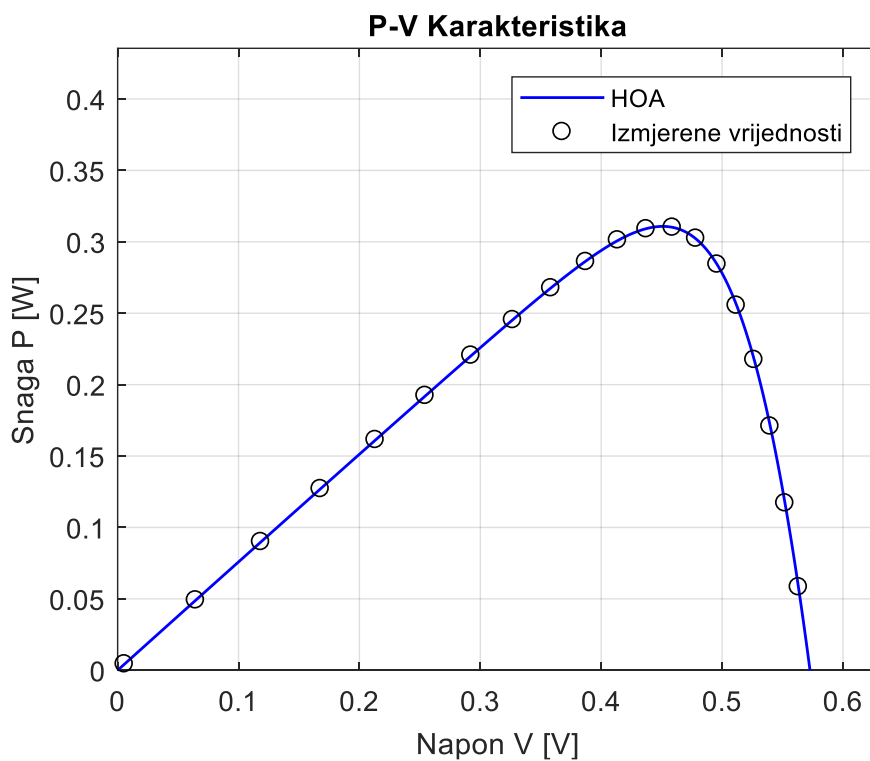
Tabela 4.4 Estimirane vrijednosti parametara i srednja kvadratna greška

PARAMETRI	R_s	R_p	I_{pv}	$I_o (10^{-8})$	a	SDM- RMSE
	0.0372	44.2509	0.7616	25.705	1.4585	1.2244E-3

Na slikama 4.1 i 4.2 prikazane su struja-napon ($I-V$) i snaga-napon ($P-V$) R.T.C. France cell karakteristike dobijene na osnovu estimiranih vrijednosti parametara jednodiodnog modela solarne ćelije datih u Tabeli 4.4.



Slika 4.1 I-V karakteristika za solarnu ćeliju R.T.C. France Cell (SDM, $n=100000$, $maxrun=100$)



Slika 4.2 P-V karakteristika za solarnu ćeliju R.T.C. France Cell (SDM, $n=100000$, $maxrun=100$)

Sa slika 4.1 i 4.2 se može uočiti da karakteristike dobijene estimiranjem parametara jednodiodnog modela solarne ćelije pomoću HOA koristeći SDM kriterijumsku funkciju veoma dobro aproksimiraju mjerene karakteristike.

Granične vrijednosti parametara jednodiodnog modela solarne ćelije estimirane primjenom HOA algoritma kada se kao kriterijumska funkcija koristi funkcija koristi LambertW funkcija date su u Tabeli 4.5.

Tabela 4.5 Granične vrijednosti parametara R.T.C France Cell – LambertW kriterijumska

	R_s	R_p	I_{pv}	$I_o (10^{-8})$	a
DONJA GRANICA	0.02	40	0.65	30	1.25
GORNJA GRANICA	0.05	80	0.85	80	1.85

Zbog kompleksnosti računanja LambertW kriterijumske funkcije, a samim tim i vremena potrebnog za estimaciju parametara u ovom slučaju, korišćene su manje vrijednosti broja odbiraka i broja pokretanja algoritma. Za određivanje parametara korišćeno je deset hiljada odbiraka ($n=10000$) dok je algoritam pokrenut 10 puta ($maxrun=10$).

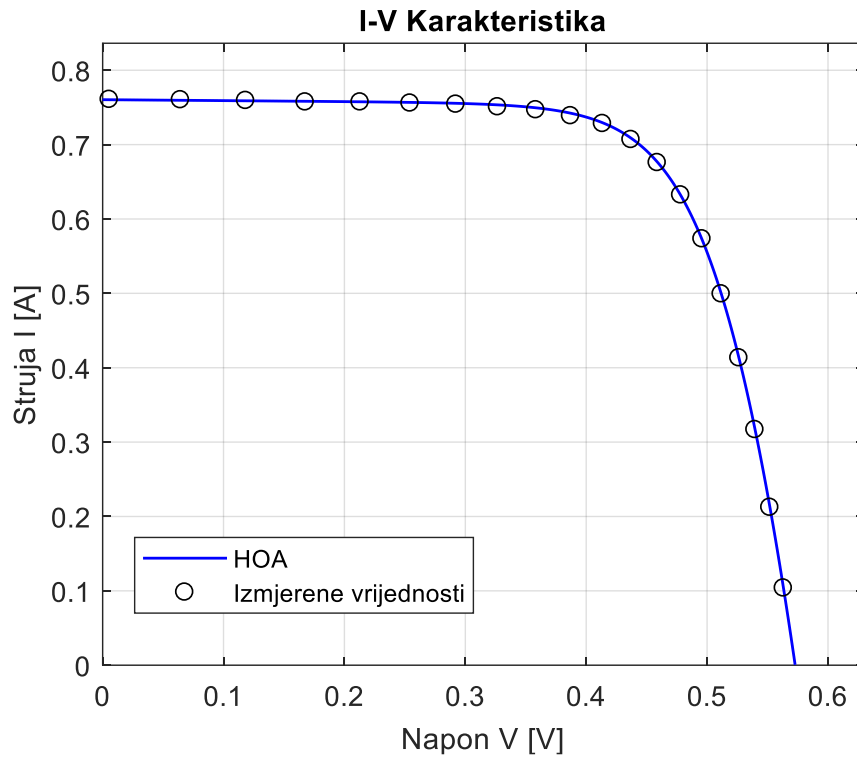
U Tabeli 4.6 date su dobijene vrijednosti parametara i srednja kvadratna greška.

Tabela 4.6 Estimirane vrijednosti parametara i srednja kvadratna greška R.T.C France Cell – LambertW kriterijumska

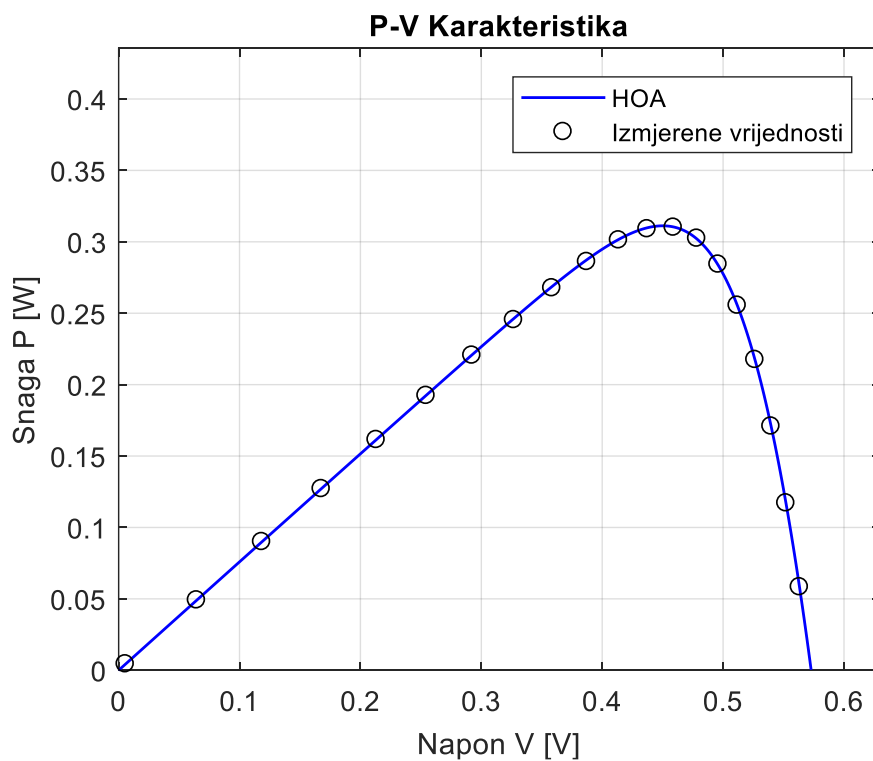
PARAMETRI	R_s	R_p	I_{pv}	$I_o (10^{-8})$	a	Lambert W- RMSE
	0.037371	79.81414	0.760775	33.28901	1.483927	1.6423E-3

Iz Tabele 4.4 i 4.6 se vidi da je srednja kvadratna greška malo veća kada za estimaciju parametara koristi HOA algoritam sa LambertW kriterijumskom funkcijom. Međutim u ovom slučaju broj odbiraka je 100 puta manji nego u slučaju kada HOA algoritam koristi SDM kriterijumsku funkciju dok je i broj pokretanja algoritma 10 puta manji.

Na slikama 4.3 i 4.4 prikazane su struja-napon ($I-V$) i snaga-napon ($P-V$) karakteristike dobijene na osnovu estimiranih vrijednosti parametara jednodiodnog modela solarne ćelije datih u Tabeli 4.6.



Slika 4.3 I-V karakteristika za solarnu ćeliju R.T.C. France Cell (LambertW, n=10000, maxrun=10)



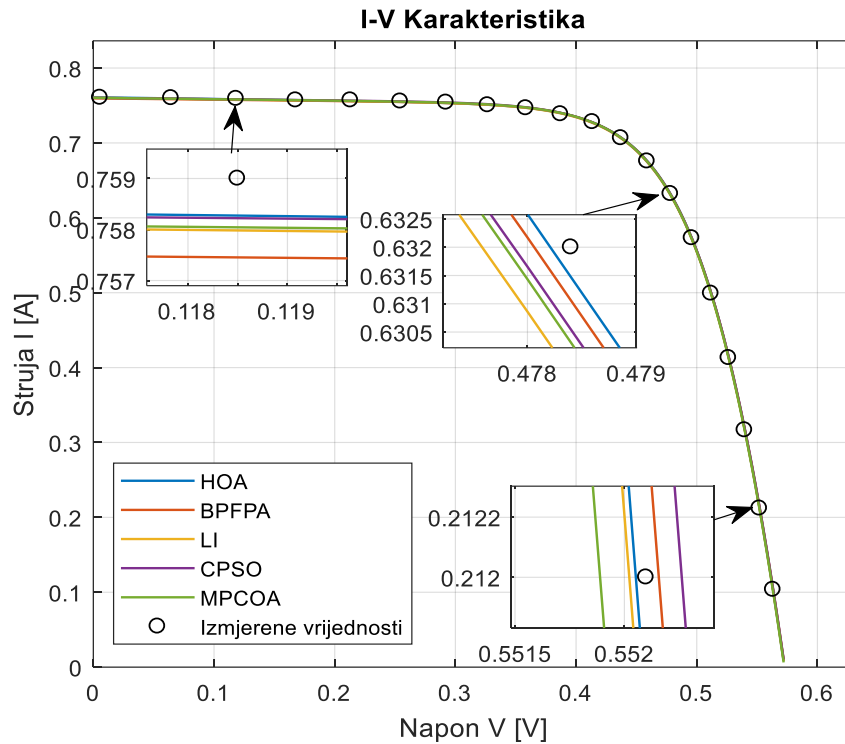
Slika 4.4 P-V karakteristika za solarnu ćeliju R.T.C. France Cell (LambertW, n=10000, maxrun=10)

Radi potvrde i upoređenja rezultata dobijenih korištenjem HOA algoritma za estimaciju parametara jednodiodnog modela solarne ćelije R.T.C France Cell u Tabeli 4.7 su dati uporedni rezultati dobijeni HOA algoritmom sa SDM kriterijumskom funkcijom i rezultati dobijeni pomoću 26 drugih metoda.

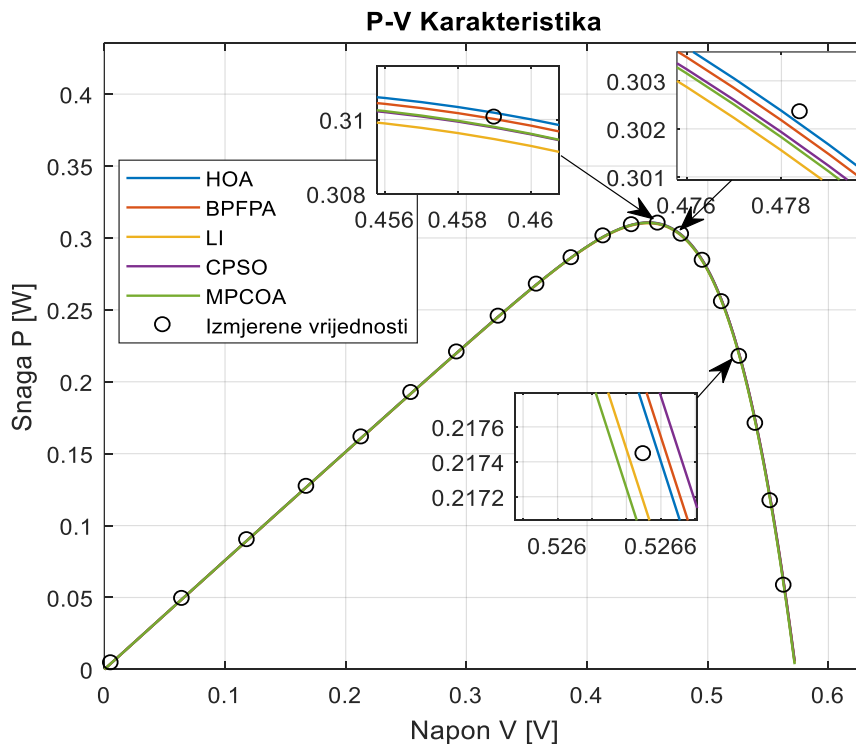
Tabela 4.7 Upoređen rezultati dobijenih pomoću SDM fitnes funkcije za solarni panel R.T.C France Cell sa drugim metodama

Broj	Algoritam	R_s (Ω)	R_p (Ω)	I_{ph} (A)	I_o (μ A)	a	SDM- RMSE
1	HOA	0.0372	44.2509	0.7616	0.25705	1.4585	1.2244e-03
2	BPFPA [21]	0.0366	57.7151	0.7600	0.3106	1.4774	1.2536e-03
3	LI [44]	0.0361423	49.48220	0.760943	0.345657	1.4879916	1.3462e-03
4	CPSO [45]	0.0354	59.012	0.7607	0.4000	1.5033	1.3861e-03
5	MPCOA [30]	0.03635	54.6328	0.76073	0.32655	1.48168	2.3131e-03
6	DE [46]	0.03637	53.7185	0.76077	0.32302	1.48059	2.3423e-03
7	TMP [47]	0.03660	62.574	0.7610	0.3635	1.4935	2.3859e-03
8	BBO [48]	0.03214	78.8555	0.76098	0.86100	1.58742	2.3929e-03
9	MABC [49]	0.036389	53.39999	0.760779	0.321323	1.481385	2.7610e-03
10	ABCDE [46]	0.03637	53.7185	0.76077	0.32302	1.47986	4.8548e-03
11	TLBO [50]	0.036551	52.8405	0.760809	0.312244	1.47578	7.2723e-03
12	GWO [50]	0.037732	45.116309	0.760996	0.2430388	1.451219	7.2845e-03
13	TVACPSO [50]	0.036547	52.889644	0.760788	0.3106827	1.475258	7.3438e-03
14	WCA [50]	0.035363	57.669488	0.760908	0.4135540	1.504381	7.6069e-03
15	CARO [29]	0.03644	53.0893	0.76079	0.31724	1.48168	8.1969e-03
16	PSO [51]	0.0363940	53.7965	0.760798	0.322721	1.48382	9.6545e-03
17	TLBO [52]	0.0364	53.76027	0.7608	0.3223	1.4837	9.6960e-03
18	Newton [42]	0.0364	53.76344	0.7608	0.3223	1.4837	9.6964e-03
19	ABSO [46]	0.03659	52.2903	0.76080	0.30623	1.47986	1.4169e-02
20	PS [53]	0.0313	64.10256	0.7617	0.9980	1.6000	1.4936e-02
21	SA [54]	0.0345	43.10345	0.7620	0.4798	1.5172	1.8998e-02
22	GA [55]	0.0299	42.37288	0.7619	0.8087	1.5751	1.9078e-02
23	DET [56]	0.036	54.532	0.751	0.315	1.487	2.4481e-02
24	MPSO [46]	0.03637	53.7185	0.76077	0.32302	1.47086	3.9022e-02
25	ICA [57]	0.0389	41.1577	0.7603	0.14650	1.4421	1.1582e-01
26	MBA [58]	0.0388	44.61	0.7604	0.2348	1.4890	1.1672e-01
27	MVO [59]	0.0365	59.5884	0.7616	0.32094	1.5252	1.2680e-01

Na slikama 4.5 i 4.6 su dati uporedni grafici $I-V$ i $P-V$ karakteristika dobijenih za različite parametre solarnih ćelija. Naime, na ovim slikama su upoređene karakteristike dobijene estimacijom parametara pomoću HOA algoritma sa SDM kriterijumskom funkcijom i karakteristike dobijene pomoću četiri metode koje imaju najbolje rezultate date u Tabeli 4.7.



Slika 4.5 Uporedna I-V karakteristika R.T.C France Cell (SDM)



Slika 4.6 Uporedna P-V karakteristika R.T.C France Cell (SDM)

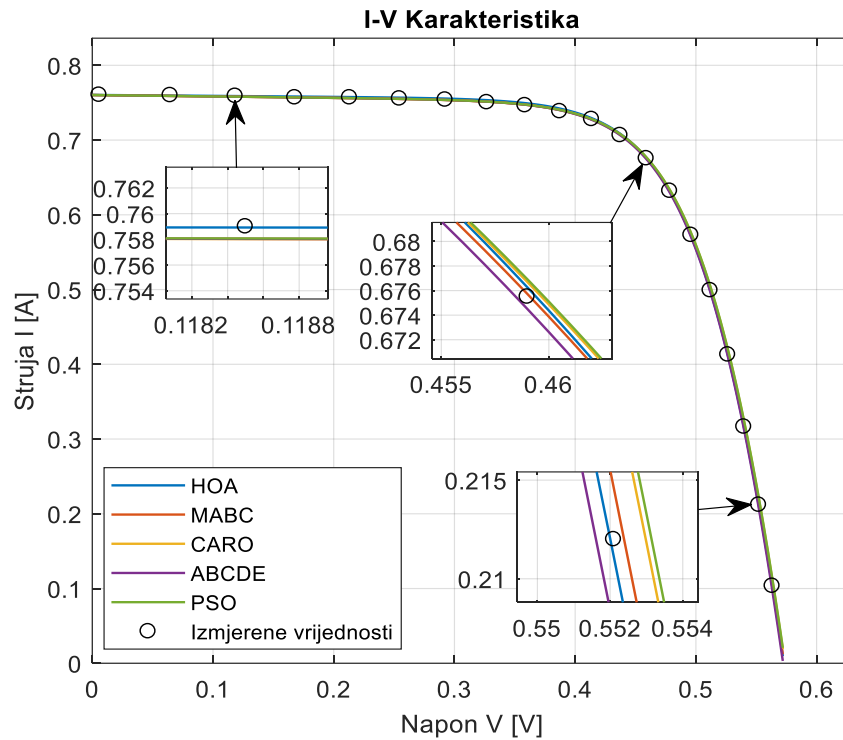
Sa slika 4.5 i 4.6 se može vidjeti da je predloženi algoritam u tačkama od interesa najbolje aproksimira date karakteristike

U Tabeli 4.8 su dati uporedni rezultati dobijeni HOA algoritmom sa LambertW kriterijumskom funkcijom i rezultati dobijeni pomoću 20 drugih metoda.

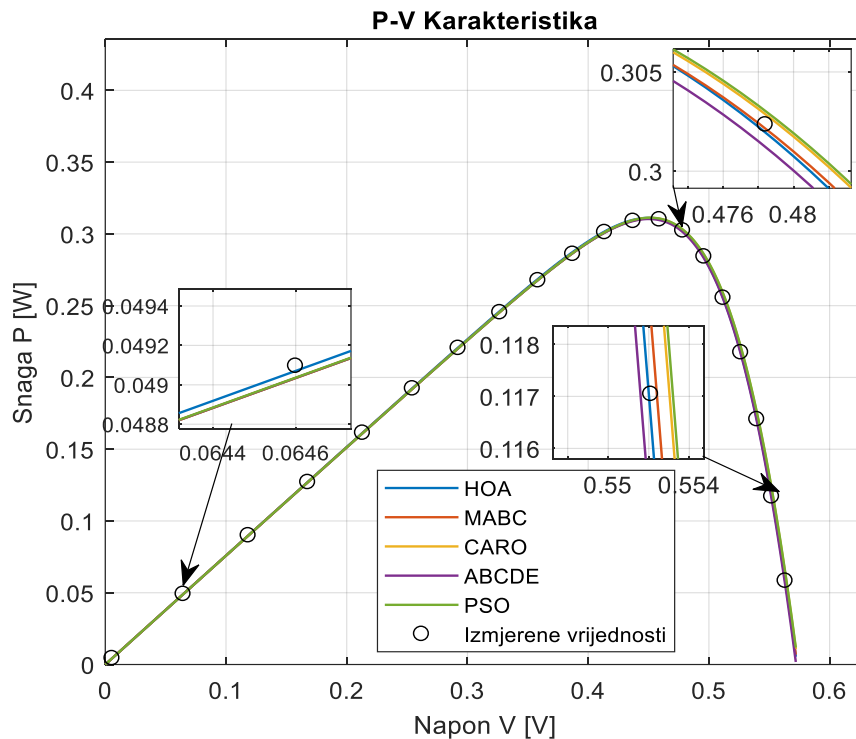
Tabela 4.8 Upoređeni rezultati dobijenih pomoću LambertW fitnes funkcije za solarnu ćeliju R.T.C France Cell sa drugim metodama

Broj	Algoritam	R_s (Ω)	R_p (Ω)	I_{ph} (A)	I_o (μA)	a	LambertW- RMSE
1	HOA	0.037371	79.814140	0.760775	0.33289	1.483927	1.6423e-03
2	MABC [49]	0.036389	53.39999	0.760779	0.321323	1.481385	1.7277e-03
3	BBO [48]	0.03214	78.8555	0.76098	0.86100	1.58742	2.0021e-03
4	ABCDE [46]	0.03637	53.7185	0.76077	0.32302	1.47986	2.9246e-03
5	TLBO [50]	0.036551	52.8405	0.760809	0.312244	1.47578	4.3349e-03
6	GWO [50]	0.037732	45.116309	0.760996	0.2430388	1.451219	4.3496e-03
7	TVACPSO [50]	0.036547	52.889644	0.760788	0.3106827	1.475258	4.3680e-03
8	WCA [50]	0.035363	57.669488	0.760908	0.4135540	1.504381	4.6472e-03
9	CARO [29]	0.03644	53.0893	0.76079	0.31724	1.48168	4.9502e-03
10	PSO [51]	0.0363940	53.7965	0.760798	0.322721	1.48382	5.8310e-03
11	TLBO [52]	0.0364	53.76027	0.7608	0.3223	1.4837	5.8554e-03
12	Newton [42]	0.0364	53.76344	0.7608	0.3223	1.4837	5.8556e-03
13	ABSO [46]	0.03659	52.2903	0.76080	0.30623	1.47986	8.5524e-03
14	PS [53]	0.0313	64.10256	0.7617	0.9980	1.6000	9.8170e-03
15	SA [54]	0.0345	43.10345	0.7620	0.4798	1.5172	1.1655e-02
16	GA [55]	0.0299	42.37288	0.7619	0.8087	1.5751	1.2009e-02
17	DET [56]	0.036	54.532	0.751	0.315	1.487	1.5845e-02
18	MPSO [46]	0.03637	53.7185	0.76077	0.32302	1.47086	2.2470e-02
19	ICA [57]	0.0389	41.1577	0.7603	0.14650	1.4421	7.5021e-02
20	MBA [58]	0.0388	44.61	0.7604	0.2348	1.4890	7.6204e-02
21	MVO [59]	0.0365	59.5884	0.7616	0.32094	1.5252	8.6278e-02

Na slikama 4.7 i 4.8 upoređene su I - V i P - V karakteristike dobijene estimacijom parametara pomoću HOA algoritma sa LambertW kriterijumskom funkcijom i karakteristike dobijene pomoću četiri metode koje imaju najbolje rezultate date u Tabeli 4.8.



Slika 4.7 Uporedna I-V karakteristika R.T.C France Cell (LambertW)



Slika 4.8 Uporedna P-V karakteristika R.T.C France Cell (LambertW)

Sa slika 4.7 i 4.8 se može uočiti da parametri dobijeni primjenom HOA algoritma izuzetno dobro aproksimiraju mjerene vrijednosti I-V i P-V karakteristike.

4.2.1.1 Estimacija parametara jednodiodnog modela solarnog panela BP MSX - 60

Granične vrijednosti parametara jednodiodnog modela solarnog panela BP MSX – 60 estimiranih HOA algoritmom kada se kao kriterijumska funkcija koristi SDM funkcija date su u Tabeli 4.9.

Tabela 4.9 Granične vrijednosti parametara jednodiodnog modela BP MSX 60 – SDM kriterijumska

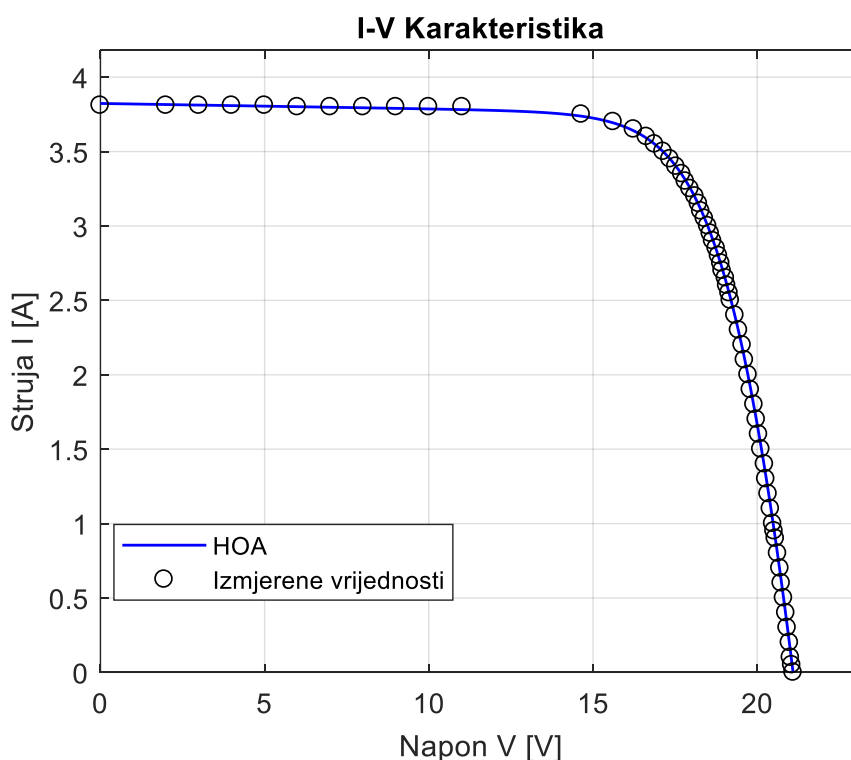
	R_s	R_p	I_{pv}	$I_o (10^{-8})$	a
DONJA GRANICA	0.1	80	2	0.5	0.8
GORNJA GRANICA	0.3	600	4	6	1.5

Za određivanje parametara korišćeno je dvanaest miliona odbiraka ($n=12000000$) i sto pokretanja algoritma ($maxrun=100$). Lokalna pretraga je pokrenuta dvadeset puta ($localmaxrun=20$). U Tabeli 4.10 su date estimirane vrijednosti parametara.

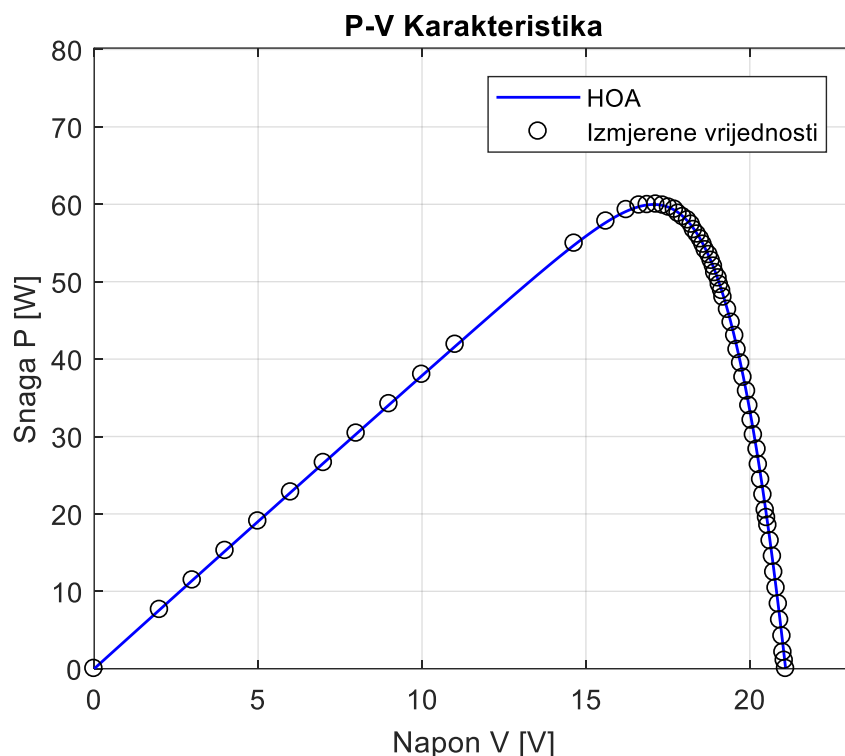
Tabela 4.10 Estimirane vrijednosti parametara i srednja kvadratna greška BP MSX 60 – SDM kriterijumska

PARAMETRI	R_s	R_p	I_{pv}	$I_o (10^{-8})$	a	SDM- RMSE
	0.2455	275.5725	3.8268	5.0569	1.2584	1.8367E-02

I-V i P-V karakteristike dobijene na osnovu estimiranih vrijednosti iz Tabele 4.10 su prikazani na slikama 4.9 i 4.10.



Slika 4.9 I-V karakteristika za solarnu ćeliju BP MSX - 60 (SDM, $n=12000000$, $maxrun=100$)



Slika 4.10 P-V karakteristika za solarnu ćeliju BP MSX - 60 (SDM, n=12000000, maxrun=100)

Sa slika 4.9 i 4.10 se može uočiti da karakteristike dobijene estimacijom parametara solarnog panela pomoću HOA algoritma koristeći SDM kriterijumsku funkciju dobro aporksimiraju mjerene karakteristike.

U Tabeli 4.11 date su granične vrijednosti parametara jednodiodnog modela solarnog panela korišćenih za estimiranje istih predloženim aloritmom kada se kao kriterijumska funkcija koristi LambertW funkcija.

Tabela 4.11 Granične vrijednosti parametara BP MSX 60– LambertW kriterijumska

	R_s	R_p	I_{pv}	$I_o (10^{-8})$	a
DONJA GRANICA	0.2	80	3.5	2	0.5
GORNJA GRANICA	0.3	550	4.2	8	1.5

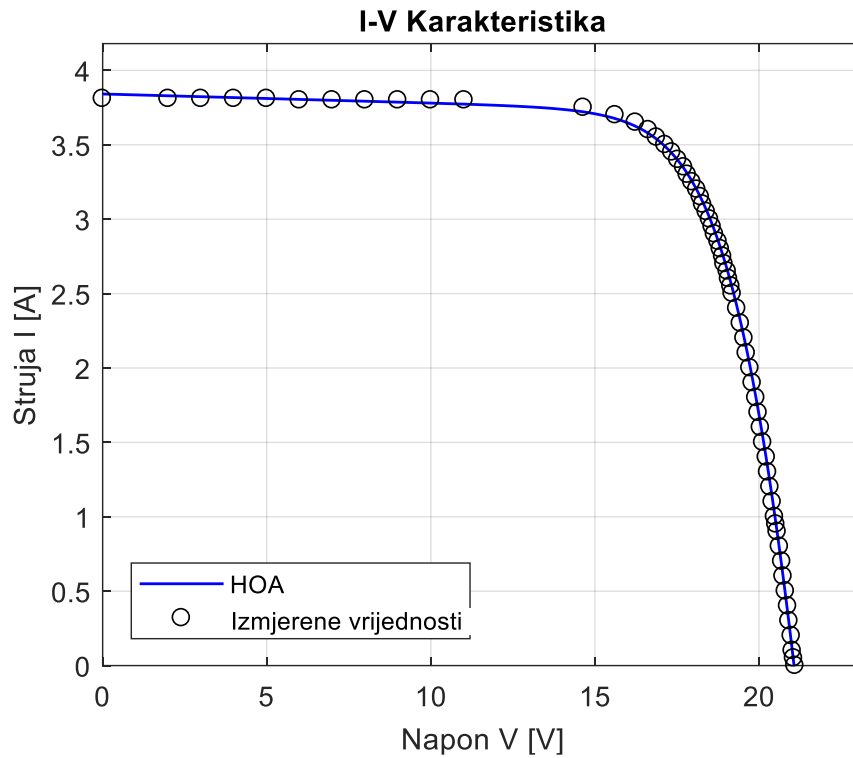
Za određivanje parametara korišćeno je tri hiljade odbiraka (n=3000) i deset pokretanja algoritma (maxrun=10). U Tabeli 4.12 su date estimirane vrijednosti parametara. Kao i u prethodnom slučaju i ovdje je pored glavne korišćena i lokalna pretraga (localmaxrun=2).

Tabela 4.12 Estimirane vrijednsti parametara i srednja kvadratna greška BP MSX 60– LambertW kriterijumska

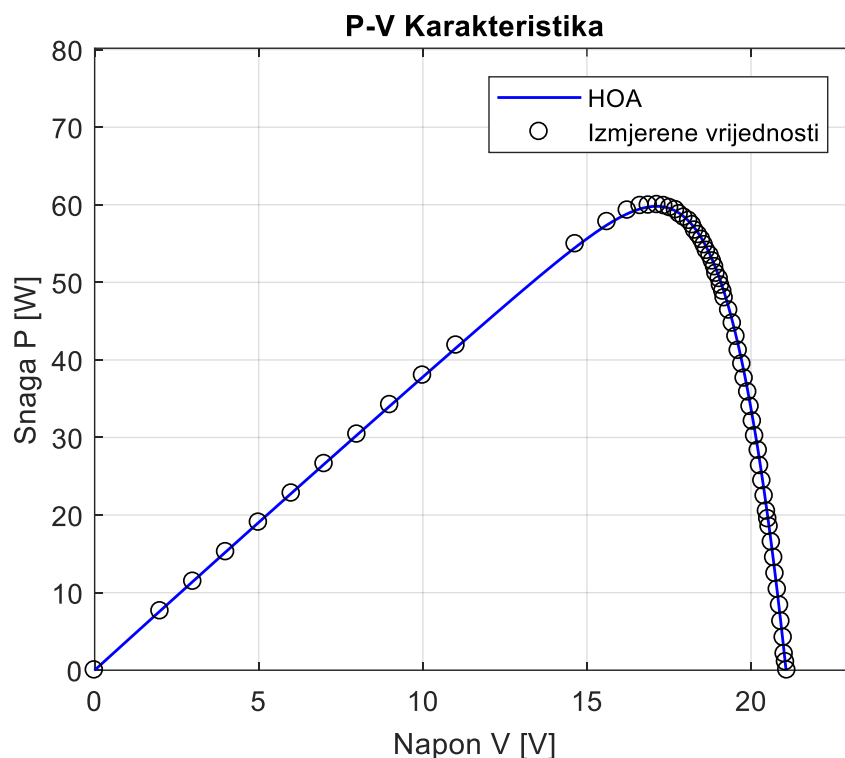
PARAMETRI	R_s	R_p	I_{pv}	$I_o (10^{-8})$	a	LambertW-RMSE
	0.2130	164.4486	3.8463	6.3179	1.2732	2.1791E-02

Iz Tabela 4.10 i 4.12 se uočava da je srednja kvadratna greška veća u slučaju korišćenja LambertW kriterijumske funkcije. Međutim, broj odbiraka u ovom slučaju je mnogo manji.

Na slikama 4.11 i 4.12 su prikazani grafici I - V i P - V karakteristika dobijenih na osnovu estimiranih vrijednosti parametara iz Tabele 4.12.



Slika 4.11 I - V karakteristika za solarnu ćeliju BP MSX - 60
(LambertW, $n=3000$, $maxrun=10$)



Slika 4.12 P-V karakteristika za solarnu ćeliju BP MSX - 60
(LambertW, n=3000, maxrun=10)

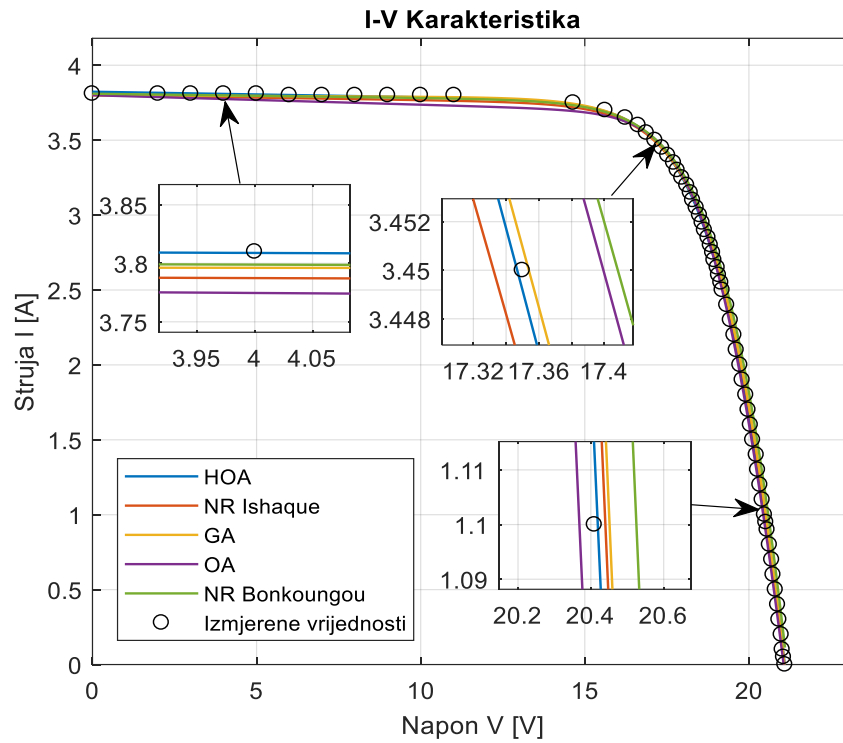
Sa slika 4.11 i 4.12 se uočava veoma dobro poklapanje estimiranih i mjerenih karakteristika.

Kao i u slučaju solarne ćelije R.T.C France cell radi provjere i upoređenja rezultata dobijenih korišćenjem HOA algoritma za estimaciju parametara solarnog panela BP MSX – 60 dobijeni rezultati su upoređeni sa rezultatima dobijenim drugim metodama.

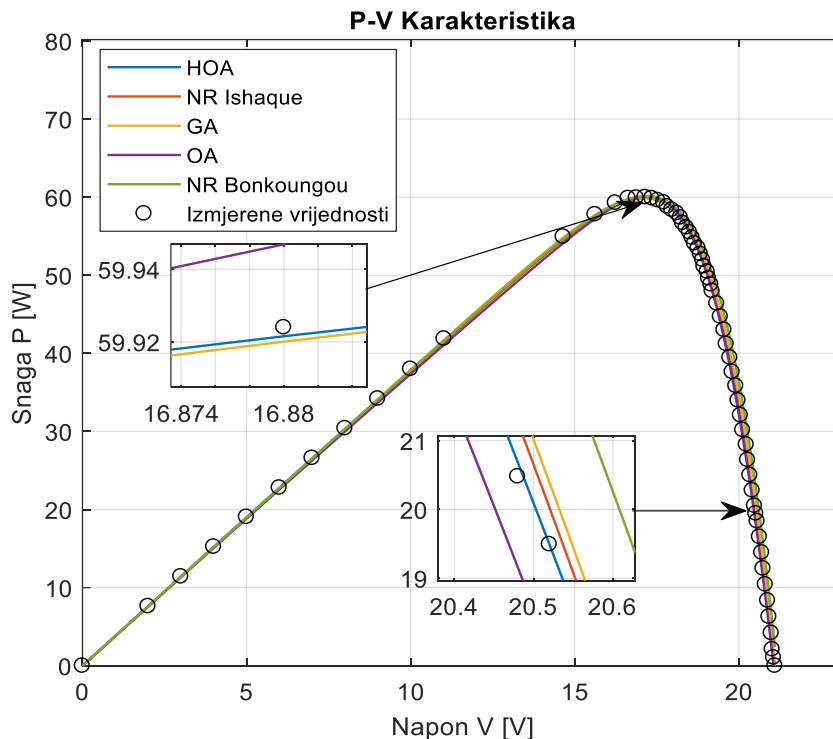
Tabela 4.13 Upoređeni rezultati dobijenih pomoću SDM fitnes funkcije za solarni panel BP MSX – 60 sa drugim metodama

Broj	Algoritam	R_s (Ω)	R_p (Ω)	I_{ph} (A)	I_o (μA)	a	SDM- RMSE
1	HOA	0.2455	275.5725	3.8268	5.0569	1.2584	1.8367E-02
2	NR Ishaque [42]	0.2000	304.8300	3.8030	9.0940	1.3000	3.6334E-02
3	GA [43]	0.1726	1050.6000	3.8006	30.7340	1.3964	4.0039E-02
4	OA [43]	0.3300	157.838	3.8079	0.0475	1.0000	9.3042E-02
5	NR Bonkougou [44]	0.1800	360.002	3.8119	18.5900	1.3600	1.3176E-01

Na slikama 4.13 i 4.14 su dati uporedni grafici I-V i P-V karakteristika. Upoređene su karakteristike dobijene estimacijom parametara pomoću HOA algoritma sa SDM kriterijumskom funkcijom i karakteristike dobijene na osnovu rezultata dobijenih pomoću drugih metoda (Tabela 4.13).



Slika 4.13 Uporedna I-V karakteristika BP MSX 60 (SDM)



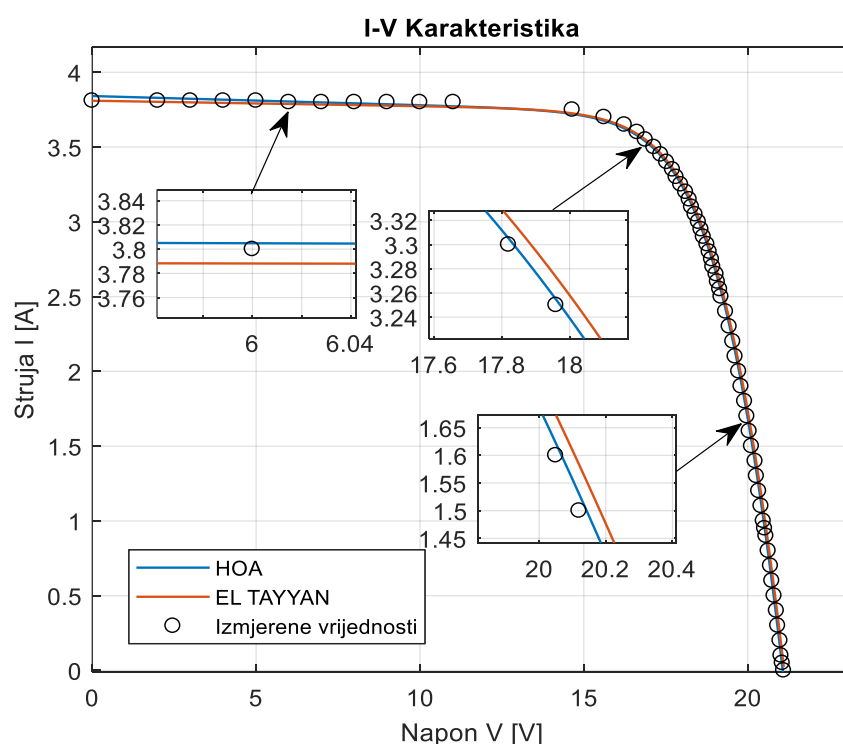
Slika 4.14 Uporedna P-V karakteristika BP MSX 60(SDM)

Uočava se da predloženi algoritam u tačkama od interesa najbolje aproksimira mjerene karakteristike. U Tabeli 4.14 su dati uporedni rezultati dobijeni pomoću HOA algoritma sa LambertW kriterijumskom funkcijom i rezultati preuzeti iz [63].

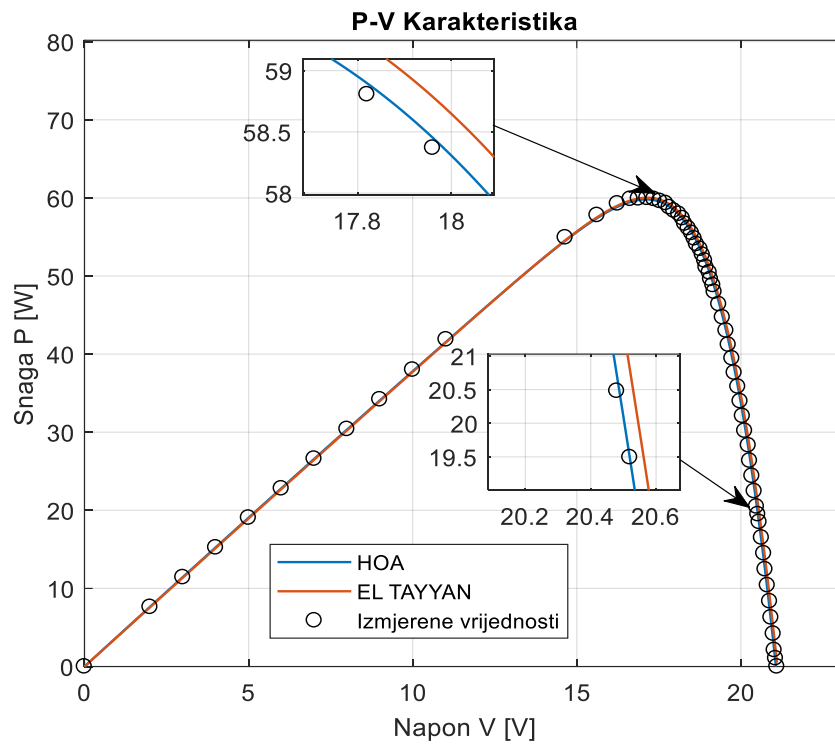
Tabela 4.14 Upoređeni rezultati dobijenih pomoću LambertW fitnes funkcije za solarni panel BP MSX 60 sa drugim metodama

Broj	Algoritam	Rs (Ω)	Rp (Ω)	Iph (A)	Io (10^{-8})	a	LambertW- RMSE
1	HOA	0.213	164.4486	3.8463	6.3179	1.2732	2.1791E-02
2	EL TAYYAN [63]	0.2165	274.9370	3.8130	6.4500	1.2770	4.3310E-02

Na slikama 4.15 i 4.16 su dati uporedni grafici I-V i P-V karakteristika. Upoređenje su karakteristike dobijene estimacijom parametara pomoću HOA algoritma sa LambertW kriterijumskom funkcijom i karakteristike dobijene na osnovu rezultata dobijenih pomoću metoda predložene od strane autora EL Tayyan-a [64]



Slika 4.15 Uporedna I-V karakteristika BP MSX 60 (LambertW)



Slika 4.16 Uporedna P-V karakteristika BP MSX 60 (LambertW)

4.2.2 Estimacija parametara dvodiodnog modela R.T.C. France Cell solarne ćelije

Broj parametara koji se estimiraju predloženim algoritmom u slučaju dvodiodnog modela je sedam (R_s - redna otpornost, R_p - paralelna otpornost, I_{pv} - fotostruja, I_{o1} - struja saturacije prve diode, I_{o2} - struja saturacije druge diode, a_1 - koeficijent idealnosti prve diode i a_2 - koeficijent idealnosti druge diode). U ovom slučaju HOA algoritam kao kriterijumsku koristi DDM funkciju. U Tabeli 4.15 date su granične vrijednosti parametara dvodiodnog modela solarne ćelije R.T.C. France Cell.

Tabela 4.15 Granične vrijednosti parametara R.T.C France Cell – DDM kriterijumska

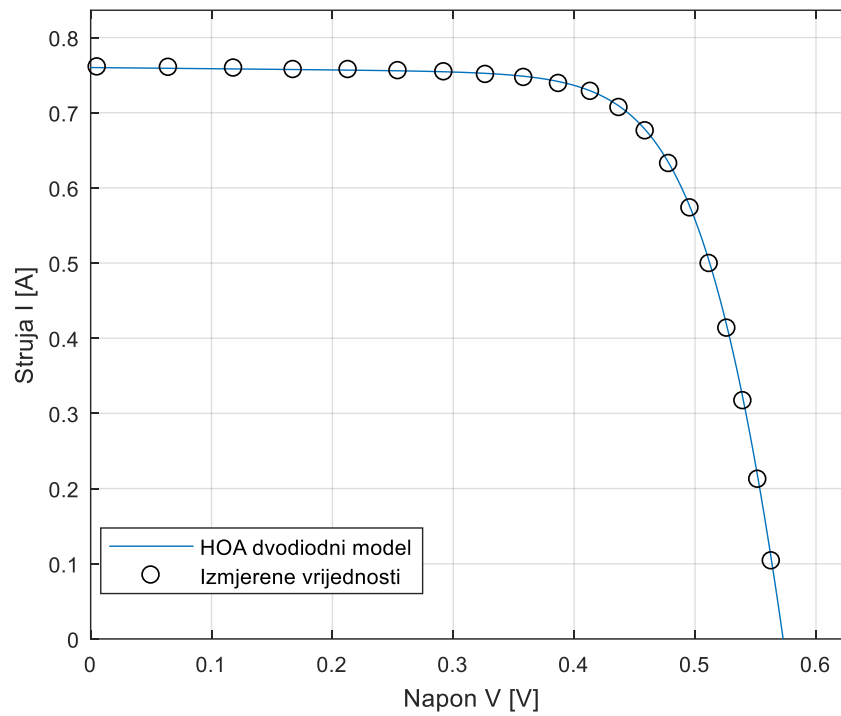
	R_s	R_p	I_{pv}	$I_{o1} (10^{-8})$	a_1	$I_{o2} (10^{-8})$	a_2
DONJA GRANICA	0.015	0	0	0	0.5	0.5	0.5
GORNJA GRANICA	0.045	100	1	200	2	0.1	2

Za određivanje parametara korišćeno je dva milion odbiraka ($n=2000000$) i broj pokretanja algoritma je sto ($maxrun=100$). U Tabeli 4.16 su date estimirane vrijednosti parametara.

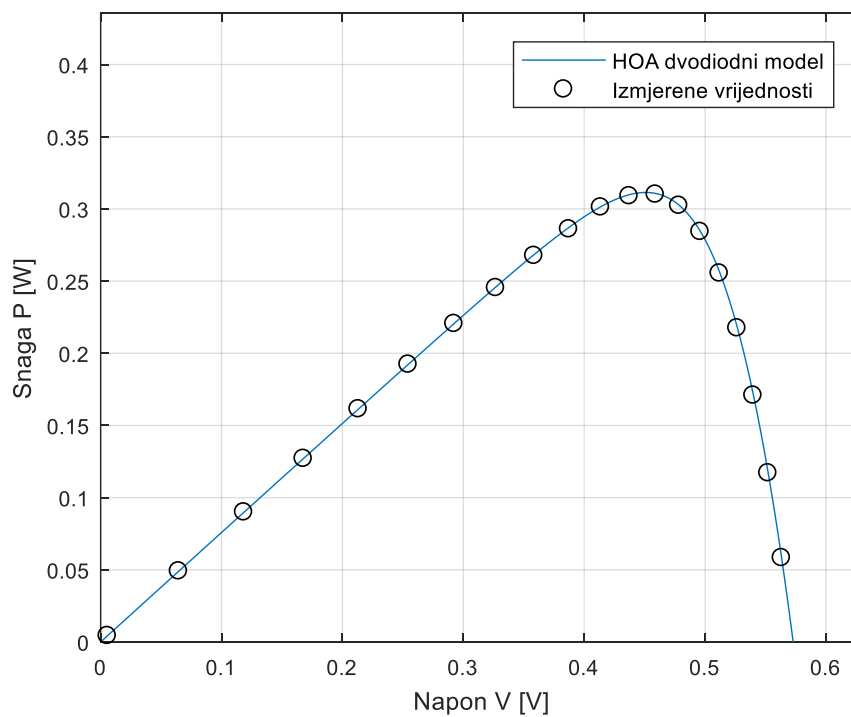
Tabela 4.16 Estimirane vrijednosti parametara i srednja kvadratna greška R.T.C France Cell – DDM kriterijumska

PARAMETRI	R_s	R_p	I_{pv}	$I_{o1} (10^{-8})$	a_1	$I_{o2} (10^{-8})$	a_2	DDM - RMSE
	0.036750	64.8183	0.76051	29.5154	1.47207	2.295319	1.54539	1.5126E-03

Na slikama 4.17 i 4.18 prikazane su $I-V$ i $P-V$ karakteristike dobijene na osnovu estimiranih vrijednosti parametara dvodiodnog modela solarne ćelije datih u Tabeli 4.16.



Slika 4.17 I-V karakteristika za solarnu ćeliju R.T.C. France Cell (DDM, dvodioni, n=2000000, maxrun=100)



Slika 4.18 P-V karakteristika za solarnu ćeliju R.T.C. France Cell (DDM, dvodioni, n=2000000, maxrun=100)

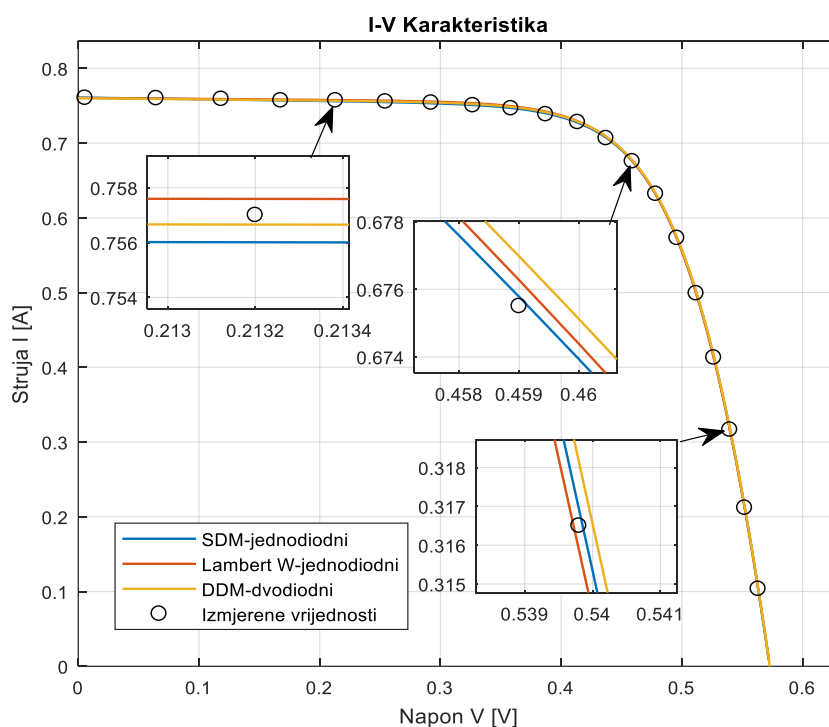
U Tabeli 4.17 date su srednje kvadratne greške dobijene pri estimaciji parametara jednodiodnog i dvodiodnog modela R.T.C. France cell. U slučaju jednodiodnog modela HOA algoritam je koristio dvije različite kriterijumske funkcije (SDM i LambertW), a u slučaju dvodiodnog modela DDM kriterijumsku funkciju

Tabela 4.17 Greške koje smo dobili pomoću različitih modela i kriterijumskih funkcije za R.T.C France Cell

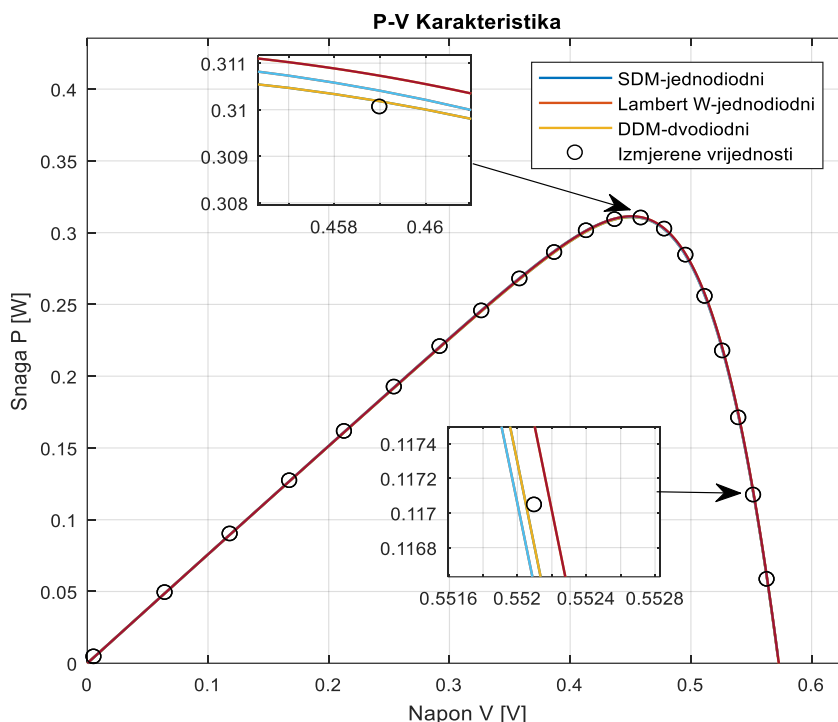
MODEL	FITNES FUNKCIJA	BROJ ODBIRAKA	BROJ POKRETANJA ALGORITMA (maxrun)	RMSE (GREŠKA)
JEDNODIODNI	SDM	1000000	100	0.001224451687305
	LAMBERT W	10000	10	0.001642336210018
DVODIODNI	DDM	2000000	100	0.001512598149031

Iz Tabele se može uočiti da su vrijednosti srednje kvadratne greške približne i razlikuju se u četvrtoj decimali. Najmanja dobijena greška je u slučaju estimacije parametara jednodiodnog modela kada HOA algoritam koristi SDM kriterijumsku funkciju. Razlog za to leži u činjenici da je ovdje korišćen manji broj nepoznatih parametara, za razliku od DDM metoda.

Na slikama 4.19 i 4.20 su date uporedne struja-napon i snaga-napon karakteristika. Solarne ćelije predstavljene preko jednodiodnih i dvodiodnog modela.



Slika 4.19 Uporedna I-V karakteristika R.T.C France Cell



Slika 4.20 Uporedna P-V karakteristika R.T.C France Cell

Na osnovu karakteristika prikazanih na slikama 4.19 i 4.20 može se zaključiti da predloženi algoritam jako dobro aproksimira mjerene karakteristike i u slučaju jednodiodnog i u slučaju dvodiodnog modela. Sa P-V karakteristike se vidi da rezultati dobijeni estimacijom parametara dvodiodnog modela daju precizniju karakteristiku.

Granična vrijednost parametara dvodiodnog modela solarnog panela BP MSX – 60 date su u Tabeli 4.18.

Tabela 4.18 Granične vrijednosti parametara BP MSX - 60 – DDM kriterijumska funkcija

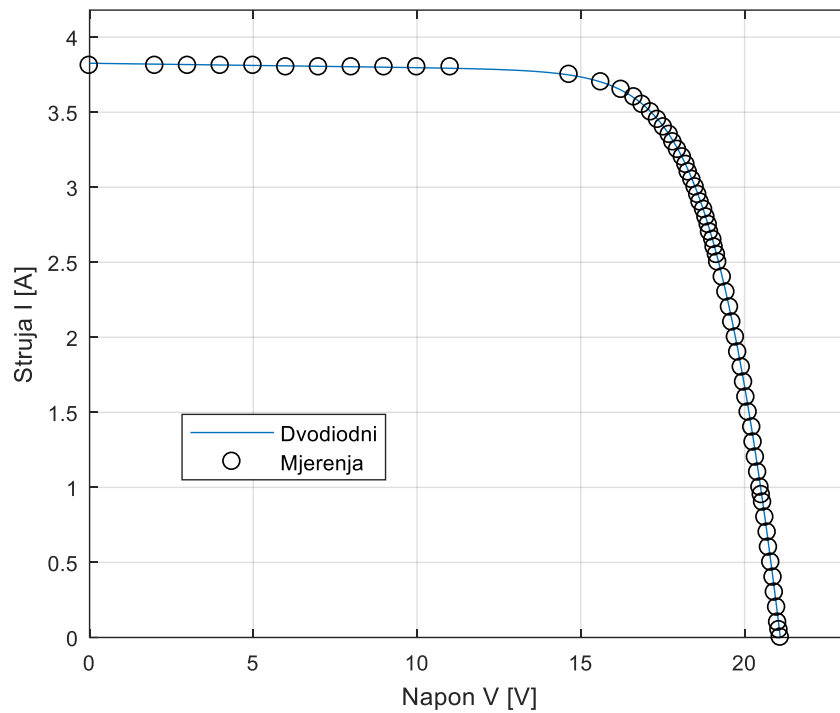
	R_s	R_p	I_{pv}	$I_{o1} (10^{-8})$	a_1	$I_{o2} (10^{-8})$	a_2
DONJA GRANICA	0.2	100	3.4	0	0	0	0
GORNJA GRANICA	0.3	400	4.2	5	3	10	2

Za određivanje parametara korišćeno je million i dvesta hiljada odbiraka ($n=1200000$), dok je broj pokretanja algoritma sto ($maxrun=100$) i dvadeset puta je pokrenut algoritam za lokalnu pretragu. U Tabeli 4.19 su date estimirane vrijednosti parametara.

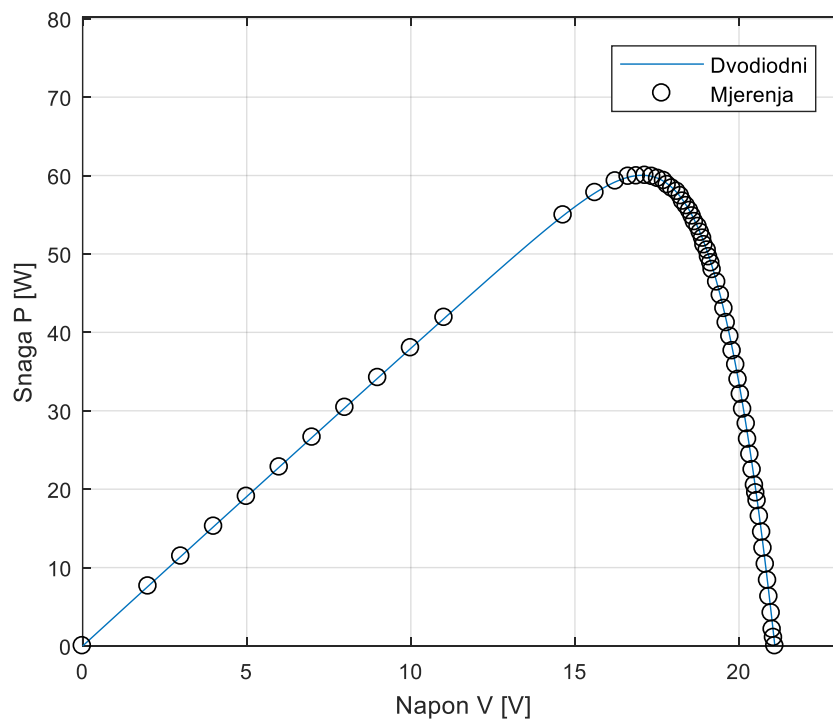
Tabela 4.19 Estimirane vrijednosti parametara i srednja kvadratna greška BP MSX - 60 – DDM kriterijumska

PARAMETRI	R_s	R_p	I_{pv}	$I_{o1} (10^{-8})$	a_1	$I_{o2} (10^{-8})$	a_2	DDM - RMSE
	0.2352	349.0693	3.8284	0.0179303	2.1456	8.7087	1.2970	1.7269E-02

Na slikama 4.21 i 4.22 prikazane su I-V i P-V karakteristike dobijene na osnovu estimiranih parametara dvodiodnog modela solarnog panela datih u Tabeli 4.19.



Slika 4.21 I-V karakteristika za solarnu ćeliju BP MSX 60 (DDM, dvodioni, n=1200000, maxrun=100)



Slika 4.22 P-V karakteristika za solarnu ćeliju BP MSX 60 (DDM, dvodioni, n=1200000, maxrun=100)

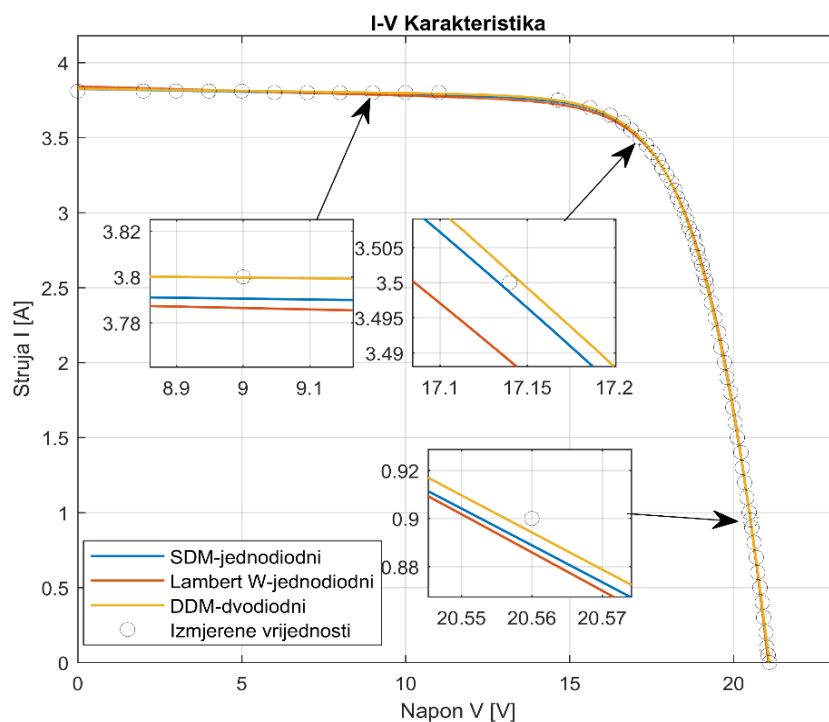
U Tabeli 4.20 date su vrijednosti srednje kvadratne greške dobijene pri estimaciji parametara jednodiodnog i dvodiodnog modela solarnog panela BP MSX – 60.

Tabela 4.20 Greške koje smo dobili pomoću različitih modela i kriterijumskih funkcije za BP MSX - 60

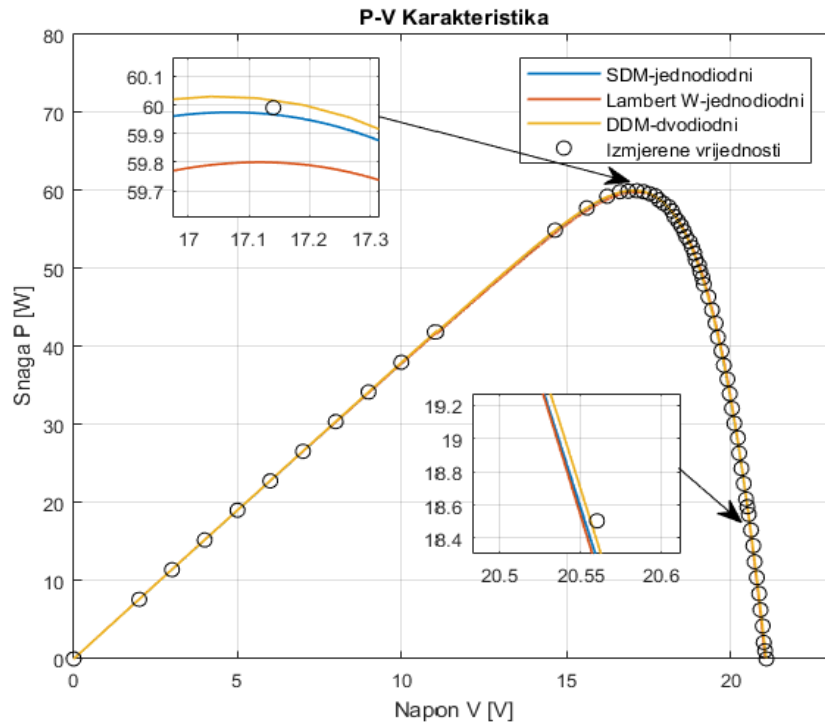
MODEL	FITNES FUNKCIJA	BROJ ODBIRAKA	BROJ POKRETANJA ALGORITMA (maxrun)	LOKALNA PRETRAGA (muxrunlocal)	RMSE (GREŠKA)
JEDNODIODNI	SDM	1200000	100	20	0.018367001363268
	LAMBERTW	3000	5	2	0.021790800505698
DVODIODNI	DDM	1200000	100	20	0.017268590331375

Rezultati prikazani u Tabeli 4.20 ukazuju da se u slučaju solarnog panela najmanja kvadratna greška dobila estimacijom parametara dvodiodnog modela.

Na slikama 4.23 i 4.24 su date uporedne struja-napon i snaga-napon karakteristike. Solarne ćelije predstavljene preko jednodiodnih i dvodiodnog modela



Slika 4.23 Uporedna I-V karakteristika BP MSX 60



Slika 4.24 Uporedna P-V karakteristika BP MSX 60

Sa slika 4.23 i 4.24 se vidi da simulirane karakteristike dobijene na osnovu estimacije parametara jednodiodnog i dvodiodnog modela solarnog panela veoma dobro aproksimiraju mjerene karakteristike, pri čemu najbolje poklapanje rezultata imaju karakteristike dvodiodnog modela.

4.3 ESTIMACIJA PARAMETARA SOLARNIH ĆELIJA NA OSNOVU KATALOŠKIH PODATAKA (NATPISNA PLOČICA)

U ovom poglavlju su dati rezultati dobijeni estimacijom parametara jednodiodnog i dvodiodnog modela solarne ćelije R.T.C. France cell i solarnog panela BP MSX – 60 predloženim algoritmom koristeći podatke sa natpisne pločice. Naime, u ovom slučaju su korišćeni sljedeći podaci: U_{ph} (napon praznog hoda), I_{ks} (struja kratkog spoja), U_m (Napon u tački maksimalne snage) i I_m (Struja u tački maksimalne snage). Na osnovu ovih dostupnih podataka uzimaju se tri tačke i to: $(I_{ks}, 0)$, (I_m, U_m) i $(0, U_{ph})$ sa ciljem da karakteristike dobijene na osnovu estimiranih parametara električnog modela „prođu“ kroz te tri tačke. Odstupanje karakteristika dobijenih na osnovu estimiranih parametara od ovih definisanih tačaka predstavlja vrijednost greške. Takođe, dobijene karakteristike na osnovu kataloških podataka su upoređene sa karakteristikama dobijenim na osnovu izmjerenih karakteristika.

4.3.1 Estimacija parametara jednodiodnog modela R.T.C France Cell solarne ćelije

Granične vrijednosti parametara jednodiodnog modela estimiranih HOA algoritmom kada se kao kriterijumska funkcija korsiti SDM funkcija date su u Tabeli 4.21.

Tabela 4.21 Granične vrijednosti parametara R.T.C France Cell – SDM kriterijumska (podaci sa natpisne pločice)

	R_s	R_p	I_{pv}	$I_o (10^{-8})$	a
DONJA GRANICA	0.015	40	0	20	0.8
GORNJA GRANICA	0.06	100	1	80	2

Za određivanje parametara korišćeno je pet miliona odbiraka ($n=5000000$) i broj pokretanja algoritma je sto ($maxrun=100$). U Tabeli 4.22 su date estimirane vrijednosti parametara.

Tabela 4.22 Estimirane vrijednosti parametara i srednja kvadratna greška R.T.C France Cell – SDM kriterijumska (podaci sa natpisne pločice)

PARAMETRI	R_s	R_p	I_{pv}	$I_o (10^{-8})$	a	SDM - RMSE
	0.0408	62.6394	0.7612	23.11	1.4478	6.1031E-04

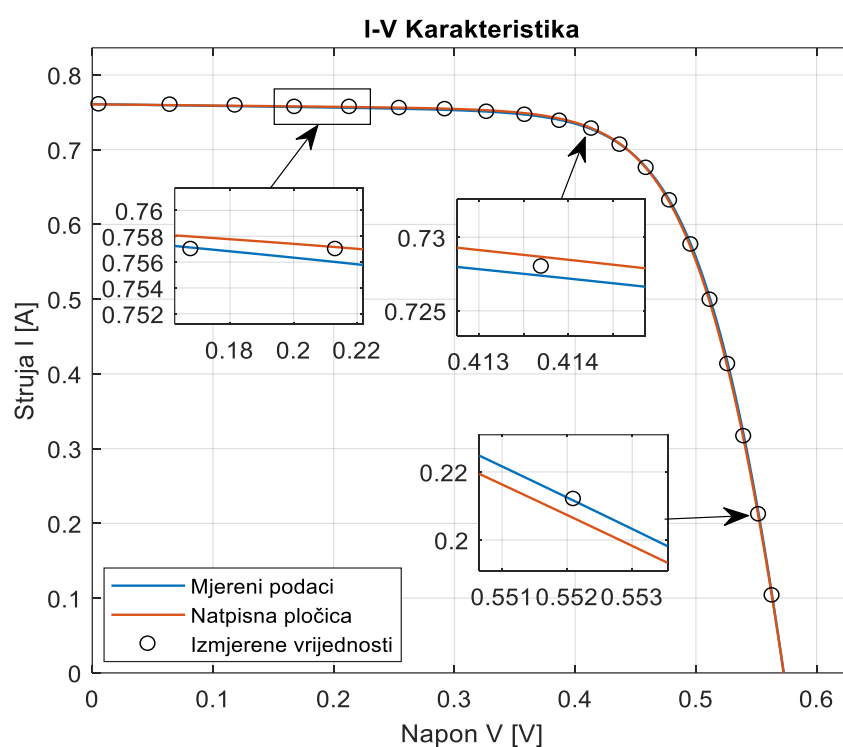
HOA algoritam u ovom slučaju nije koristio lokalnu pretragu, jer je srednja kvadratna greška postignuta glavnom pretragom reda 10^{-4} i uključivanjem lokalne pretrage ne bi došlo do značajnije popravke rezultata. Vrijednost greške dobijene na ovaj način je za jedan red veličine manja od greške kada su se parametri estimirali na osnovu izmjerenih karakteristika, što je i za očekivati s obzirom da se u ovom slučaju greška računa na osnovu tri tačke, a u prethodnom slučaju na osnovu 26 tačaka.

U Tabeli 4.23 date su uporedne vrijednosti parametara jednodiodnog modela solarne ćelije dobijeni estimacijom pomoću HOA algoritma sa SDM kriterijumskom funkcijom na

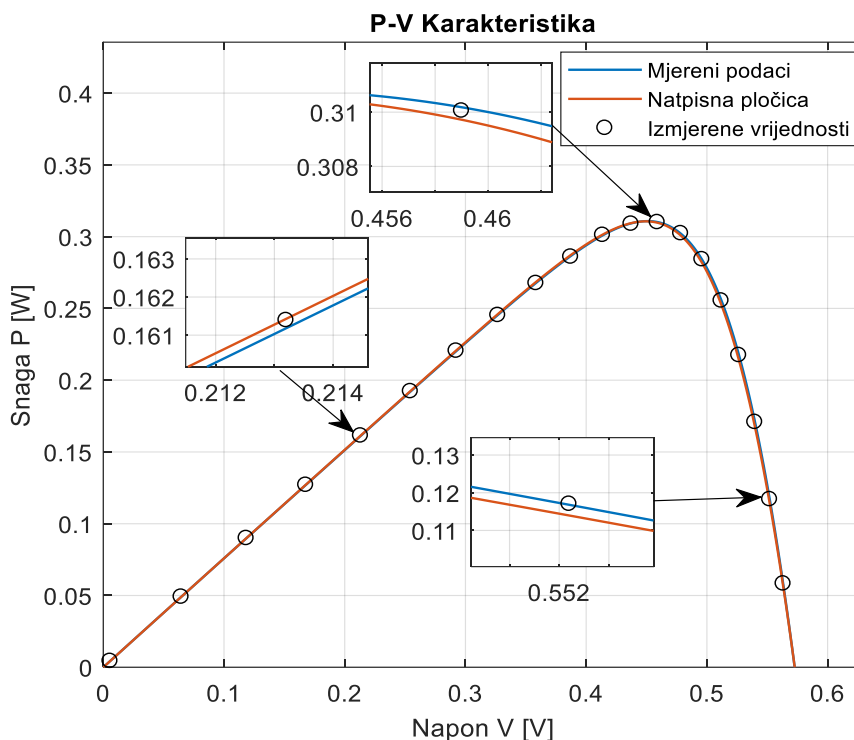
osnovu mjerenih karakteristika (26 mjerenja napona i struje) i na osnovu katalogskih podataka (3 mjerenja). Na slikama 4.25 i 4.26 prikazane su uporedne I - V i P - V karakteristike dobijene na ova dva načina.

Tabela 4.23 Estimirane vrijednosti parametara R.T.C France Cell – SDM kriterijumska (podaci sa natpisne pločice)

ULAZNI PODACI	BROJ MJERENJA	R_s	R_p	I_{pv}	$I_o (10^{-8})$	a
MJERENI PODACI	26	0.0372	44.2509	0.7616	25.705	1.4585
NATPISNA PLOČICA	3	0.0408	62.6394	0.7612	23.11	1.4478



Slika 4.25 Uporedne I - V karakteristike dobijene na osnovu mjerenih podataka i natpisnih pločica R.T.C France Cell (SDM)



Slika 4.26 Uporedne P-V karakteristike dobijene na osnovu mjerenih podataka i natpisnih pločica R.T.C France Cell (SDM)

Iz Tabele 4.23 se može vidjeti da se vrijednosti većine estimiranih parametara veoma dobro podudaraju. Sa grafika I-V i P-V karakteristika se vidi da simulirane karakteristike i na osnovu samo tri tačke (podataka sa natpisne pločice) veoma dobro aproksimiraju mjerene karakteristike što ukazuje na robusnost predloženog algoritma.

U Tabeli 4.24 date su granične vrijednosti parametara jednodiodnog modela solarne ćelije estimiranih algoritma sa LambertW kriterijumskom funkcijom.

Tabela 4.24 Granične vrijednosti parametara R.T.C France Cell – Lambert W kriterijumska (podaci sa natpisne pločice)

	R_s	R_p	I_{pv}	$I_o (10^{-8})$	a
DONJA GRANICA	0.02	40	0.65	30	1.25
GORNJA GRANICA	0.05	80	0.85	80	1.85

Za određivanje parametara korišćeno je hiljadu odbiraka (n=1000) sa tri pokretanja algoritma (maxrun=3) bez uključivanja lokalne pretrage. U Tabeli 4.25 su date estimirane vrijednosti parametara.

Tabela 4.25 Estimirane vrijednosti parametara i srednja kvadratna greška R.T.C France Cell – Lambert W kriterijumska (podaci sa natpisne pločice)

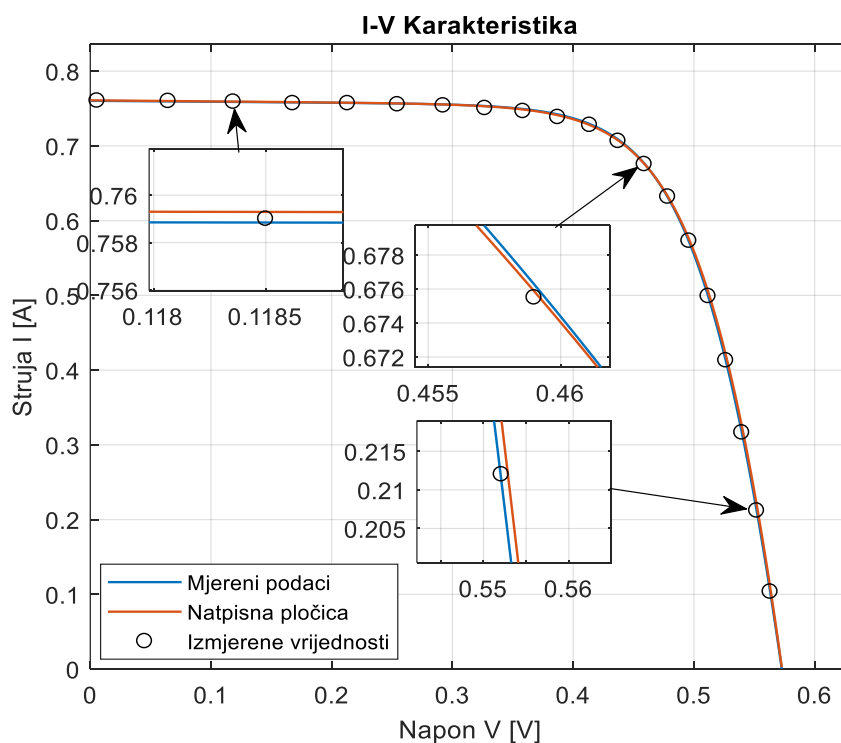
PARAMETRI	R_s	R_p	I_{pv}	$I_o (10^{-8})$	a	LambertW - RMSE
	0.0309	71.4872	0.7613	69.584	1.5632	1.6394E-03

Na osnovu rezultata datih u Tabeli 4.22 i 4.25 uočava se da je vrijednost greška veća u slučaju kada je predloženi algoritam koristio LambertW kriterijumsku funkciju. Razlog za to nije kvalitet kriterijumske funkcije, već što zbog kompleksnosti računanja LambertW funkcije koristi mnogo manji broj odbiraka i pokretanja algoritma. Međutim, i sa tako relativno malim brojem odbiraka i pokretanja algoritma dobije se greška reda 10^{-3} .

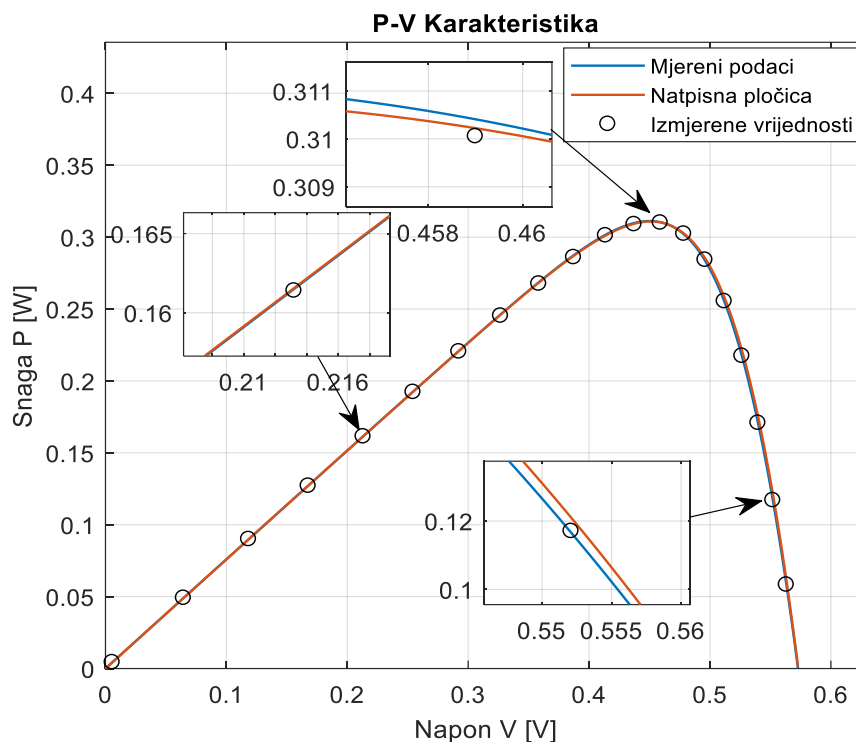
U Tabeli 4.26 date su uporedne vrijednosti parametara jednodiodnog modela, estimiranih predloženim algoritmom sa LambertW kriterijumskom funkcijom, kada se koriste mjereni podaci i podaci sa natpisne pločice. Odgovarajući rezultati su prikazani na slikama 4.27 i 4-28.

Tabela 4.26 Estimirane vrijednosti parametara R.T.C France Cell – Lambert W kriterijumska (podaci sa natpisne pločice)

ULAZNI PODACI	BROJ MJERENJA	R_s	R_p	I_{pv}	$I_o (10^{-8})$	a
MJERENI PODACI	26	0.0373	79.814	0.7607	33.289	1.4839
NATPISNA PLOČICA	3	0.0309	71.4872	0.7613	69.584	1.5632



Slika 4.27 Uporedne I-V karakteristike dobijene na osnovu mjerenih podataka i natpisnih pločica R.T.C France Cell (LambertW)



Slika 4.28 Uporedne P-V karakteristike dobijene na osnovu mjerenih podataka i natpisnih pločica R.T.C France Cell (LambertW)

Sa slika se uočava da se dobijene karakteristike veoma dobro podudaraju sa mjerenim podacima.

4.3.2 Estimacija parametara jednodiodnog modela solarnog panela BP MSX - 60

Granične vrijednosti parametara jednodiodnog modela solarnog panela estimiranih HOA algoritmom kada se koristi SDM kriterijumska funkcija date su u Tabeli 4.27

Tabela 4.27 Granične vrijednosti parametara BP MSX - 60 – SDM kriterijumska (podaci sa natpisne pločice)

	R_s	R_p	I_{pv}	$I_o (10^{-8})$	a
DONJA GRANICA	0	80	3.5	0	0.8
GORNJA GRANICA	0.3	600	4.2	9	1.5

Za određivanje parametara korišćen je jedan milion odbiraka ($n=1000000$), dok je broj pokretanja algoritma sto ($maxrun=100$), bez uključivanja lokalne pretrage. U Tabeli 4.28 su date estimirane vrijednosti parametara.

Tabela 4.28 Estimirane vrijednosti parametara i srednja kvadratna greška BP MSX - 60 – SDM kriterijumska (podaci sa natpisne pločice)

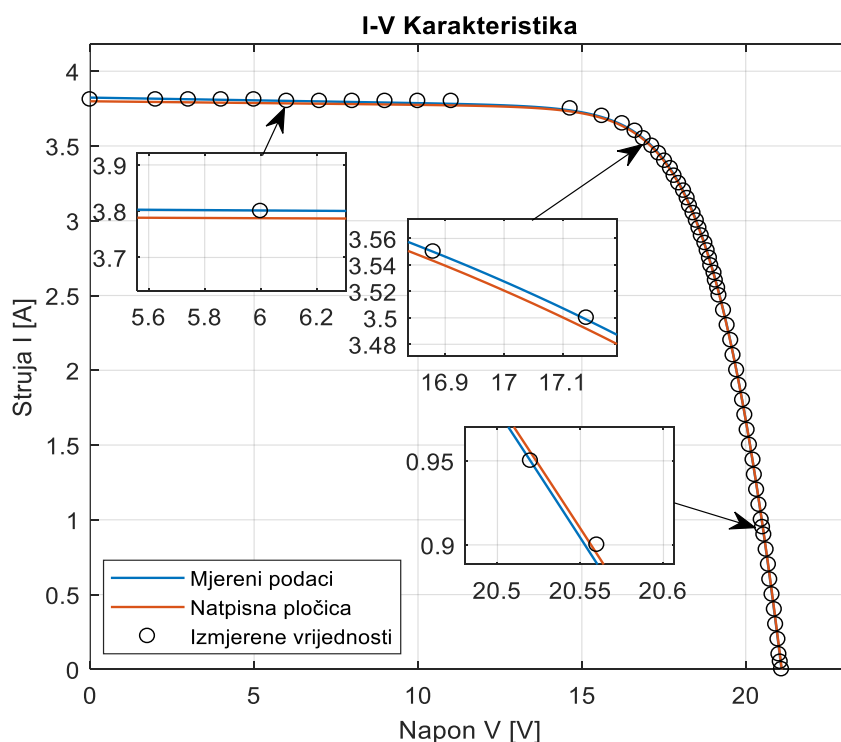
PARAMETRI	R_s	R_p	I_{pv}	$I_o (10^{-8})$	a	SDM - RMSE
	0.2463	427.1439	3.8011	5.8175	1.2686	8.5057E-04

S obzirom da je greška računata na osnovu 3 tačke ona je samim tim mnogo manja od greške dobijene u slučaju estimacije na osnovu mjerenih podatka (BP MSX – 60 64 tačke).

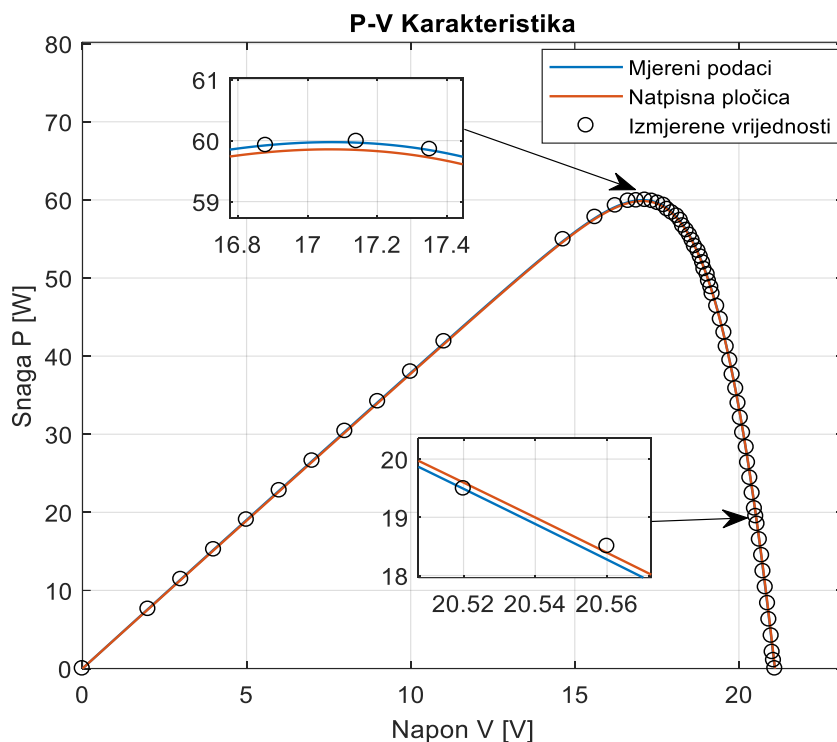
Uporedne vrijednosti parametara jednodiodnog modela solarnog panela BP MSX – 60 dobijene estimacijom predloženim algoritmom sa SDM kriterijumskom funkcijom na osnovu mjerenih podataka (3 mjerenja) date su u Tabeli 4.29. Na slikama 4.29 i 4.30 prikazane su uporedne I-V i P-V karakteristike.

Tabela 4.29 Estimirane vrijednosti parametara BP MSX - 60 – SDM kriterijumska (podaci sa natpisne pločice)

ULAZNI PODACI	BROJ MJERENJA	R_s	R_p	I_{pv}	$I_o (10^{-8})$	a
MJERENI PODACI	64	0.2455	275.5725	3.8268	5.0569	1.2584
NATPISNA PLOČICA	3	0.2463	427.1439	3.8011	5.8175	1.2686



Slika 4.29 Uporedne I-V karakteristike dobijene na osnovu mjerenih podataka i natpisnih pločica BP MSX 60 (SDM)



Slika 4.30 Uporedne P-V karakteristike dobijene na osnovu mjerenih podataka i natpisnih pločica BP MSX 60 (SDM)

Sa slika se može zaključiti da i u slučaju solarnog panela BP MSX – 60 karakteristike dobijene korišćenjem predloženog algoritma odlično aproksimiraju mjerene karakteristike i kada se koristi mali broj ulaznih podataka.

U Tabeli 4.30 date su granične vrijednosti parametara jednodiodnog modela solarne ćelije kada se koristi LambertW kriterijumska funkcija.

Tabela 4.30 Granične vrijednosti parametara BP MSX - 60 – Lambert W kriterijumska (podaci sa natpisne pločice)

	R_s	R_p	I_{pv}	$I_o (10^{-8})$	a
DONJA GRANICA	0.2	80	3.5	0	0.5
GORNJA GRANICA	0.3	380	4.2	8	1.5

Za određivanje parametara korišćeno je pet hiljada odbiraka ($n=5000$) i dvadeset pokretanja algoritama ($maxrun=20$), bez uključivanja lokalne pretrage. U Tabeli 4.31 su date estimirane vrijednosti parametara.

Tabela 4.31 Estimirane vrijednosti parametara i srednja kvadratna greška BP MSX - 60 – Lambert W kriterijumska (podaci sa natpisne pločice)

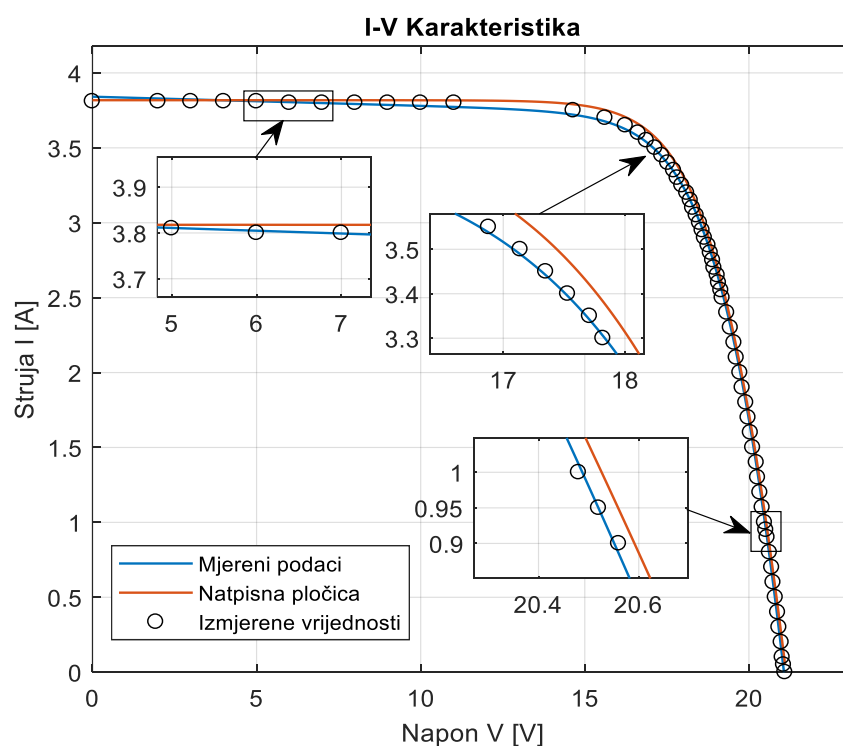
PARAMETRI	R_s	R_p	I_{pv}	$I_o (10^{-8})$	a	LambertW - RMSE
	0.269	1699581	3.8178	1.9167	1.1955	1.5533E-02

Uporedne vrijednosti parametara jednodiodnog modela solarnog panela BP MSX – 60 dobijene estimacijom predloženim algoritmom sa LambertW kriterijumskom funkcijom na osnovu mjerenih podataka date su u Tabeli 4.32. Na slikama 4.31 i 4.32 prikazane su uporedne I-V i P-V karakteristike.

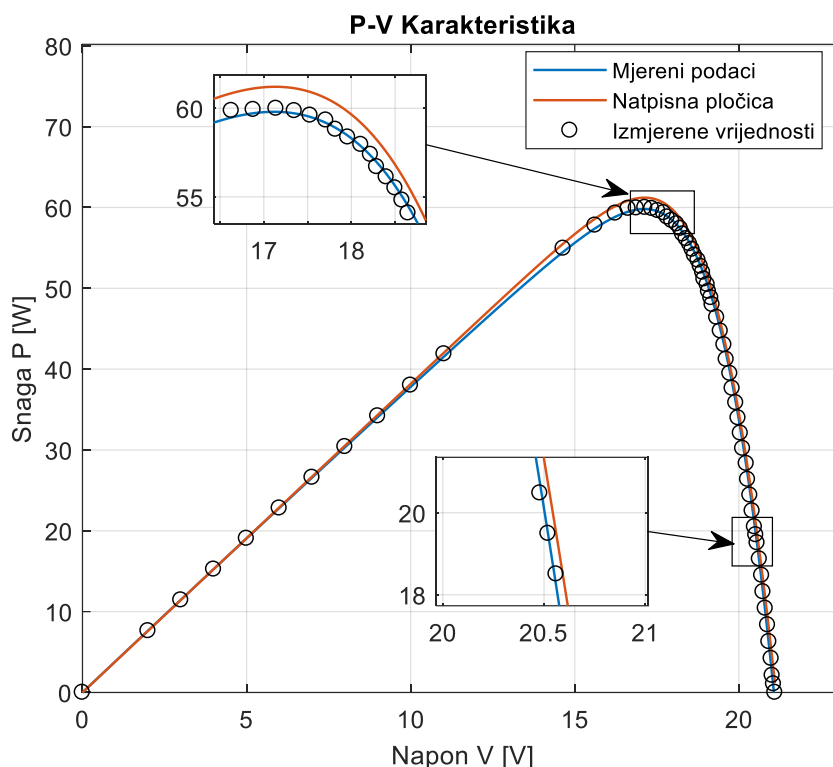
Tabela 4.32 Estimirane vrijednosti parametara BP MSX - 60 – Lambert W kriterijumska (podaci sa natpisne pločice)

ULAZNI PODACI	BROJ MJERENJA	R_s	R_p	I_{pv}	$I_o (10^{-8})$	a
MJERENI PODACI	64	0.2130	164.4486	3.8463	6.3179	1.2732
NATPISNA PLOČICA	3	0.269	1699581	3.8178	1.9167	1.1955

Uporedne I-V i P-V karakteristike ovog panela prikazane su na graficima 4.31 i 4.32. Sa grafika se može vidjeti da su karakteristike gotovo identične i da dobro aproksimiraju mjerene podatke.



Slika 4.31 Uporedne I-V karakteristike dobijene na osnovu mjerenih podataka i natpisnih pločica BP MSX 60 (LambertW)



Slika 4.32 Uporedne P-V karakteristike dobijene na osnovu mjerenih podataka i natpisnih pločica BP MSX 60 (LambertW)

U ovom slučaju se može uočiti malo odstupanje simuliranih karakteristika dobijenih na osnovu podataka sa natpisne pločice u odnosu na izmjerene karakteristike.

4.3.3 Estimacija parametara dvodiodnog modela R.T.C France cell

Granične vrijednosti parametara dvodiodnog modela u slučaju estimacije parametara dvodiodnog modela solarne ćelije R.T.C France cell date su u Tabeli 4.33.

Tabela 4.33 Granične vrijednosti parametara R.T.C France Cell – DDM kriterijumska (natpisni podaci)

	R_s	R_p	I_{pv}	$I_{o1} (10^{-8})$	a_1	$I_{o2} (10^{-8})$	a_2
DONJA GRANICA	0.0150	20	0.5	0	0.5	0	0.5
GORNJA GRANICA	0.05	100	1	1	2	2	2

Za određivanje parametara korišćeno je pet miliona odbiraka ($n=5000000$) i broj pokretanja algoritma je sto ($maxrun=100$). U Tabeli 4.34 su date estimirane vrijednosti parametara.

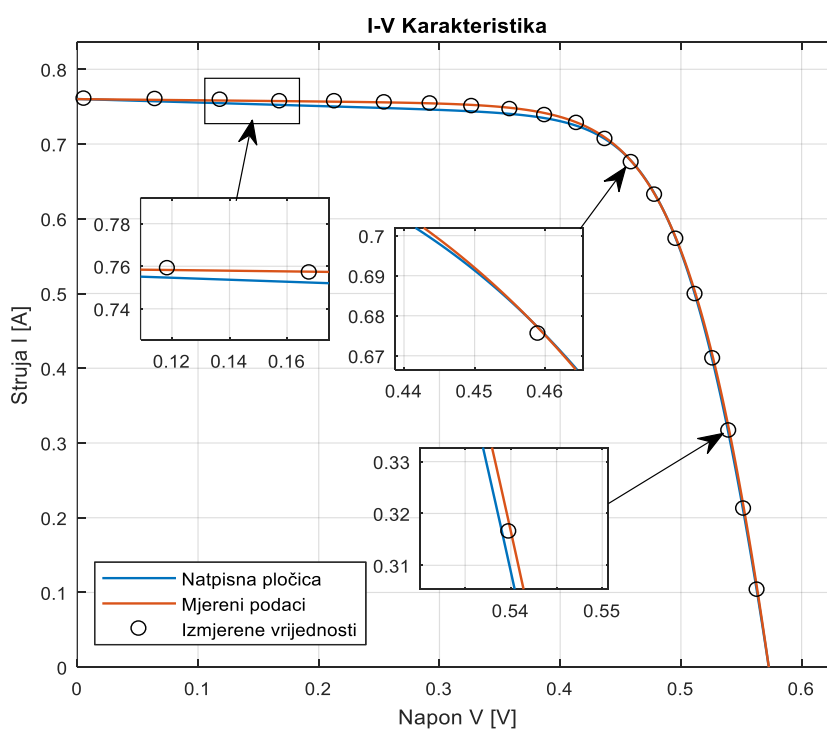
Tabela 4.34 Estimirane vrijednosti parametara i srednja kvadratna greška R.T.C France Cell – DDM kriterijumska (natpisna)

PARAMETRI	R_s	R_p	I_{pv}	$I_{o1} (10^{-8})$	a_1	$I_{o2} (10^{-8})$	a_2	DDM - RMSE
	0.0490	21.2976	0.7620	0.37579	1.9881	1.6890	1.2345	6.0654E-04

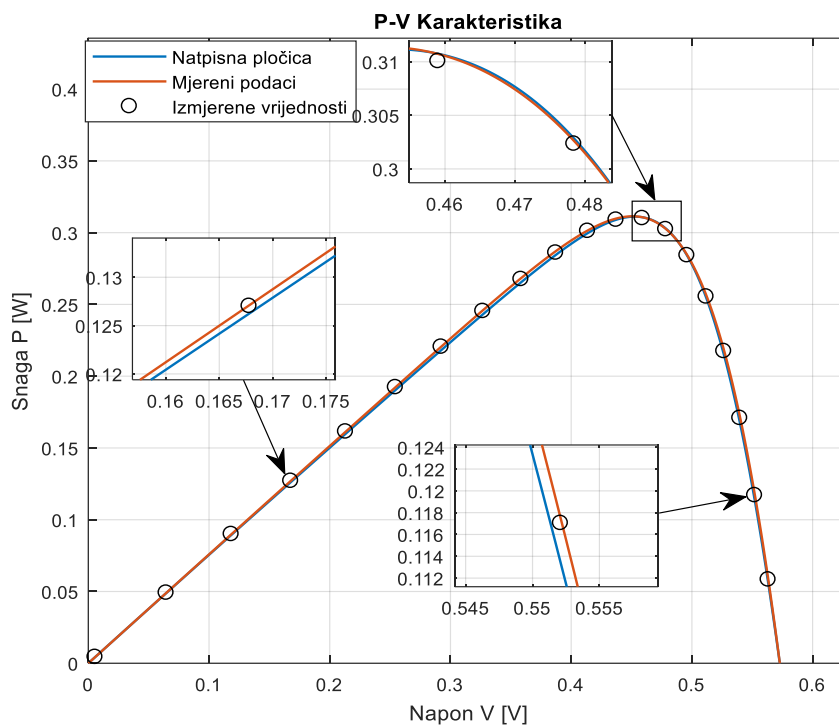
U Tabeli 4.35 date su uporedne vrijednosti parametara dvodiodnog modela solarne ćelije dobijene estimacijom pomoću HOA algoritma sa SDM kriterijumskom funkcijom na osnovu mjerenih karakteristika (26 mjerenja napona i struje) i na osnovu katalogskih podataka. Na slikama 4.33 i 4.34 prikazane su uporedne I-V i P-V karakteristike dobijene na ova dva načina.

Tabela 4.35 Estimirane vrijednosti parametara R.T.C France Cell – DDM kriterijumska (podaci sa natpisne pločice)

ULAZNI PODACI	BROJ MJERENJA	R_s	R_p	I_{pv}	$I_{o1} (10^{-8})$	a_1	$I_{o2} (10^{-8})$	a_2
MJERENI PODACI	26	0.0367	64.8183	0.7605	29.5154	2.2953	1.4720	1.5453
NATPISNA PLOČICA	3	0.0490	21.2976	0.7620	0.37579	1.9881	1.6890	1.2345



Slika 4.33 Uporedne I-V karakteristike dobijene na osnovu mjerenih podataka i natpisnih pločica R.T.C France Cell (DDM)



Slika 4.34 Uporedne P-V karakteristike dobijene na osnovu mjerenih podataka i natpisnih pločica R.T.C France Cell (DDM)

Sa slika se uočava odlično poklapanje karakteristika. Prema tome oba pristupa (podaci sa natpisne pločice i mjereni podaci) se efikasno mogu primjediti u cilju estimacije parametara solarnih ćelija.

4.3.4 Estimacija parametara dvodiodnog modela solarnog panela BP MSX - 60 – DDM

Granične vrijednosti parametara dvodiodnog modela solarnog panela estimiranih HOA algoritmom kada se kao kriterijumska funkcija koristi SDM funkcija date su u Tabeli 4.36

Tabela 4.36 Granične vrijednosti parametara BP MSX - 60 – DDM kriterijumska (natpisni podaci)

	R_s	R_p	I_{pv}	$I_{o1} (10^{-8})$	a_1	$I_{o2} (10^{-8})$	a_2
DONJA GRANICA	0.1	100	3.4	0	0.5	0	0.5
GORNJA GRANICA	0.3	400	4.2	5	2	5	2

Za određivanje parametara korišćeno je pet milion odbiraka ($n=5000000$); broj pokretanja algoritma je sto ($maxrun=100$). U Tabeli 4.37 su date estimirane vrijednosti parametara.

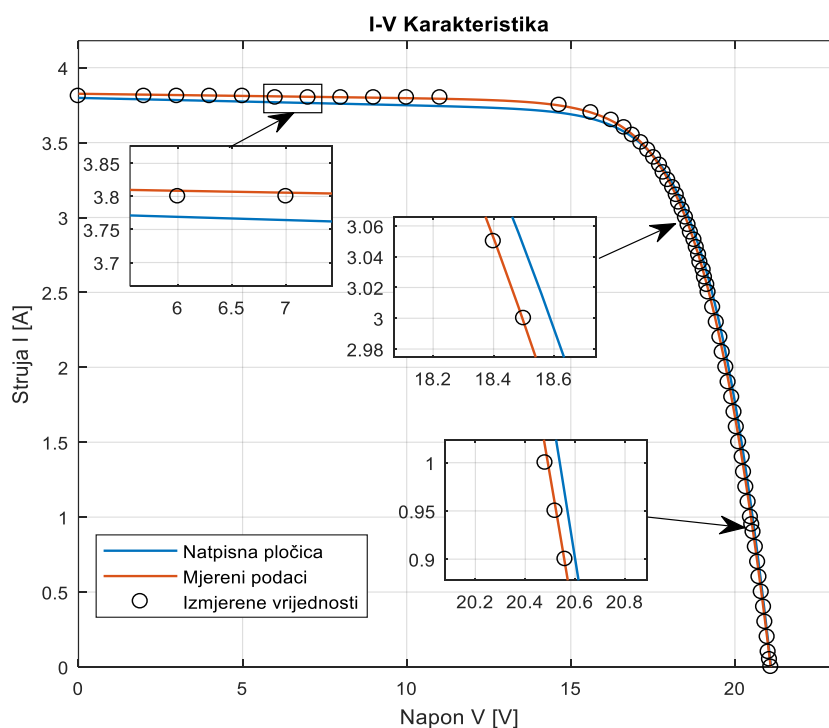
Tabela 4.37 Estimirane vrijednosti parametara i srednja kvadratna greška BP MSX - 60 – DDM kriterijumska (natpisna)

PARAMETRI	R_s	R_p	I_{pv}	$I_{o1} (10^{-8})$	a_1	$I_{o2} (10^{-8})$	a_2	DDM - RMSE
	0.1954	205.9071	3.8018	4.5841	1.2545	286.6660	1.5388	1.1384E-03

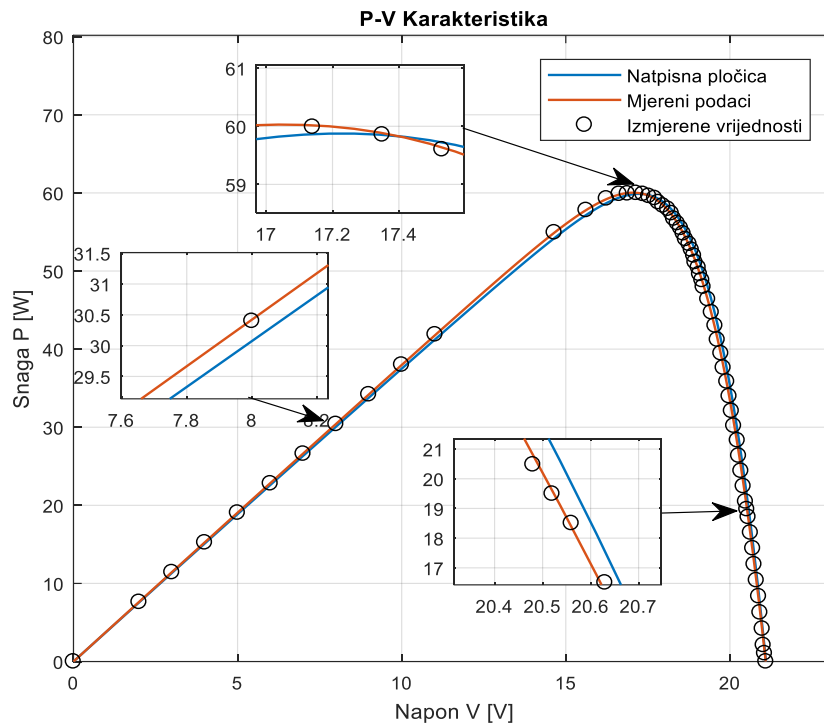
Uporedne vrijednosti parametara dvodiodnog modela solarnog panela BP MSX – 60 dobijene estimacijom predloženim algoritmom sa DDM kriterijumskom funkcijom na osnovu mjerenih podataka date su u Tabeli 4.38. Na slikama 4.35 i 4.36 prikazane su korespondentne I - V i P - V karakteristike. I sa rezultatima prikazanim na ovim slikama je jasno vidljivo dobro poklapanje mjerenih i estimiranih karakteristika.

Tabela 4.38 Estimirane vrijednosti parametara R.T.C France Cell – DDM kriterijumska (podaci sa natpisne pločice)

ULAZNI PODACI	BROJ MJERENJA	R_s	R_p	I_{pv}	$I_{o1} (10^{-8})$	a_1	$I_{o2} (10^{-10})$	a_2
MJERENI PODACI	64	0.2352	349.0693	3.8284	0.0179303	2.1456	8.7087	1.2970
NATPISNA PLOČICA	3	0.1954	205.9071	3.8018	4.5841	1.2545	286.6660	1.5388



Slika 4.35 Uporedne I - V karakteristike dobijene na osnovu mjerenih podataka i natpisnih pločica BP MSX 60 (DDM)



Slika 4.36 Uporedne P-V karakteristike dobijene na osnovu mjerenih podataka i natpisnih pločica BP MSX 60 (DDM)

5 EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Radi dodatne provjere efikasnosti primjene Haotičnog optimizacionog algoritma za estimaciju parametara električnih modula solarnih ćelija u ovom poglavlju su predloženim algoritmom estimirani parametri električnih modela solarnog panela iz *Clean Energy Trainer* [64] kompleta na osnovu laboratorijski izmjerenih struja-napon karakteristika za različite vrijednosti temperature i insolacije. U poglavlju je dat opis laboratorijske postavke realizovan u Laboratoriji za automatiku Elektrotehničkog fakulteta i opisana procedura mjerenja strujno-naponskih karakteristika. U konkretnom slučaju korišćena su dva paralelno vezana modula.

5.1 OPIS LABORATORIJSKE POSTAVKE I PROCEDURA MJERENJA

Na slici 5.1 je prikazan solarni modul iz seta *Clean Energy Trainer*. Dimenzije jednog modula su 135x95x30 mm. Solarni modul se sastoji od osam solarnih ćelija.



Slika 5.1 *Clean Energy Trainer* solarni moduo

Za mjerenje insolacije je korišćen TES 1333R uređaj sa opsegom od 2000W/m², prikazan na slici 5.2. Temperatura je mjerena klasičnim multimetrom.



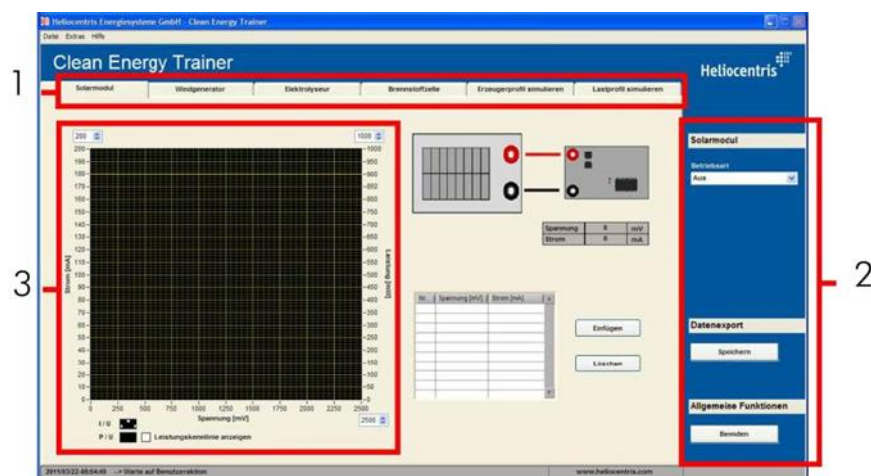
Slika 5.2 Uređaj za mjerenje insolacije TES 1333R

Paralelno vezani moduli su paralelno spojeni sa *USB data monitor*-om. *USB data monitor* predstavlja jednu vrstu MPPT regulatora (regulatora maksimalne snage), ali za razliku od klasičnog MPPT-a, gdje se napon fiksira na željenu vrijednost, *USB data monitor* pruža mogućnost mijenjanja napona u opsegu od 0 V do napona praznog hoda (U_{ph}). Na ovaj način se formira strujno-naponska karakteristika. Pošto se radi o malom eksperimentalnom uređaju moguće je mjerenje I - V karakteristike za panele do 10 W.



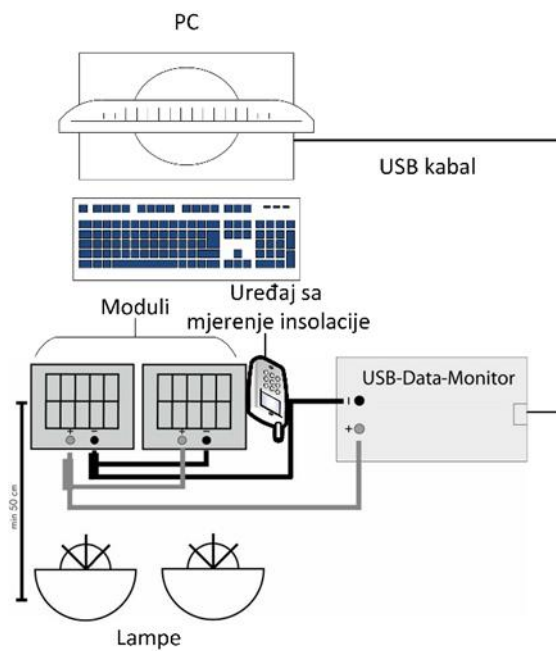
Slika 5.3 Clean Energy Trainer USB data monitor

Na slici 5.3 je prikazan *USB data monitor*, koji u *real-time*-u šalje podatke preko *USB port*-a na PC. Tačnije, podatke šalje *Clean Energy Trainer* softveru. Na slici 5.4 je prikazan izgled interfejsa. Ovaj program se može koristiti za različite izvore obnovljive energije. Na interfejsu programa su označene tri zone. Na prvoj zoni su dati tabovi za različite izvore energije. U ovom slučaju se bira solar. Zona dva (2) označava dio gdje se podešava izbor načina mjerenja, tj. automatsko mjerenje napona u opsegu od 0 V do U_{ph} ili manuelno mjerenje napona. U zoni tri se crtaju izmjerene vrijednosti tačaka (struja-napon), tj. dobija se mjerena I - V karakteristika.

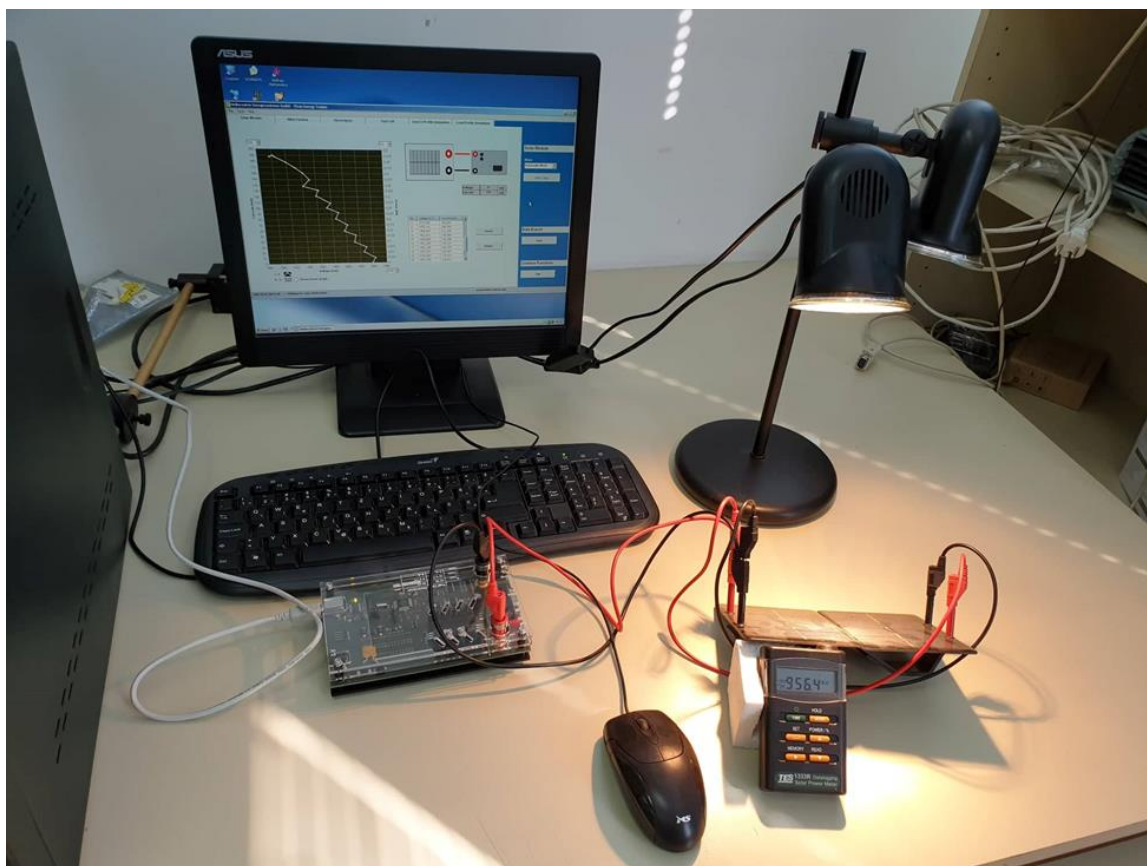


Slika 5.4 Clean Energy Clean Energy Trainer software interfejs

Na slici 5.5 je prikazana šema kompleta laboratorijske postavke, dok je na slici 5.6 je data fotografija laboratorijske postavke.



Slika 5.5 Izgled laboratorijske postavke



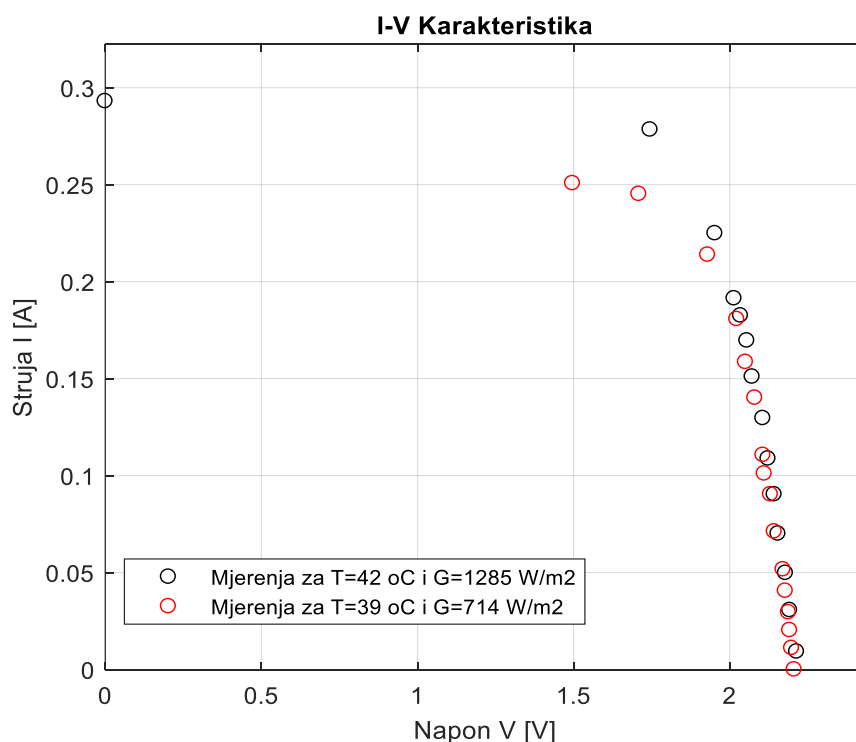
Slika 5.6 Laboratorijska postavka

Pomoću opisane laboratorijske postavke izmjerene su strujno-naponske karakteristike dva paralelno vezana solarna panela. U prvom slučaju mjerenje je obavljeno pri insolaciji od 1285 W/m^2 i temperaturi od 42°C pri čemu je izmjereno ukupno 14 tačaka I-V karakteristike.

Izmjerena tačka maksimalne snage pri ovom mjerenju je 1745.39 mV i 278.36 mA. U drugom slučaju pri insolaciji od 714 W/m² i temperaturi od 39°C izmjereno je 16 tačaka. Izmjerena tačka maksimalne snage definisana je sljedećim vrijednostima napona i struje - 1709.3 mV i 245.18 mA. U Tabeli 5.1 su date izmjerene vrijednosti, a na slici 5.7 je prikazana i izmjerena I-V karakteristika.

Tabela 5.1 Izmjerene vrijednosti za dva eksperimenta

Eksperiment	E1		E2	
Uslovi	T=42°C G=1285 W/m ²		T=39°C G=714 W/m ²	
Broj	Napon [mV]	Struja [mA]	Napon[mV]	Struja [mA]
1	2214.61	9.22	2206.7	0
2	2192.35	30.6	2198.62	11.06
3	2178.94	49.77	2192.27	20.28
4	2155.01	70.05	2188.4	29.5
5	2142.77	90.33	2178.52	40.56
6	2123.09	108.76	2171.21	51.62
7	2106.46	129.59	2143.02	71.16
8	2072.25	150.98	2130.82	90.33
9	2055.2	169.6	2110.97	101.02
10	2035	182.5	2106.76	110.61
11	2014.29	191.35	2080.55	140.1
12	1952.93	224.9	2050.9	158.54
13	1745.39	278.36	2022.97	180.66
14	0	293	1929.73	213.84
15	/	/	1709.3	245.18
16	/	/	1497.03	250.71



Slika 5.7 Izmjerena I-V karakteristika za dva eksperimenta

5.2 ESTIMACIJA PARAMETARA JEDNODIODNOG MODULA HOA ALGORITMA SA SDM KRITERIJUMSKOM FUNKCIJOM

U Tabeli 5.2 su date granične vrijednosti parametara jednodiodnog modela kada HOA algoritam koristi SDM kriterijumske funkcije.

Tabela 5.2 Granične vrijednosti parametara za dva modula – SDM kriterijumska

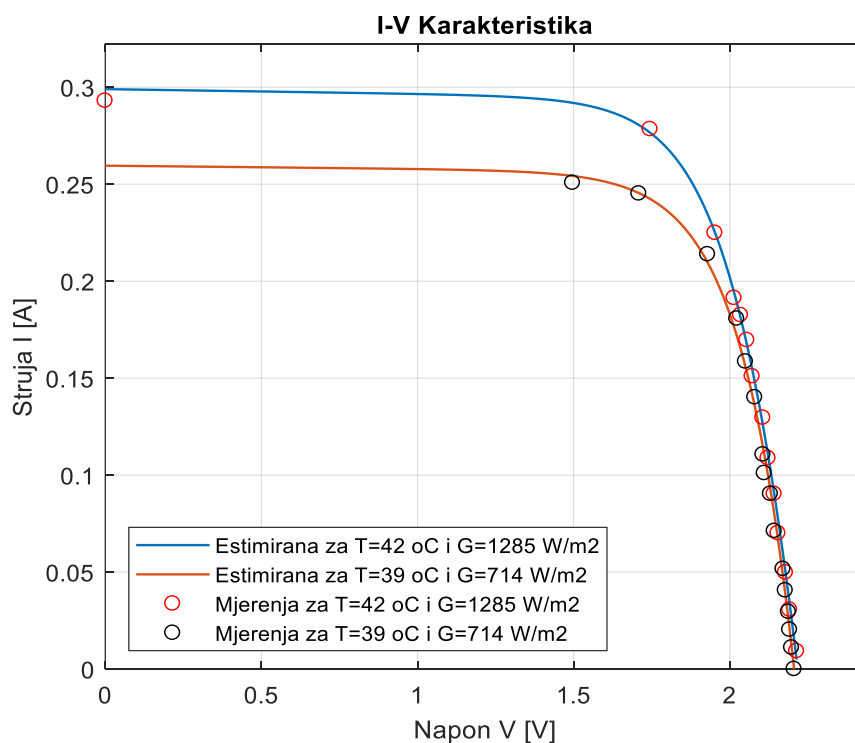
	R_s	R_p	I_{pv}	$I_o (10^{-8})$	a
DONJA GRANICA	0	250	0.1	0	0.1
GORNJA GRANICA	1	700	0.4	12	0.5

Za određivanje parametara korišćeno je milion odbiraka ($n=1000000$) i broj pokretanja algoritma je sto ($maxrun=100$). U Tabeli 5.3 su date estimirane vrijednosti parametara. U konkretnom slučaju korišćeni su podaci prvog eksperimenta (E1).

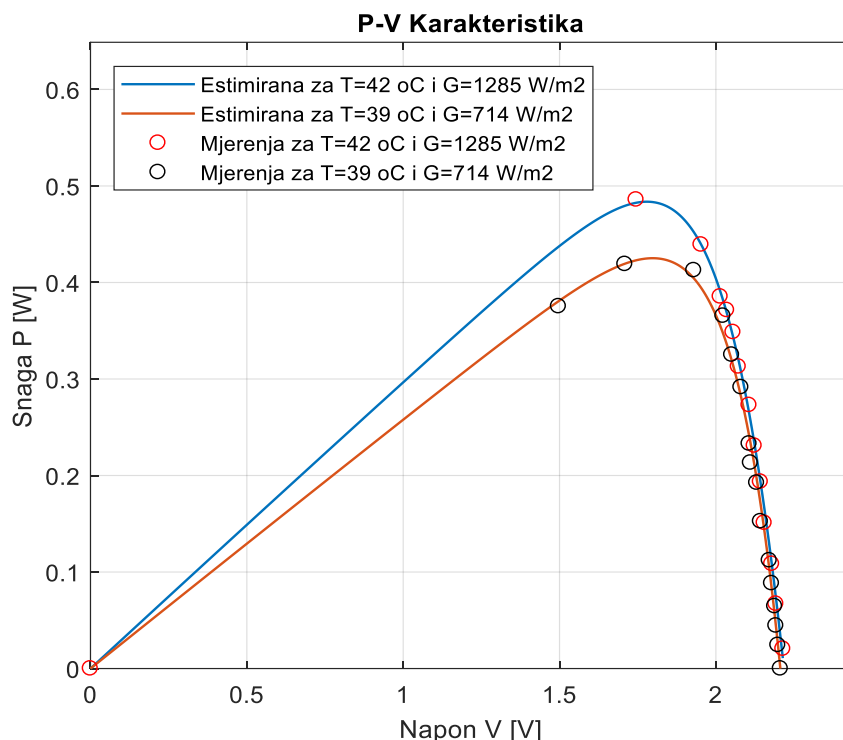
Tabela 5.3 Estimirane vrijednosti parametara i srednja kvadratna greška za dva modula – SDM kriterijumska

PARAMETRI	R_s	R_p	I_{pv}	$I_o (10^{-8})$	a	SDM - RMSE
	0.2359	414.48	0.2992	7.95981	0.3375	4.3353E-03

Na slikama 5.8 i 5.9 prikazane su dobijene I-V i P-V karakteristike za različite vrijednosti insolacije i temperature i upoređene na odgovarajućim mjerenjima. Karakteristike dobijene za druge vrijednosti insolacije i temperature su određene proračunom vrijednosti parametara solarnih ćelija i zavise od vrijednosti temperature [13]



Slika 5.8 I-V karakteristika za solarni moduo pri različitim uslovima (SDM, $n=1000000$, $maxrun=100$)



Slika 5.9 P-V karakteristika za solarni moduo pri različitim uslovima (SDM, $n=1000000$, $maxrun=100$)

Sa slika se može uočiti da simulirane karakteristike dobijene estimacijom parametara jednodiodnog modela predloženim algoritmom sa SDM kriterijumskom funkcijom veoma dobro aproksimiraju izmjerene karakteristike za različite vrijednosti insolacije i temperature.

5.3 ESTIMACIJA PARAMETARA JEDNODIODNOG MODELA PRIMJENOM HOA ALGORITMA SA LAMBERTW KRITERIJUMSKOM FUNKCIJOM

Vrijeme estimacije, a samim tim i kompleksnost računanja kriterijumske funkcije LambertW je mnogo veća od SDM kriterijumske funkcije. Zbog toga se pri zadavanju ulaznih parametara HOA algoritma uzet mnogo manji broj pokretanje algoritma $maxrun$ i odbiraka n .

U Tabeli 5.4 date su granične vrijednosti parametara, jednodiodnog modela kada HOA algoritam koristi LambertW kriterijumsku funkciju.

Tabela 5.4 Granične vrijednosti parametara za dva modula – LambertW kriterijumska

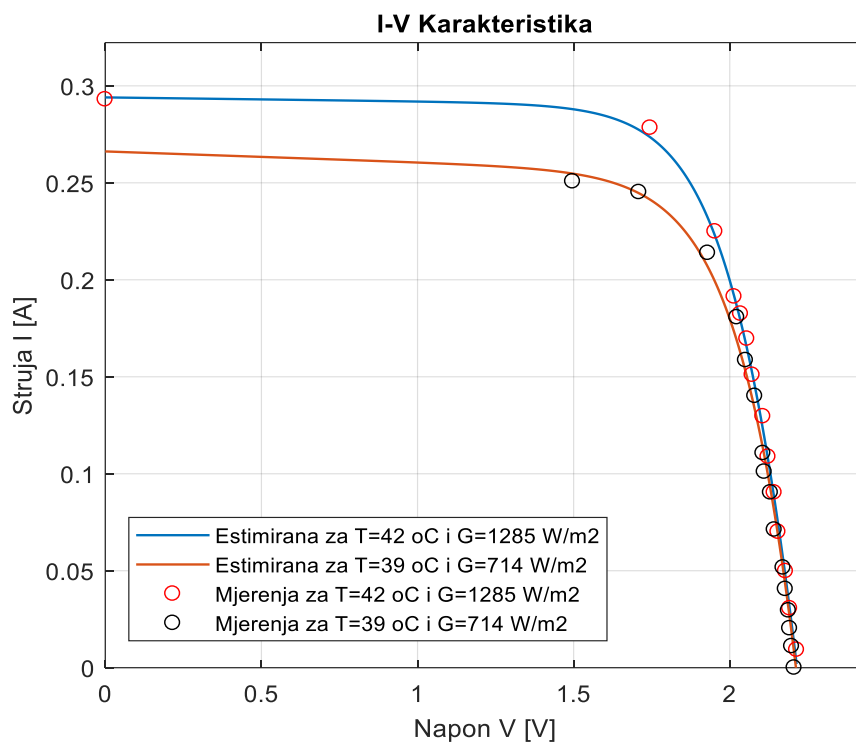
	R_s	R_p	I_{pv}	$I_o (10^{-8})$	a
DONJA GRANICA	0	250	0.1	0	0.1
GORNJA GRANICA	0.5	700	0.4	12	0.5

Za određivanje parametara korišćeno je sto hiljada odbiraka ($n=100000$); broj pokretanja algoritma je tri ($maxrun=3$). U Tabeli 5.5 su date estimirane vrijednosti parametara.

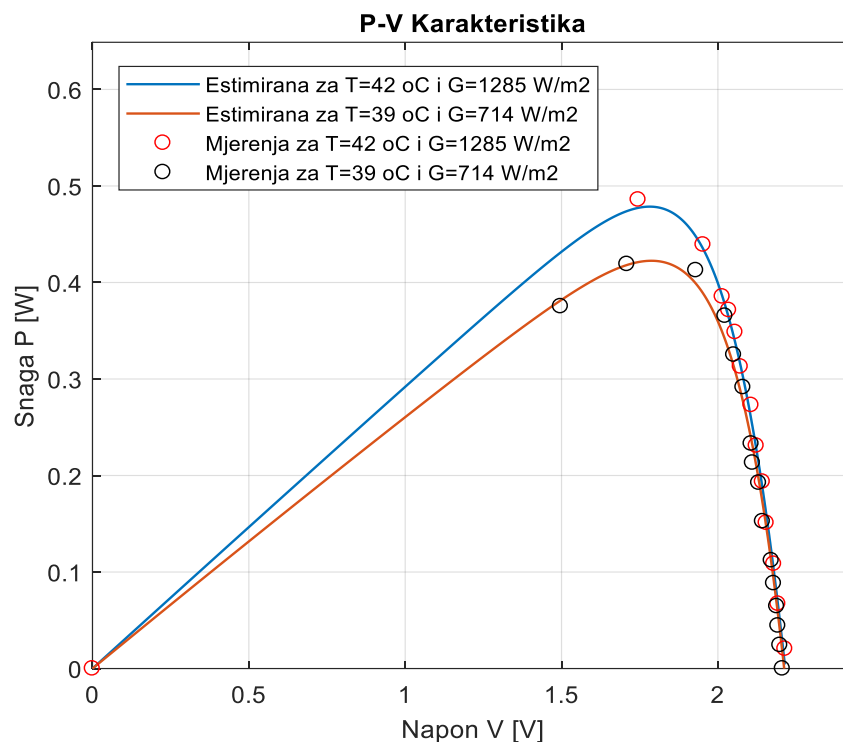
Tabela 5.5 Estimirane vrijednosti parametara i srednja kvadratna greška za dva modula – LambertW kriterijumska

PARAMETRI	Rs	Rp	I _{pv}	I _o (10 ⁻⁸)	a	Lambert W- RMSE
	0.2563	485.9479	0.2942	4.34744	0.3245	3.7439E-03

Na slikama 5.10 i 5.11 prikazane su dobijene I-V i P-V karakteristike za različite vrijednosti insolacije i temperature i upoređene sa odgovarajućim mjerenjima.



Slika 5.10 I-V karakteristika za solarni moduo pri različitim uslovima (LAMBERTW, n=10000, maxrun=5)



Slika 5.11 P-V karakteristika za solarni moduo pri različitim uslovima (LAMBERTW, n=10000, maxrun=5)

Sa slika se može uočiti da simulirane karakteristike dobijene estimacijom parametara jednodiodnog modela predloženim algoritmom sa SDM kriterijumskom funkcijom veoma dobro aproksimira izmjerene karakteristike za različite vrijednosti insolacije i temperature. Sve prethodno navedeno potvrđuje efikasnost primjene HOA algoritma u estimaciji parametara solarnih ćelija.

5.4 DVODIODNI MODEL – DDM

U Tabeli 5.6 su date granične vrijednosti parametara dvodiodnog modela kada HOA algoritam koristi DDM kriterijumsku funkciju.

Tabela 5.6 Granične vrijednosti parametara za dva modula – DDM kriterijumska

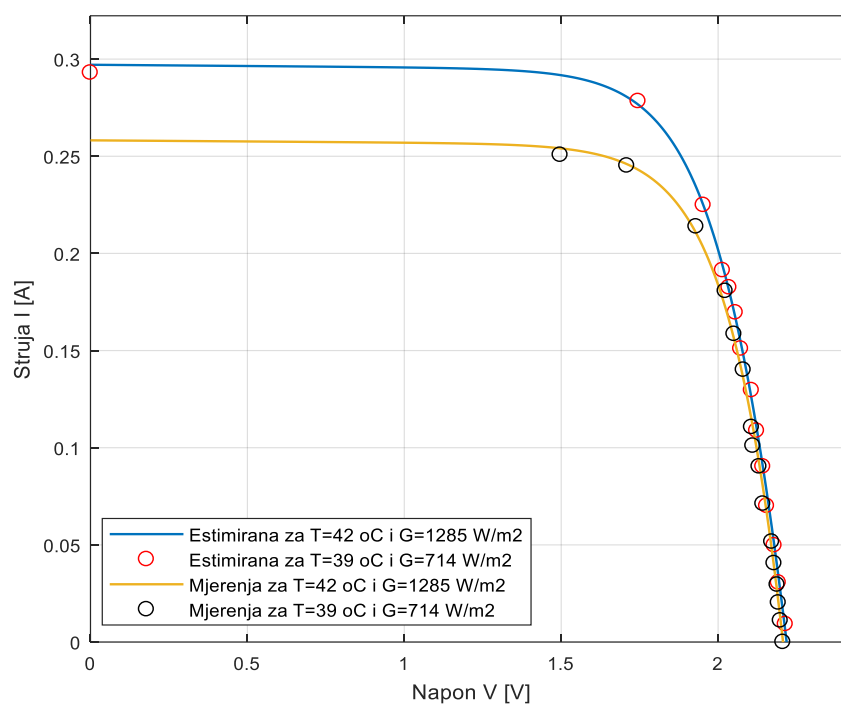
	R_s	R_p	I_{pv}	$I_{o1} (10^{-8})$	a_1	$I_{o2} (10^{-8})$	a_2
DONJA GRANICA	0.15	300	0	2	0	0	0
GORNJA GRANICA	0.4	800	0.9	10	2	7	2

Za određivanje parametara korišćeno je dva miliona odbiraka (n=2000000). U ovom slučaju broj pokretanja algoritma je sto (maxrun=100). U Tabeli 5.7 su date estimirane vrijednosti parametara.

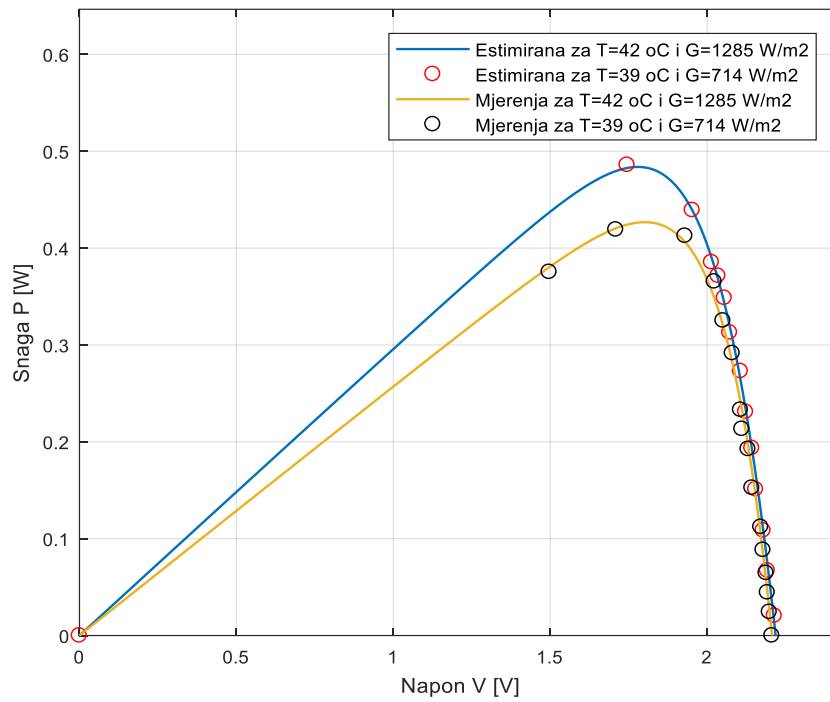
Tabela 5.7 Estimirane vrijednosti parametara i srednja kvadratna greška za dva modula – DDM kriterijumska

PARAMETRI	R_s	R_p	I_{pv}	$I_{o1} (10^{-8})$	a_1	$I_{o2} (10^{-8})$	a_2	DDM - RMSE
	0.2513	782.9911	0.2972	6.8452	0.3342	6.0643	1.9906	4.1460E-03

Na slikama 5.12 i 5.13 prikazane su dobijene I - V i P - V karakteristike za različite vrijednosti insolacije i temperature.



Slika 5.12 I - V karakteristika za solarni moduo pri različitim uslovima (DDM, $n=2000000$, $maxrun=100$)



Slika 5.13 P-V karakteristika za solarni moduo pri različitim uslovima (DDM, $n=2000000$, $maxrun=100$)

I u ovom slučaju jasno se uočava odlično podudaranje simuliranih I-V i P-V karakteristika sa izmjerenim karakteristikama.

6 ZAKLJUČAK

Zbog detaljne analize rada solarne elektrane, kao i ispitivanja priključenja solarne elektrane na elektroenergetski sistem, potrebno je poznavati detaljan matematički model solarnih ćelija. Proizvođači solarnih panela daju samo kataloške podatke (napon praznog hoda, struja kratkog spoja i napon i struja pri maksimumu snage) o solarnim ćelijama (modulima) i to za nominalne uslove (nominalna temperatura i zračenje). Zbog toga je određivanje parametara zamjenske šeme solarnih ćelija za različite vremenske uslove vrlo popularan i zahtjevan istraživački zadatak, što povrđuje veliki broj naučnih radova nastalih u skorije vrijeme.

Kako se parametri potrebni za modelovanje solarne ćelije ne nalaze u kataloškim podacima, potrebno ih je estimirati. U ovom radu je za estimaciju parametara modela solarne ćelije predložena haotična optimizaciona procedura. U radu su estimirani parametri jednodiodnih i dvodiodnih modela različitih tipova solarnih ćelija. Preciznost predloženog algoritma za estimaciju parametara je provjerena upoređenjem sa karakteristikama dobijenim drugim estimacionim metodama i mjerenim vrijednostima.

Poseban dio rada posvećen je opisu realizovane laboratorijske postavke koja je sastavljena od dva solarna modula i cjelokupnog sistema za mjerenje i akviziciju strujno-naponskih karakteristika solarnih ćelija. Primjenom ove postavke odrađeno je mjerenje struja-napon i snaga-napon karakteristika solarnih ćelija za različite vrijednosti insolacije i temperetature. Takođe, primjenom realizovanog algoritma sprovedena je estimacija parametara i jednodiodnih i dvodiodnih modela solarnih modula.

Na osnovu prikazanih rezultata u radu može se izvesti nekoliko važnih zaključaka. Prvo, predloženi algoritam je veoma lak za implementaciju. Drugo, predloženi algoritam je veoma efikasan u estimaciji parametara solarnih ćelija i modula. Treće, i najbitnije, tačnost predloženog algoritma je potvrđena poređenjem dobijenih rezultata u odnosu na veliki broj metoda predloženih u literaturi i publikovanih u brojnim naučnim časopisima.

Predmetni master rad daje veliki broj budućih istraživačkih pravaca. prvo, realizovana eksperimentalna postavka može biti iskorišćena i za realizaciju drugih eksperimenata i različitih konekcija solarnih ćelija. Osim toga, kako je teorija haosa veoma popularna, jedan od pravaca istraživanja može biti orjentisan i ka razvoju hibridnih algoritama (metaheuristički algoritmi sa haotičnim sekvencama) u cilju brže i tačnije estimacije parametara solarnih ćelija.

7 REFERENCE

- [1] E. Moshksar, T. Ghanbari, "Adaptive Estimation Approach for Parameter Identification of Photovoltaic Modules.," *Photovolt.*, p. 614–623, 2017.
- [2] H. Ali, H. Mojgan, M. Saad, H. Hussein, „Solar cell parameters extraction based on single and double-diode models: A review.," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, br. 56, p. 494–509, 2016.
- [3] I. Kashif, S. Zainal, T. Hamed, „Simple, fast and accurate two-diode model for photovoltaic modules.," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, br. 95, p. 586–594, 2011.
- [4] B. Chitti, G. Suresh, „A novel simplified two-diode model of photovoltaic (PV) module.," *IEEE J. Photovolt.*, br. 4, p. 1156–1161, 2014.
- [5] Y. Chen, Y. Sun, Z. Meng, „An improved explicit double-diode model of solar cells: Fitness verification and parameter extraction.," *Energy Convers. Manag.*, br. 169, p. 345–358, 2018.
- [6] A. Laudani, F. Fulginei, A. Salvini, „Identification of the one-diode model for photovoltaic modules from datasheet values.," *Sol. Energy*, br. 108, p. 432–446, 2014.
- [7] P. Biswas, P. Suganthan, G. Wu, G. Amaratunga, „Parameter estimation of solar cells using datasheet information with the application of an adaptive differential evolution algorithm.," *Renew. Energy*, br. 132, p. 425–438, 2019.
- [8] A. Laudani, F. Riganti, A. Salvini, „High performing extraction procedure for the one-diode model of a photovoltaic panel from experimental I-V curves by using reduced forms.," *Sol. Energy*, br. 103, p. 316–326, 2014.
- [9] A. Chatterjee, A. Keyhani, D. Kapoor, „Identification of photovoltaic source models.," *IEEE Trans. Energy Convers.*, br. 24, p. 883–889, 2011.
- [10] S. Shongwe, M. Hanif, „Comparative analysis of different single-diode PV modeling methods.," *IEEE J. Photovolt.*, br. 5, p. 938–946, 2015.
- [11] E. Batzelis, „Non-Iterative Methods for the Extraction of the Single-Diode Model Parameters of Photovoltaic Modules: A Review and Comparative Assessment.," *Energies*, br. 12, p. 358, 2019.
- [12] A. Jordehi, „Parameter estimation of solar photovoltaic (PV) cells: A review.," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, br. 61, p. 354–371, 2016.
- [13] M. Kumar, A. Kumar, „An efficient parameters extraction technique of photovoltaic models for performance assessment.," *Sol. Energy*, br. 158, p. 192–206, 2017.
- [14] I. Kashif, Z. Salam, S. Mekhilef, A. Shamsudin, „Parameter extraction of solar photo voltaic modules using penalty based differential evolution.," *Appl. Energy*, br. 99, p. 297–308, 2012.
- [15] K. Dhruv, Y. Goswami, R. Kumar, „ A novel approach to parameter estimation of photovoltaic systems using hybridized optimizer.," *Energy Convers. Manag.*, br. 187, p. 486–511, 2019.
- [16] Y. Dalia, A. Dalia, M. Eteiba, N. Ponnuthurai, „Static and dynamic photovoltaic models' parameters identification using Chaotic Heterogeneous Comprehensive Learning Particle Swarm Optimizer variants.," *Energy Convers. Manag.*, br. 182, p. 546–563, 2019.

- [17] E. Abd, O. Diego, „Parameter estimation of solar cells diode models by an improved opposition-based whale optimization algorithm.,“ *Energy Convers. Manag.*, br. 171, p. 1843–1859, 2018.
- [18] M. Manel, S. Anis, M. Faouzi, „Particle swarm optimisation with adaptive mutation strategy for photovoltaic solar cell/module parameter extraction.,“ *Energy Convers. Manag.*, br. 175, p. 151–163, 2018.
- [19] D. Kler, P. Sharma, A. Banerjee, V. Rana, K. Kumar, „PV cell and module efficient parameters estimation using evaporation rate-based water cycle algorithm.,“ *Swarm Evolut. Comput.*, br. 35, p. 93–110, 2017.
- [20] P. Lin, S. Cheng, W. Yeh, Y. Chen, L. Wu, „Parameters extraction of solar cell models using a modified simplified swarm optimization algorithm.,“ *Sol. Energy*, br. 144, p. 594–603, 2017.
- [21] J. Ram, T. Babu, T. Dragicevic, N. Rajasekar, „A new hybrid bee pollinator flower pollination algorithm for solar PV parameter estimation.,“ *Energy Convers. Manag.*, br. 135, p. 463–476, 2017.
- [22] A. Fathy, H. Rezk, „Parameter estimation of photovoltaic system using imperialist competitive algorithm.,“ *Renew. Energy*, br. 111, p. 307–320, 2017.
- [23] V. Rubežić, L. Lazović, A. Jovanović, „Parameter identification of Jiles-Atherton model using the chaotic optimization method.,“ *Int. J. Comput. Math. Electr. Electron. Eng.*, br. 37, p. 2067–2080, 2018.
- [24] M. Čalasan, D. Mujičić, V. Rubežić, M. Radulović, „Estimation of equivalent circuit parameters of single-phase transformer by using chaotic optimization approach.,“ *Energies*, br. 12, p. 1697, 2019.
- [25] L. Coelho, „Tuning of PID controller for an automatic regulator voltage system using chaotic optimization approach.,“ *Chaos Solitons Fractals*, br. 39, p. 1504–1514, 2009.
- [26] A. Jovanović, L. Lazović, V. Rubežić, „Adaptive Array Beamforming Using a Chaotic Beamforming Algorithm.,“ *Int. J. Antennas Propag.*, 2016.
- [27] A. Jovanović, L. Lazović, V. Rubežić, „Radiation pattern synthesis using a Chaotic beamforming algorithm.,“ *COMPEL Int. J. Comput. Math. Electr. Electron. Eng.*, br. 35, p. 1814–1829, 2016.
- [28] D. Yang, G. Li, G. Cheng, „On the efficiency of chaos optimization algorithms for global optimization.,“ *Chaos Solitons Fractals*, br. 34, p. 1366–1375, 2007.
- [29] X. Yuan, Y. He, L. Liu, „Parameter extraction of solar cell models using chaotic asexual reproduction optimization.,“ *Neural Comput. Appl.*, br. 26, p. 227–239, 2015.
- [30] X. Yuan, Y. Xiang / Y. He, „Parameter extraction of solar cell models using mutative-scale parallel chaos optimization algorithm.,“ *Sol. Energy*, br. 108, p. 238–251, 2014.
- [31] A. Valdivia-González, D. Zaldívar, E. Cuevas, M. Pérez-Cisneros, F. Fausto / A. González, „A Chaos-Embedded Gravitational Search Algorithm for the Identification of Electrical Parameters of Photovoltaic Cells.,“ *Energies*, br. 10, p. 1052, 2017.
- [32] D. Oliva, A. Ewees, M. Aziz, A. Hassaniien, M. Pérez-Cisneros, „A Chaotic Improved Artificial Bee Colony for Parameter Estimation of Photovoltaic Cells.,“ *Energies*, br. 10, p. 865, 2017.
- [33] D. Oliva, M. Aziz, A. Hassaniien, „Parameter estimation of photovoltaic cells using an improved chaotic whale optimization algorithm.,“ *Appl. Energy*, br. 200, p. 141–154, 2017.

- [34] C. Bertuglia, F. Via, „Nonlinearity, Chaos, and Complexity,” *Oxford University Press: Oxford, UK*, 2005.
- [35] M. Kennedy, „Three steps to chaos. II. A Chua’s circuit primer,” *IEEE Transactions on Circuits*, t. 40, br. 10, pp. 657-674, 1993.
- [36] J. Sprott, „Chaos and Time-Series Analysis,” *Oxford University Press*, 2003.
- [37] L. J. dos Santos Coelho, F.A. Guerra, N.J. Batistela, J. V. Leite, „Multiobjective Cuckoo Search Algorithm Based on Duffing’s Oscillator Applied to Jiles-Atherton Vector Hysteresis Parameters Estimation.,” *IEEE Transactions on Magnetics*, t. 49, br. 5, pp. 1745-1748, 2013.
- [38] L. dos Santos Coelho, „Tuning of PID controller for an automatic regulator voltage system using chaotic optimization approach.,” *Chaos Solitons Fractals*, t. 39, br. 4, pp. 1504-1514, 2009.
- [39] W.B. Wang, Q. Feng, D. Liu, „Application of chaotic particle swarm optimization algorithm to pattern synthesis of antenna arrays.,” *Progress in Electromagnetics Research*, t. 115, pp. 173-189, 2011.
- [40] D. Yang, G. Li, G. Cheng, „On the efficiency of chaos optimization algorithms for global optimization.,” *Chaos Solitons Fractals*, t. 34, br. 4, pp. 1366-1375, 2007.
- [41] X. Gao, Y. Cui, J. Hu, N. Tahir, G. Xu, „Performance comparison of exponential, Lambert W function and Special Trans function based single diode solar cell models.,” *Energy Conversion and Management*, br. 171, p. 1822–1842, 2018.
- [42] T. Easwarakhanthan, J. Bottin, I. Bouhouch, C. Boutrit „Nonlinear minimization algorithm for determining the solar cell parameters with microcomputers.,” *International Journal of Solar Energy*, pp. 1-12, 1986.
- [43] M. G. Villalva, „Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays.,” February 2015. [Na mreži]. Available: <https://sites.google.com/site/mvillalva/pvmodel>.
- [44] L.H.I. Lim, Z. Ye, J. Ye, D. Yang, H. Du, „A linear identification of diode models from single I-V characteristics of PV panels.,” *IEEE Trans Ind Electron*, br. 62, p. 4181–4193, 2015.
- [45] H. Wei, J. Cong, X. Lingyun, S. Deyun, „Extracting solar cell model parameters based on chaos particle swarm algorithm.,” *International conference on electric information and control engineering*, pp. 398-402, 2011.
- [46] O. Hachana, K.E. Hemsas, G.M. Tina, C. Ventura, „Comparison of different metaheuristic algorithms for parameter identification of photovoltaic cell/module.,” *Renew Sustain Energy*, 2013.
- [47] N.T. Tong, W. Pora, „A parameter extraction technique exploiting intrinsic properties of solar cells.,” *Appl Energy*, br. 176, p. 104–115, 2016.
- [48] Q. Niu, L. Zhang, K. Li, „A biogeography-based optimization algorithm with mutation strategies for model parameter estimation of solar and fuel cells.,” *Energy Convers*, br. 86, p. 1173–1185, 2014.
- [49] M. Jamadi, F. Merrikh-Bayat, M. Bigdeli, „Very accurate parameter estimation of single- and double-diode solar cell models using a modified artificial bee colony algorithm.,” *Int J Energy Environ Eng*, br. 7, p. 13–25, 2016.
- [50] Jordehi AR., „Time varying acceleration coefficients particle swarm optimisation (TVACPSO): A new optimisation algorithm for estimating parameters of PV cells and modules.,” *Energy Convers Manage*, br. 129, p. 262–274, 2016.

- [51] M. Ye, X. Wang, Y. Xu, „Parameter extraction of solar cells using particle swarm optimization.,“ *Appl Phys*, br. 105, pp. 1-8, 2009.
- [52] S.J. Patel, A.K. Panchal, V. Kheraj, „Extraction of solar cell parameters from a single current–voltage characteristic using teaching learning based optimization algorithm.,“ *Appl Energy*, br. 119, pp. 384-393, 2014.
- [53] M.F. AlHajri, K.M. , El-Naggar, M.R. AlRashidi, A.K. Al-Othman, „Optimal extraction of solar cell parameters using pattern search.,“ *Renew Energy*, br. 44, p. 238–245, 2012.
- [54] K.M. El-Naggar, M.R. AlRashidi, M.F. AlHajri, A.K. Al-Othman, „Simulated annealing algorithm for photovoltaic parameters identification.,“ *Sol Energy*, br. 86, p. 266–274, 2012.
- [55] M.R.AlRashidi, M.F.AlHajri, K.M. El-Naggar, A.K. Al-Othman, „A new estimation approach for determining the I-V characteristics of solar cells.,“ *Sol Energy*, br. 85, p. 1543–1550, 2011.
- [56] R. R. Chellaswamy C, „Parameter extraction of solar cell models based on adaptive differential evolution algorithm.,“ *Renew Energy*, br. 97, p. 823–837, 2016.
- [57] R. H. Fathy A, „Parameter estimation of photovoltaic system using imperialist competitive algorithm.,“ *Renew Energy*, br. 111, p. 307–320, 2017.
- [58] A El-Fergany, „Efficient tool to characterize photovoltaic generating systems using mine blast algorithm.,“ *Electr Power Compon Syst*, br. 43, p. 890–901, 2015.
- [59] E.E. Alia, M.A. El-Hameedb, A.A. El-Ferganyb, M.M. El-Arini, „Parameter extraction of photovoltaic generating units using multi-verse optimizer.,“ *Sustain Energy Technol Assess*, br. 17, pp. 68-76, 2016.
- [60] K. Ishaque, Z. Salam, H. Taheri, „Simple, fast and accurate two-diode model for photovoltaic modules.,“ *Solar Energy Materials & Solar Cells*, br. 95, p. 586–594, 2011.
- [61] Y. Zhang, S. Lyden, B.A. León de la Barra, M.E. Haque, „A genetic algorithm approach to parameter estimation for PV modules.,“ *IEEE*, 2016.
- [62] D. Bonkougou, Z. Koalaga, D. Njomo, „Modelling and Simulation of photovoltaic module considering single-diode equivalent circuit model in MATLAB.,“ *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, t. 3, br. 3, 2013.
- [63] A. E. TAYYAN, „An approach to extract the parameters of solar cells from their illuminated I and V.,“ *Turkish Journal of Physics*, 2015.
- [64] Heliocentris, „Clean Energy Trainer,“ 2017. [Na mreži]. Available: <http://heliocentrisacademia.com/portfolio-item/clean-energy-trainer/#:~:text=Clean%20Energy%20Trainer,learn%20about%20the%20individual%20technologies..> [Poslednji pristup 2019].