



UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

MILENA BOŠKOVIĆ

APROKSIMATIVNA VIŠEDIODNA EKVIVALENTNA
KOLA SOLARNIH ĆELIJA – MODELOVANJE I ESTIMACIJA
PARAMETARA
- MASTER RAD -

Podgorica, 2025. godine

PODACI I INFORMACIJE O KANDIDATU

Ime i prezime: Milena Bošković

Datum i mjesto rođenja: 23.09.1998. godine, Bijelo Polje, Crna Gora

Naziv završenog osnovnog studijskog programa i godina završetka studija:

Energetika i automatika, 2021. godine

INFORMACIJE O MASTER RADU

Naziv master studija: Studijski program Elektroenergetski sistemi

Naslov master rada: Aproksimativna višediodna ekvivalentna kola solarnih ćelija – modelovanje i estimacija parametara

Fakultet/Akademija na kojem je rad odbranjen: Elektrotehnički fakultet, Podgorica

UDK, OCJENA I ODBRANA MASTER RADA

Datum prijave master rada: 17.02.2025. godine

Datum sjednice Vijeća na kojoj je prihvaćena tema: 24.04.2025. godine

Mentor: Prof. dr Martin Čalasan

Komisija za ocjenu/ odbranu master rada:

1. Prof. dr Vladan Vujičić
2. Prof. dr Martin Čalasan
3. Doc. dr Snežana Vujošević

Datum odbrane: 20.11.2025. godine

Kandidat: Milena Bošković

Izjava o autorstvu

Potpisani-a Milena Bošković

Broj indeksa/upisa 10/21

Izjavljujem

da je master rad pod nazivom

"Aproksimativna višediodna ekvivalentna kola solarnih ćelija – modelovanje i estimacija parametara"

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da predloženi master rad ni u cjelini ni u djelovima nije bio predložen za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih ustanova visokog obrazovanja,
- da su rezultati korektno navedeni, i
- da nijesam povrijedio/la autorska i druga prava intelektualne svojine koja pripadaju trećim licima.

U Podgorici, 22.09.2025. godine

Potpis magistranda



PREDGOVOR

U savremenim istraživanjima solarne energije, sve veći značaj dobija razvoj preciznih modela za procjenu performansi solarnih ćelija u različitim uslovima rada. Imajući u vidu rastuće potrebe za čistim izvorima energije i smanjenje oslanjanja na fosilna goriva, tačno modelovanje fotonaponskih ćelija postaje ključni korak u optimizaciji njihove efikasnosti. Ovaj rad doprinosi toj oblasti kroz razvoj višediodnih ekvivalentnih kola koja omogućavaju detaljnije predstavljanje ponašanja solarnih ćelija, posebno u uslovima promjenljive temperature i osvijetljenosti.

Modeli solarnih ćelija se zasnivaju na električnim ekvivalentnim šemama koje povezuju ulazne fizičke parametre, poput temperature i intenziteta zračenja, sa izlaznim električnim veličinama, kao što su napon i struja. Tradicionalni jednodiodni modeli (SDM), iako jednostavni i brzi za implementaciju, pokazuju značajna ograničenja kada se primjenjuju za razne uslove i režime rada. U cilju povećavanja preciznosti, razvijeni su dvodiodni (DDM) i trodiodni modeli (TDM) koji bolje opisuju nelinearna svojstva ćelija, ali njihova primjena zahtijeva rješavanje složenih nelinearnih jednačina. Jedan od ključnih izazova u ovom procesu jeste određivanje parametara modela koji precizno opisuju ponašanje ćelije. Kako bi se riješio problem nelinearnosti i omogućila tačnija aproksimacija odnosa između napona i struje, u radu se koristi Lambert W funkcija. Ova funkcija omogućava zatvorena matematička rješenja I-U karakteristika, čime se povećava preciznost simulacije i smanjuje računarska složenost.

U cilju unapređenja procesa optimizacije parametara, ovo istraživanje se oslanja na primjenu metaheurističkih algoritma, koji su se pokazali izuzetno efikasnim u rješavanju složenih inženjerskih problema. Korišćeni algoritmi, inspirisani pojavama iz prirode i haotičnim sistemima, omogućavaju istraživanje prostora rješenja bez zadržavanja u lokalnim minimumima. Tačnost razvijenih modela potvrđena je kroz analizu konkretne solarne ćelije i panela. Rezultati pokazuju da predloženi pristupi omogućavaju podjednako dobre, ili čak bolje, performanse u odnosu na postojeće standardne modele, uz zadržavanje stepena složenosti. Kao ključna mjera tačnosti koristi se korijen srednje kvadratne greške (RMSE - Root Mean Square Error), koja omogućava kvantitativnu ocjenu razlike između mjerenih i estimiranih podataka.

Ukupno gledano, ovaj master rad nudi značajan doprinos razvoju tačnih i računski efikasnih modela solarnih ćelija. Time se ne samo unapređuje razumijevanje njihovog rada, već se i doprinosi boljoj kontroli i projektovanju fotonaponskih sistema. Važno je naglasiti da kod standardnih dvodiodnih i trodiodnih modela nije moguće dobiti tačan analitički izraz zavisnosti izlazne struje od napona korišćenjem Lambert W funkcije niti bilo kod drugog proznatog zatvorenog pristupa, zbog čega se u praksi pribjegava aproksimacijama i numeričkim metodama

koje često dovode do približnih i manje pouzdanih rješenja solarnih ćelija. Iz tog razloga, u ovom radu su razvijeni alternativni ekvivalentni modeli, za koje je moguće izvesti precizne analitičke izraze, a njihova rješenja se u praksi pokazuju tačnijim i stabilnijim u odnosu na rezultate koji se postižu standardnim modelima prisutnim u današnjoj literaturi. Iako su postignuti značajni rezultati, prostor za dalji razvoj i optimizaciju modela ostaje otvoren, posebno u pravcu smanjenja greške i povećanja primjenljivosti modela u realnim uslovima rada.

REZIME

U ovom master radu sprovedeno je detaljno istraživanje standardnih modela solarnih ćelija koji se pojavljuju u relevantnoj literaturi, sa ciljem analize njihove primjenljivosti da vjerodostojno opišu rad solarnih ćelija i pripadajuće gubitke. Fokus je bio na modelima koji se koriste za električno predstavljanje solarne ćelije – jednodiodni (SDM), dvodiodni (DDM) i trodiodni (TDM) modeli. Ovi modeli, zasnovani na kombinaciji strujnog generatora, dioda i otpornika (serijskog i paralelnog), omogućavaju matematičko modelovanje I-U (strujno-naponskih) i P-U (snaga-naponskih) karakteristika solarne ćelije. Međutim, zbog ograničenja u prikazu svih fizičkih procesa i internih gubitaka, standardni modeli često ne omogućavaju precizno podudaranje sa eksperimentalnim rezultatima.

U cilju unapređenja postojećih pristupa, u okviru ovog master rada su predloženi novi aproksimativni ekvivalentni modeli solarnih ćelija, razvijeni sa namjerom da se što vjernije prikažu unutrašnji gubici i složeni mehanizmi rekombinacije. Takođe korišćeni su i aproksimativni dvodiodni modeli iz literature.

Svi proračuni izvršeni su u softverskom paketu MATLAB (verzija R2021a), gdje je korišćena Lambert W funkcija za izvođenje matematički preciznih relacija između napona i struje kod svih razmatranih modela. Rezultati istraživanja pokazuju da predloženi višediodni modeli – uključujući i trodiodna i četvorodiodna ekvivalentna kola – ostvaruju niže RMSE vrijednosti u odnosu na aproksimativne dvodiodne modele iz literature. Ovim je potvrđena njihova veća preciznost u prikazu radnih karakteristika solarne ćelije i otvorena mogućnost za dalja istraživanja višediodnih modela koji bi još bolje opisivali kompleksne procese unutar fotonaponskih struktura.

ABSTRACT

This master's thesis conducts a detailed analysis of standard solar cell models found in the relevant literature, with the objective of evaluating their applicability to accurately describe the operation of solar cells and the associated losses. The focus was on models used for the electrical representation of a solar cell – namely the single-diode model (SDM), two-diode model (DDM), and three-diode model (TDM). These models, based on a combination of a current source, diodes, and resistors (series and shunt), enable mathematical modeling of the I-V (current-voltage) and P-V (power-voltage) characteristics of a solar cell. Standard models often fail to accurately correspond with experimental results due to limitations in representing real physical processes and internal losses.

To improve existing approaches, this work proposes new approximate equivalent models of solar cells, developed with the aim of more accurately representing internal losses and complex recombination mechanisms. Particular attention was given to the analysis and application of approximate two-diode models from the literature (DDM-1 and DDM-2), which are considered the most accurate in terms of minimizing the root mean square error (RMSE) between measured and simulated I-V characteristics. Accordingly, the accuracy comparison in this thesis was conducted between the proposed models and these approximate two-diode models, rather than against standard models in general.

MATLAB software was used for all calculations, where the Lambert W function was utilized to derive mathematically precise connections between voltage and current for all models considered. The results of the research show that the proposed multi-diode models – including three-diode and four-diode equivalent circuits – achieve lower RMSE values compared to the approximate two-diode models found in the literature. This proves their higher accuracy in capturing the operational features of solar cells and opens the door for further exploration of multi-diode models that can more accurately depict the complex processes occurring in photovoltaic structures.

Sadržaj:

1. UVOD	3
2. ENERGIJA SUNCA	9
2.1. FOTONAPONSKA KONVERZIJA SOLARNE ENERGIJE	11
2.1.1. Autonomni fotonaponski sistemi.....	11
2.1.2. Hibridni fotonaponski sistemi	12
2.1.3. Fotonaponski sistemi povezani na distributivnu mrežu	13
2.1.4. Fotonaponski sistemi integrisani u krovove zgrada	14
2.1.5. Plivajuće fotonaponske elektrane	14
2.1.6. Predosti i nedostaci fotonaponskih sistema.....	15
2.2. TOPLOTNA KONVERZIJA SOLARNE ENERGIJE	15
2.2.1. Solarne termalne elektrane	15
2.2.2. Solarno – termalni sistemi	16
3. FOTONAPONSKA ĆELIJA.....	17
3.1. FOTONAPONSKI EFEKAT	17
3.1.1. Fotonaponski materijali za izradu solarnih ćelija	17
3.1.2. Formiranje P-N spoja	19
3.1.3. Jednodiodni model solarne ćelije	21
3.2. UTICAJ SOLARNE IRADIJANSE I TEMPERATURE NA STRUJNO- NAPONSKU KARAKTERISTIKU FOTONAPONSKE ĆELIJE.....	24
4. STANDARDNA KOLA SOLARNIH ĆELIJA SDM, DDM I TDM	26
4.1. JEDNODIODNI MODEL SOLARNE ĆELIJE.....	27
4.2. DVODIODNI MODEL SOLARNE ĆELIJE.....	28
4.3. TRODIODNI MODEL SOLARNE ĆELIJE	29
4.4. AROKSIMATIVNA DVODIODNA KOLA DDM-1 DDM-2	30
5. APROKSIMATIVNA EKVIVALENTNA KOLA TRODIODNIH I ĆETVORODIODNIH MODELA SOLARNIH ĆELIJA	33

6. NAPREDNE METODE I ALATI ZA OPTIMIZACIJU I ESTIMACIJU PARAMETARA SOLARNIH ČELIJA.....	37
6.1. OPTIMIZACIONE METODE.....	37
6.2. METAHEURISTIČKE METODE.....	39
6.3. ER-WCA (Evaporation Rate Water Cycle Algorithm).....	42
6.4. RMSE - Root Mean Square Error	45
7. NUMERIČKI REZULTATI	46
ZAKLJUČAK.....	57
LITERATURA.....	59

1. UVOD

Savremeni trendovi u energetske industriji sve više se oslanjaju na obnovljive izvore energije, pri čemu solarna energija zauzima značajno mjesto kao jedan od najperspektivnijih izvora. Povećana zabrinutost za zaštitu životne sredine, uz stalno rastuću potrebu za energijom, doprinijela je globalnom fokusu na tehnologije koje omogućavaju efikasnije iskorišćenje prirodnih resursa. U tom kontekstu, optimizacija i precizno modelovanje solarnih (fotonaponskih) ćelija postaje ključan korak ka unapređenju pouzdanosti i efikasnosti solarnih sistema. Modelovanje komponenti elektroenergetskog sistema omogućava detaljno praćenje stanja sistema u realnom vremenu. Upotrebom savremenih računarskih tehnologija, softverskih alata i aplikacija, omogućeno je upravljanje tržištem električne energije, precizno predviđanje proizvodnje i potrošnje, brža dijagnostika i otklanjanje kvarova, kao i analitičko ispitivanje uticaja spoljašnjih faktora na rad pojedinačnih komponenti sistema.

Suočeni sa izazovima koje nameće novo doba, kao što su složenost praćenja tokova snage i neizvjesnost u predikciji proizvodnje iz obnovljivih izvora, istraživači i inženjeri rade na razvoju sofisticiranih alata i modela za analizu performansi energetske sistema u različitim uslovima. U Evropi je naročito izražena tendencija postupnog napuštanja fosilnih goriva i prelaska ka korišćenju obnovljivih izvora energije. Međutim, proizvodnja energije iz solarnih i vjetroelektrana u velikoj mjeri zavisi od brojnih faktora, uključujući temperaturu, oblačnost, meteorološke uslove, geografsku dužinu, intenzitet osunčanja, nadmorsku visinu i udaljenost od potrošačkih centara. Zbog toga je često teško unaprijed precizno procijeniti isplativost investicija u ovakve izvore.

Kako bi se obezbijedilo pouzdanije praćenje rada sistema, istraživači razvijaju napredne modele i alate za analizu performansi energetske komponenti u različitim operativnim uslovima. Posebno mjesto u ovom procesu ima modelovanje fotonaponskih sistema, koje započinje analizom solarne ćelije – osnovne jedinice za konverziju sunčeve energije u električnu.

Testiranje solarnih ćelija dešava se u standardnim test uslovima (Standard Test Conditions – STC), gdje se ispituju parametri neophodni za optimalan rad ćelije i postizanje maksimalne izlazne snage. U okviru STC definišu se karakteristične krive koje prikazuju zavisnosti struje i snage od napona na krajevima solarne ćelije, i to pri različitim nivoima osvijetljenosti i temperaturama.

Na osnovu eksperimentalnih podataka razvijaju se matematički modeli pomoću kojih je, pri poznatim uslovima i izlaznom naponu, moguće izračunati izlaznu struju. Ovakvi modeli omogućavaju detaljno računarsko praćenje proizvodnje i simulaciju ponašanja sistema u širokom spektru sredinskih uslova. U svrhu modelovanja solarnih ćelija najčešće se promjenjuju

tradicionalni jednodiodni (Single Diode Model – SDM), dvodiodni (Double Diode Model – DDM) i trodiodni (Triple Diode Model – TDM) modeli.

Tradicionalni modeli solarnih ćelija, kao što su standardni SDM i DDM, koriste se zbog svoje relativne jednostavnosti i mogućnosti implementacije u različitim aplikacijama, pri čemu omogućavaju brze rezultate. Međutim, ovi modeli često ne uspijevaju da obezbijede visoku preciznost u simulaciji stvarnog ponašanja solarnih ćelija u uslovima temperaturnih oscilacija ili pri promjenama intenziteta svjetlosti. Kao odgovor na ove izazove, razvijeni su složeniji trodiodni (TDM) i četvorodiodni (FDM) modeli, koji omogućavaju detaljniju analizu karakteristika solarne ćelije, uz bolje usklađivanje sa eksperimentalnim podacima. Ovi modeli obezbeđuju veću tačnost u simulacijama, njihova kompleksnost zahtijeva primjenu naprednih matematičkih metoda radi efikasnog rješavanja struja – napon zavisnosti. Suština problematike modelovanja solarnih ćelija ogleda se u složenim nelinearnim i eksponencijalnim jednačinama koje opisuju ponašanje komponenti unutar ćelije, uključujući tokove naelektrisanih čestica, procese rekombinacije i apsorpcije, kao i međusobne interakcije električnih parametara. Tačnost modela u velikoj mjeri zavisi od preciznog određivanja njegovih parametara, koji direktno utiču na mogućnost predviđanja performansi pri promjenama temperature i nivoa osunčanosti, kao i na formiranje tačnih strujno – naponskih karakteristika.

U okviru istraživanja ovog master rada, poseban fokus stavljen je na implementaciju aproksimativnih ekvivalentnih trodiodnih i četvorodiodnih modela solarne ćelije, sa ciljem na unapređenja tačnosti i povećanja praktične primjenljivosti. Za razliku od dosadašnjih pristupa rješavanju nelinearnih jednačina koje opisuju odnos između struje i napona – a koji se često oslanjaju na aproksimacije koje smanjuju preciznost – u ovom radu primjenjuje se Lambertova W funkcija. Ova funkcija omogućava analitičko izražavanje I-U (strujno – naponskih) karakteristika fotonaponskih ćelija, te se pokazala izuzetno korisnom u rješavanju transcendentnih jednačina eksponencijalnog tipa koje se javljaju u ovim modelima.

Primjena Lambert W funkcije omogućava formulaciju izraza koji eksplicitno opisuje zavisnost struje od napona na krajevima ćelije, čime se pojednostavljuje optimizacioni proces. Ipak, matematički modeli koji uključuju ovu funkciju su izuzetno kompleksni i nelinearni što implicira potrebu za korišćenjem sofisticiranih algoritama. Za probleme identifikacije i procjene parametara solarnih ćelija, u relevantnoj literaturi primjenjivane su različite metode:

1. Analitičke metode – Ove metode se najčešće primjenjuju pri procjeni parametara jednodiodnog modela solarne ćelije. Karakteriše ih jednostavnost i brzina izvođenja, ali istovremeno i ograničena tačnost, naročito u složenijim modelima koji uključuju veći broj parametara. Budući da se oslanjaju na različite aproksimacije, analitičke metode na mogu

uvijek pružiti precizno i pouzdano rješenje, te često dovode do odstupanja između modela i eksperimentalnih rezultata [1]- [3].

2. Numeričke metode – U odnosu na analitičke, numeričke metode pružaju viši nivo preciznosti, posebno kod modela sa većim brojem nepoznatih parametara. Zasnovane na iterativnim tehnikama, ove metode omogućavaju postepeno približavanje rješenju, ali njihova efikasnost u velikoj mjeri zavisi od izbora početnih uslova i veličine koraka iteracije. Kod modela visoke složenosti, postoji rizik da algoritam konvergira ka lokalnom, a ne globalnom minimumu, što može uticati na pouzdanost konačnih rezultata [4]- [5].
3. Metaheurističke metode – Ove metode su se pokazale najefikasnijim za rješavanje problema optimizacije sa višestrukim nepoznatim parametrima. Zahvaljujući sposobnosti pretrage velikih i složenih prostora rješenja u realnom vremenu, metaheuristički pristupi omogućavaju višu robusnost u odnosu na klasične numeričke metode. Takođe, posjeduju manju sklonost konvergenciji ka lokanim minimumima, što ih čini pogodnim za primjenu u optimizaciji modela solarnih ćelija. Njihova efikasnost, međutim, zavisi i od dostupnosti naprednih računarskih resursa [6]- [13]

U ovom radu, za potrebe optimizacije rada solarne ćelije i identifikacije parametara aproksimativnih modela – u kojima se kod trodiodnih modela optimizuje 9, a kod četvorodiodnih 11 parametara – primijenjena je metaheuristička metoda **ER-WCA (Evaporation Rate Water Cycle Algorithm)**. ER-WCA je inspirisan prirodnim ciklusom vode – procesima isparavanja, kondenzacije i površinskog oticanja. Ovaj algoritam omogućava efikasnu pretragu velikog broja kombinacija parametara, pri čemu obezbeđuje balans između tačnosti rješenja i brzine konvergencije. Za razliku od klasičnih numeričkih pristupa kao što je Newton-Raphson metoda, koji su osjetljivi na početne uslove i često konvergiraju ka lokalnim minimumima, metaheurističke metode pružaju fleksibilnije i robusnije metode za pretraživanje složenih prostora rješenja.

Pored samog algoritma, dodatno unapređenje je sprovedeno kroz modifikaciju strukture ekvivalentnog kola solarne ćelije, konkretno promjenom pozicije serijske otpornosti. Ova inovacija omogućava korišćenje Lambert W funkcije u procesu optimizacije [14]- [17].

Kao kriterijum za estimaciju parametara u radu će se koristiti korijen srednje kvadratne greške (RMSE - Root Mean Square Error) koji kvantifikuje razliku između simulirane struje, dobijene pomoću modela, i referentne struje izmjerene u STC, za unaprijed definisane temperature i nivoe osunčanosti.

Na bazi prethodnog, mogu se sagledati doprinosi rada. S jedne strane, ovaj master rad unapređuje postojeće metode modelovanja solarnih ćelija kroz implementaciju aproksimativnih trodiodnih i četvorodiodnih kola, dok s druge strane doprinosi boljem razumijevanju složenih

odnosa između izlazne struje i napona, pod promjenljivim uslovima rada. Postignuti rezultati ukazuju na to da aproksimativni četvorodiodni modeli ostvaruju niže vrijednosti RMSE u odnosu na trodiodne modele, što potvrđuje veću preciznost vrišediodnih pristupa u simulaciji realnog ponašanja solarnih ćelija.

Osim teorijskog doprinosa, rezultati istraživanja imaju izražen praktični značaj. Preciznije modelovanje omogućava bolju procjenu proizvodnje električne energije, pouzdanije planiranje potrošnje, kao i racionalnije donošenje odluka u domenu solarne energetike.

Međutim, ne treba zanemariti ograničenja istraživanja. Bez obzira na preciznost modela, nemoguće je eliminisati sve izvore greške, prvenstveno zbog promjenljivih prirodnih faktora kao što su iradijacija, temperatura, zasjenčenost, zaprljanost panela i degradacija materijala tokom vremena. Takođe, greške u mjerenju I-U karakteristika i ograničenja mjernih instrumenata takođe doprinose odstupanjima između simuliranih i stvarnih podataka. Zbog toga, čak i najnapredniji matematički modeli i optimizacione metode ne mogu garantovati potpunu podudarnost sa realnim performansama solarnih ćelija.

U tom kontekstu, otvara se prostor za buduća istraživanja koja bi bila usmjerena ka razvoju adaptivnih i vremenski varijabilnih modela, koji bi integrisali dinamiku promjena okruženja i parametara u realnom vremenu. Zako modeli mogli bi pružiti još viši stepen pouzdanosti u predikciji ponašanja solarnih ćelija pod stvarnim uslovima eksploatacije.

Zaključno, ovaj rad ne samo da nudi inovativnu metodologiju za modelovanje solarnih ćelija, već predstavlja i značajan doprinos razvoju šire oblasti obnovljivih izvora energije. Kroz integraciju naprednih matematičkih funkcija, metaheurističkih algoritama i eksperimentalnih podataka, postavljena je osnova za dalja unapređenja modela i algoritamskih rješenja. U perspektivi, posebno se otvara mogućnost razvoja n-diodnih modela, čime bi se omogućilo još preciznije modelovanje i predikcija rada solarnih ćelija u različitim operativnim uslovima, uz postizanje optimalnih performansi sistema.

Rad je organizovan iz šest poglavlja.

U prvom poglavlju daje se detaljan pregled značaja Sunčeve energije kao primarnog izvora energije na Zemlji, sa posebnim osvrtom na načine iskorišćavanja solarne energije kroz fotonaponsku i toplotnu konverziju. U ovom poglavlju objašnjene su osnovne karakteristike Sunčevog zračenja, koncept iradijacije i insolacije, kao i faktori koji utiču na efikasnost pretvaranja Sunčeve energije u korisnu električnu ili toplotnu energiju. Takođe, razmatrani su uticaji geografskih, klimatskih i tehničkih parametara na potencijal solarnih sistema, uključujući i ulogu nagiba, orijentacije i temperature fotonaponskih modula. Isto tako u poglavlju se obrađuje fotonaponska konverzija solarne energije, gdje je prikazan način funkcionisanja solarnih ćelija i modula, kao i struktura fotonaponskog sistema sa svim ključnim komponentama, uključujući invertore i akumulatorske baterije. Na kraju je prikazana i osnovna klasifikacija fotonaponskih sistema, prema načinu povezivanja i upotrebi.

U drugom poglavlju detaljno se analizira princip fotonaponske konverzije solarne energije u električnu energiju, sa posebnim osvrtom na fiziku fotonaponskog efekta i karakteristike solarnih ćelija. U ovom poglavlju detaljno je objašnjen fotonaponski efekat kao osnovni princip rada solarnih ćelija, uključujući ulogu poluprovodničkih materijala, s posebnim osvrtom na silicijum kao najzastupljeniji materijal. Takođe, poglavlje obrađuje strukturu solarne ćelije i njen električni model – jednodiodni model – koji uključuje realnu diodu i idealni izvor struje, uz dodatak serijske i paralelne otpornosti koje predstavljaju ključne izvore gubitaka i utiču na efikasnost ćelije. Pored toga, istaknuta je važnost solarne iradijacije i iradijacije kao faktora koji značajno utiču na performanse solarnih ćelija. Ovi koncepti su ključni za razumevanje efikasnosti i rada fotonaponskih sistema pod različitim uslovima zračenja.

U trećem poglavlju obrađuje se modelovanje karakteristika solarnih ćelija pomoću različitih električnih modela. U ovom poglavlju opisani su jednodiodni, dvodiodni i trodiodni modeli, koji omogućavaju preciznije prikaze stvarnih gubitaka i procesa unutar ćelije, kao i njihove prednosti i ograničenja. Posebna pažnja posvećena je uticaju serijske i paralelne otpornosti, kao i različitim rekombinacionim procesima. Takođe se razmatraju savremeni aproksimativni modeli, poput DDM-1 i DDM-2, koji pružaju bolju usklađenost sa eksperimentalnim podacima zahvaljujući smanjenju greške u simulacijama. U tekstu su objašnjene i metode određivanja parametara modela, uključujući primjenu Lambert W funkcije i numeričkih pristupa.

U četvrtom poglavlju obrađuje se unapređenje standardnih električnih modela solarnih ćelija kroz različite rasporede otpornika i uvođenje aproksimativnih modela sa tri i četiri diode. U ovom poglavlju naglašava se važnost preciznog matematičkog opisa karakteristika ćelije korišćenjem Lambert W funkcije, što omogućava tačno i brzo određivanje izlazne struje i napona. Takođe, poglavlje ističe ulogu metaheurističkih algoritama u optimizaciji parametara modela.

U **petom poglavlju** obrađuju se optimizacione metode koje se koriste za estimaciju parametara solarnih ćelija, s posebnim fokusom na metaheurističke algoritme. U ovom poglavlju objašnjava se važnost ovih algoritama za efikasno pronalaženje dobrih rješenja u složenim optimizacionim problemima, gdje tradicionalne metode često nisu dovoljno precizne ili su računarski zahtjevne. Detaljno je prikazan ER-WCA, inspirisan prirodnim procesima isparavanja i kondenzacije u vodenom ciklusu. Takođe, razmatra se uloga funkcije srednje kvadratne greške (RMSE) kao kriterijuma za evaluaciju tačnosti modela tokom optimizacije. Opisan je i način na koji ER-WCA simulira tokove vode kroz prirodu (kišne kapi, rijeke, mora) kako bi iterativno poboljšao procjenu parametara solarnih ćelija.

U **šestom poglavlju** predstavljeni su rezultati procjene parametara za različite električne modele solarnih ćelija, uključujući standardni jednodiodni model (SDM), poznate dvodiodne modele (DDM-1 i DDM-2) i predložene ekvivalentne modele sa više dioda. Analiza je sprovedena minimizacijom srednje kvadratne greške (RMSE) koristeći Matlab. Pored toga, u ovom poglavlju se ispituje opravdanost primjene složenijih modela i efikasnost predloženih algoritama za procjenu parametara. Dobijeni rezultati pokazuju da predloženi ekvivalentni modeli sa četiri diode pružaju bolju tačnost u poređenju sa literaturno poznatim modelima, naročito u usklađivanju eksperimentalnih i simulacionih I-U karakteristika. Ovi nalazi ukazuju da standardni modeli nisu jedinstveni, te otvaraju mogućnosti za dalja istraživanja n-diodnih modela solarnih ćelija.

U **zaključku master rada** ističe se da složeniji električni modeli solarnih ćelija sa više dioda (trodiodni i četvorodiodni modeli) daju bolje rezultate u preciznosti i minimizaciji greške u poređenju sa standardnim jednodiodnim modelom i poznatim literaturnim modelima DDM-1 i DDM-2. Takođe, date su smjernice za budući rad.

2. ENERGIJA SUNCA

Sunce predstavlja primarni izvor života na Zemlji, jer njegovo zračenje omogućava opstanak svih vitalnih procesa na planeti. Pored toga što je energija Sunca neiscrpan izvor, njena snaga je neuporedivo veća od svih drugih obnovljivih izvora energije, kao što su hidroenergija, geotermalna energija, energija vjetra, energija biomase pa čak i energija talasa i morskih struja. Sunčevo zračenje ima ključnu ulogu u procesima stvaranja fosilnih goriva, međutim, za ovaj proces je potrebno znatno više vremena u poređenju sa brzinom potrošnje energije tokom pri sagorijevanja u termoelektranama. Zbog toga se danas energija Sunca koristi direktno, u svom izvornom obliku, kroz dva glavna načina:

- Fotonaponska konverzija solarne energije za dobijanje električne energije,
- Toplotna konverzija solarne energije za dobijanje korisne toplote [18].

Konverzija solarne energije ostvaruje se pomoću solarnih ćelija i solarnih kolektora. Solarne ćelije koriste fotonaponski efekat za konverziju solarne energije u električnu energiju, dok solarni termalni kolektori pretvaraju solarnu energiju u korisnu toplotnu energiju. Energija Sunca se prenosi putem elektromagnetnog zračenja, koje je kvantizovano u obliku fotona. Energija jednog fotona izračunava se prema formuli:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad (1)$$

gdje su:

$E[eV]$ – energija fotona,

$h = 6.624 \cdot 10^{-34} Js$ - Planck-ova konstanta,

$\nu[Hz]$ frekvencija kvanta,

$c = 3 \cdot 10^8 m/s$ – brzina svjetlosti i

$\lambda[m]$ – talasna dužina zračenja [19].

Različite talasne dužine elektromagnetnog zračenja posjeduju različite energetske vrijednosti, a energija fotona direktno utiče na strujni tok u solarnoj ćeliji. Sunčana energija se djelimično reflektuje od Zemljine površine nazad u svemir, djelimično je apsorbuje Zemljina površina, ostatak odlazi na proces kruženja vode u prirodi, energije talasa i vjetra, a dio se koristi u procesu fotosinteze. Ukupni energetski potencijal Sunca, odnosno snaga sunčevog zračenja iznosi: $P(S) = L = 3.83 \cdot 10^{26} W$, dok je energija koju prihvata Zemlja sa atmosferom $E(S \rightarrow AZ, Z) = 10^{21} Wh/god$ [20][21].

Iradijacija predstavlja snagu solarnog zračenja koja uključuje sve talasne dužine, iz različitih pravaca, na određenoj površini u jedinici vremena, izražava se u kW/m^2 . Sunčevo

zračenje na granici Zemljine atmosfere naziva se ekstraterestička iradijacija. Procječna godišnja vrijednost ekstraterestičke iradijacije po jedinici površine Zemljine atmosfere koja je okrenuta Suncu iznosi $SC = 1376 \text{ W/m}^2$. Iradijacija Sunca koja stigne do Zemljine površine nakon što prođe kroz atmosferu naziva se terestrička iradijacija. Maksimalna vrijednost terestričke iradijacije na horizontalnoj površini Zemlje iznosi 1000 W/m^2 [22]-[24].

Insolacija je količina energije koja bude apsorbirana na određenoj površini u toku određenog vremena, izražava se u kWh/m^2 [25]. Insolacija zavisi od nagiba površine u odnosu na upadne zrake, od lokacije, doba godine, oblačnosti, vremenskih uslova. Insolacija se računa na satnom i dnevnom nivou, na osnovu čega se računa srednja vrijednost dnevnih insolacija u posmatranom periodu kako bi se dobila srednja dnevna insolacija na godišnjem nivou, kao pokazatelj potencijala posmatranog lokaliteta za potrebe instaliranja fotonaponskih sistema. Od broja sunčanih dana u toku godine zavisi isplativost instaliranja fotonaponskih sistema na lokalitetu [26].

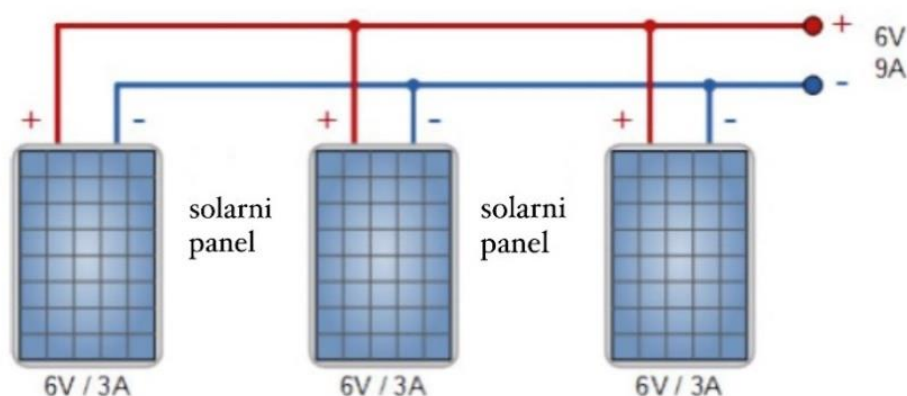
Karakteristike lokaliteta poput nadmorske visine, geografske širine, oblačnosti, maglovitosti, vjetrovitosti i drugih vremenskih prilika koriste se za procjenu izlazne snage fotonaponskog sistema. Pokazuje se da je na višim nadmorskim visinama, zbog lošijih vremenskih uslova, manja insolacija i sunčana energija, a to je slučaj i sa povećavanjem geografske širine. Jedan od ključnih faktora koji utiče na efikasnost fotonaponskih sistema je temperatura fotonaponskih modula. Povećanje temperature modula iznad 25°C dovodi do smanjenja njihove efikasnosti, jer dolazi do opadanja napona zatvorenog kola i struje kratkog spoja modula. Temperatura modula je najviše zavisna od intenziteta Sunčevog zračenja i uslova hlađenja, kao što su vjetar i okolna temperatura [27].

Promjene u Sunčevom zračenju tokom godine dovode do toga da fotonaponski sistem ima nizak faktor iskorišćenja kapaciteta. Kako bi se povećala efikasnost fotonaponskog sistema, ključno je optimizovati orijentaciju panela i postaviti ih pod odgovarajuće nagibne uglove, čime se omogućava maksimalno iskorišćavanje Sunčevog zračenja tokom godine na specifičnoj mikrolokaciji [28]-[31].

Trajanje insolacije zavisi od dotoka Sunčevog zračenja, ali se dio energije gubi u prolaženju kroz atmosferu zbog apsorpcije kiseonika (O_2), ozona (O_3) i ugljen-dioksida (CO_2).

2.1. FOTONAPONSKA KONVERZIJA SOLARNE ENERGIJE

Za proizvodnju električne energije iz Sunčeve energije koriste se solarne ćelije, koje, putem fotonaponskog efekta, direktno pretvaraju solarnu energiju u električnu. Povezivanjem solarnih ćelija formiraju se fotonaponski moduli. Daljim paralelnim i serijskim povezivanjem fotonaponskih modula formiraju se fotonaponski paneli čime se postiže povećanje izlaznog napona i struje (slika 2.1). Fotonaponski sistem se sastoji od panela, invertora, akumulatorskih baterija, zaštitnih uređaja i provodnika, kao i drugih komponenti koje omogućavaju njegovo efikasno povezivanje sa potrošačkim čvorovima i distributivnom mrežom. Na krajevima fotonaponskih panela koji koriste generiše se razlika potencijala u vidu jednosmjernog napona. Kako bi se sistem prilagodio standardnim potrošačkim uređajima, u fotonaponskom sistemu koriste se invertori, uređaji koji konvertuju jednosmjernu struju u naizmjeničnu. Česta komponenta sistema jesu i akumulatorske baterije, koje omogućavaju skladištenje energije za periode kada fotonaponski paneli nisu u mogućnosti da proizvode energiju, kao što su noćnih sati, oblačni dani, ili loših vremenski uslovi. Fotonaponski sistemi mogu klasifikovati u tri osnovne kategorije: autonomni, hibridni i sistemi povezani na distributivnu mrežu.



Slika 2.1 Primjer serijskog i paralelnog spoja fotonaponskih modula¹

2.1.1. Autonomni fotonaponski sistemi

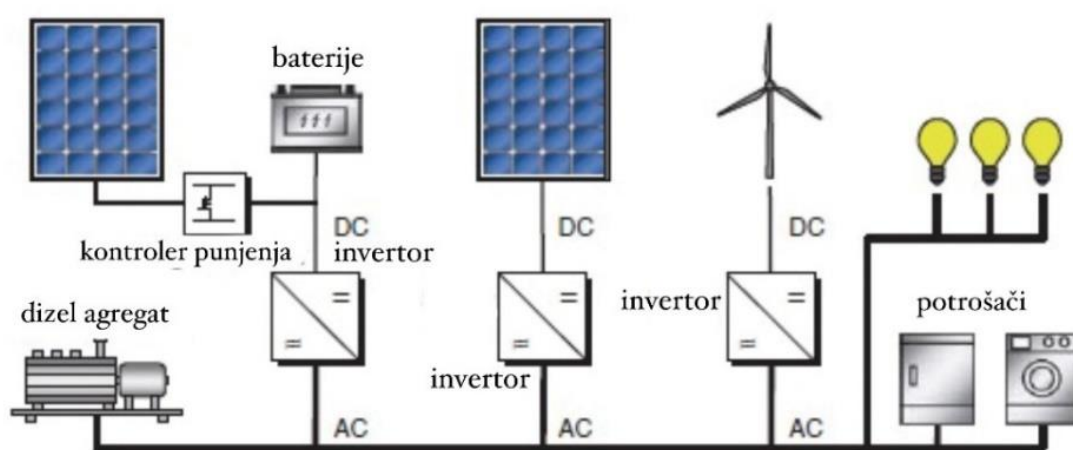
Autonomni fotonaponski sistem najčešće se primjenjuju u izolovanim područjima, kao što su ostrva, ruralni predjeli, udaljena sela, i objekti ili uređaji koji nemaju mogućnost priključenja na distributivnu mrežu. Takođe, koriste se u slučajevima kada bi priključenje na mrežu bilo ekonomski neisplativo zbog visokih troškova distribucije, velikih gubitaka i pada napona u vodovima. Ključna prednost autonomnih sistema je njihova sposobnost snabdijevanja električnom energijom u područjima gdje je proširenje distributivne mreže otežano ili neizvodljivo, čime

¹ M. Hiržin, "Analiza izgradnje i rada autonomne fotonaponske elektrane", Završni rad br. 491/EL/2021

omogućavaju poboljšanje kvaliteta života ili rada u nepristupačnim lokacijama. Ovi sistemi zahtijevaju upotrebu akumulatorskih baterija, koje omogućavaju skladištenje proizvedene energije i njeno korišćenje teokom perioda kada fotonaponski paneli ne proizvode struju. Punjenje baterija se vrši kroz sam sistem, u periodima kada je proizvodnja energije veća od trenutne potrošnje, čime se obezbeđuje snabdijevanje u periodima bez proizvodnje. Iako baterije pružaju dodatnu sigurnost u radu autonomnog sistema, njihov značajan nedostatak je što podižu cijenu sistema, dok je njihov životni vijek ograničen, što predstavlja jednu od glavnih mana ovih sistema. Na godišnjem nivou, efikasnost autonomni sistema zavisi od lokacije i broja sunčanih dana, ali obično imaju nižu iskoristivost instalisanog kapaciteta [32].

2.1.2. Hibridni fotonaponski sistemi

Hibridni fotonaponski sistemi pružaju veću sigurnost u snabdijevanju energijom u poređenju sa autonomnim sistemima, a koriste se u sličnim uslovima, odnosno za napajanje potrošača koji nisu povezani na distributivnu mrežu (slika 2.2). Pored fotonaponskog dijela sistema i akumulacionih baterija, hibridni sistemi uključuj i dodatne izvore energije, kao što su vjetroturbine, hidroagregata ili agregata na dizel ili benzin. Ovi agregati se aktiviraju u periodima kada fotonaponski sistem ne proizvodi energiju, a kapacitet baterija bude iscrpljen. Tokom rada, agregati ne samo da obezbeđuju potrebnu električnu energiju za potrošače, već i pune baterije, čime se omogućava da baterije preuzmu funkciju napajanja i snabdijevanja potrošnje do sledeće proizvodnje putem fotonaponskog sistema. Na ovaj način, hibridni sistemi obezbeđuju stabilnije napajanje i veću fleksibilnost u odnosu na autonomne sisteme, čineći ih pogodnim za primjene u udaljenim ili izolovanim područjima.



Slika 2.2 Hibridni fotonaponski sistemi ²

² Solanki, C.S. "Solar Photovoltaics: Fundamentals, Technologies and applications", 3rd ed. New Delhi: McGraw Hill Education.

2.1.3. Fotonaponski sistemi povezani na distributivnu mrežu

Veliki fotonaponski sistemi koji proizvode energiju u rasponu od nekoliko kW do MW, mogu biti korišćeni za snabdijevanje lokalizovanih potrošačkih područja, dok su istovremeno povezani na distributivnu mrežu (slika 2.3). Ovi sistemi omogućavaju da se proizvedena električna energija isporučuje potrošačima, dok se višak energije predaje u distributivnu mrežu. Na ovaj način, tokom perioda kada fotonaponski sistem ne proizvodi energiju, poput noćnih sati ili oblačnih dana, potrošači se snabdijevaju energijom iz mreže. Veći fotonaponski sistemi mogu koristiti centralizovani ili više invertora za konvertovanje jednosmjerne energije u naizmjeničnu, koja je kompatibilna sa standardnim potrošačkim uređajima. Ovakvi sistemi su pouzdani, a njihove glavne komponente su fotonaponski moduli, invertori, zaštitni uređaji, prekidači i osigurači, koji omogućavaju sigurno povezivanje sistema sa glavnim mjernim ormarom kod krajnjih korisnika. Da bi se precizno pratila razmjena energije između fotonaponskog sistema i distributivne mreže koriste se dvosmjerna brojila. U uslovima liberalizovanog tržišta električne energije, može biti isplativo koristiti i akumulacione baterije, za skladištenje viška energije, kako bi se optimizovala potrošnja u periodima kada cijena energije na tržištu poraste [33].

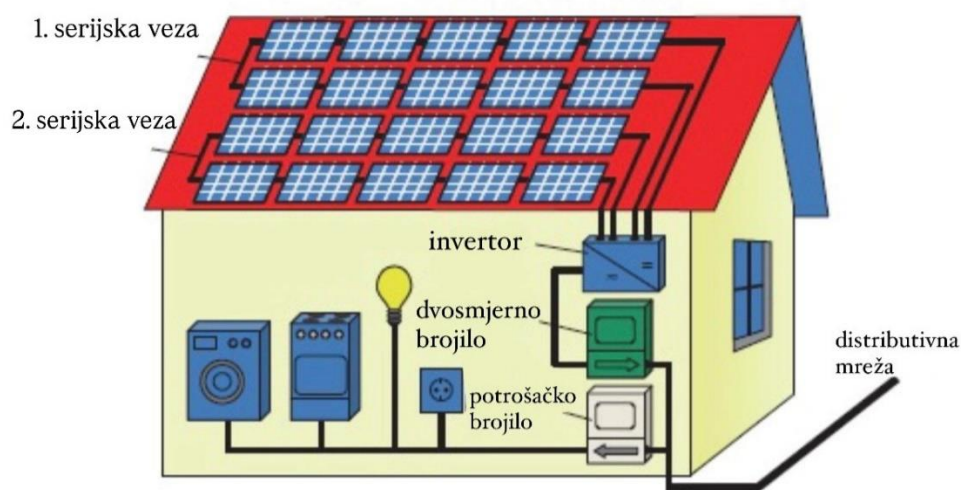


Slika 2.3 Mrežni fotonaponski sistemi ³

³ Solanki, C.S. "Solar Photovoltaics: Fundamentals, Technologies and applications", 3rd ed. New Delhi: McGraw Hill Education.

2.1.4. Fotonaponski sistemi integrisani u krovove zgrada

Zahvaljujući povoljnim cijenama i subvencijama koje u Evropi nude za instalaciju solarnih panela na krovovima zgrada, ova tehnologija je postala široko primjenljiva i u Crnoj Gori. Krovovi zgrada i kuća, koji često ostaju neiskorišćeni, sada se koriste za postavljanje solarnih sistema, kako za fotonaponsku, tako i za toplotnu konverziju solarne energije (slika 2.4). Svaki osunčan prostor koji nije u upotrebi predstavlja potencijal za instalaciju fotonaponskih sistema. Takođe, s obzirom na sve veću upotrebu vozila, objekti kao što su autobuska stajališta, parkirališta i nadstrešnice, mogu biti iskorišćeni za postavljanje solarnih panela i generisanje energije. Osim što proizvode energiju za lokalne kućne potrošače, fotonaponski sistemi se mogu koristiti i za punjenje baterija električnih vozila [34].



Slika 2.4 Fotonaponski sistem on-grid, instalisan na krovu kuće ⁴

2.1.5. Plivajuće fotonaponske elektrane

Plivajuće fotonaponske elektrane instaliraju se najčešće na jezerima ili iznad vode u rezervoarima, gdje su uslovi za stabilnost i smanjenu dinamiku vode povoljniji, a talasi minimalni. Ove elektrane imaju veću efikasnost u odnosu na kopnene sisteme, prvenstveno zbog niže temperature, koja je rezultat kontakta sa vodom. Moduli koji se koriste za građenje panela su identični su onima koji se koriste kod kopnenih sistema. Paneli se postavljaju na specijalizovanim nosačima, a između njih se postavljaju staze koje omogućavaju lakši pristup i održavanje instalacija.

⁴ Solanki, C.S. "Solar Photovoltaics: Fundamentals, Technologies and applications", 3rd ed. New Delhi: McGraw Hill Education.

2.1.6. Predosti i nedostaci fotonaponskih sistema

Karakteristike kojima se izdvajaju fotonaponski sistemi među drugim obnovljivim izvorima energije su pouzdanost sistema, ekološka prihvatljivost, besplatna energija Sunca, minimalni troškovi održavanja, jednostavan transport, lokalna proizvodnja, fleksibilnost sistema, dobar uticaj na naponske prilike i smanjivanje gubitaka u sistemu. Fotonaponski moduli, bez pokretnih dijelova, imaju vijek trajanja od 23-30 godina. Ovi sistemi ne koriste gorivo, rijetko se kvare, i ne zahtijevaju stalno održavanje, što ih čini pogodnim za izolovana područja. Važan aspekt kojim se fotonaponski sistemi izdvajaju jeste to što ne proizvode emisiju štetnih materija i predstavljaju nečujan izvor energije. Instalirani na krovovima ili kao stakleni zidovi, fotonaponski sistemi obavljaju i građevinsku ulogu, ne zauzimajući korisne površine. Sistemi se mogu prilagoditi potrebama korisnika i lako proširivati prema finansijskim i energetskeim zahtjevima.

Kao glavni nedostak fotonaponskih sistema izvaja se fluktuacija proizvodnje, odnosno zavisnost proizvodnje električne energije od vremenskih prilika. Fotonaponski sistemi ne proizvode energiju noću, oblačnost smanjuje izlaznu snagu koja zavisi i od sunčevog zračenja. Velike instalacije zahtijevaju velike površine, zbog čega se izbjegava postavljanje sistema na plodnom zemljištu. Ovi sistemi mogu uticati na kvalitet električne energije izazivajući harmonijska izobličenja.

2.2. TOPLOTNA KONVERZIJA SOLARNE ENERGIJE

Solarno zračenje se koristi za generisanje električne energije, dobijanje vodene pare za potrebe industrije i termotehnike, zagrijavanje sanitarne vode, uključujući i prečišćavanje vode. S obzirom na temperaturne zahtjeve u termičkim procesima, toplotna energija solarnog zračenja se koristi u različitim temperaturnim opsezima, od zagrijavanja vode i prostorija do proizvodnje električne i mehaničke energije. Za niže temperature do 150°C koristi se za domaćinstva i industriju, dok za više temperature, od 150°C do 5000°C, omogućava proizvodnju energije i napajanje solarnih peći za tretman materijala. Za procese iznad 100°C potrebno je koristiti sisteme sa optičkim ogledalima i sočivima za koncentrisanje sunčevog zračenja. Najčešće korišćena tehnologija za pretvaranje sunčeve energije u toplotu su solarni termalni kolektori, koji koriste efekat staklene bašte [35]. Ovi kolektori pretvaraju sunčevo zračenje u toplotnu energiju, a efikasnost im je veća u odnosu na fotonaponske sisteme.

2.2.1. Solarne termalne elektrane

Solarne termalne elektrane proizvode električnu energiju na sličan način kao konvencionalne termoelektrane, ali umjesto kotlova na ugalj ili nuklearnih reaktora koriste sunčevo zračenje kao izvor toplote, što ih čini obnovljivim izvorima energije. Sunčevi zraci se

koncentrišu pomoću velikih ogledala ili sočiva ka prijemniku, gdje se toplota prenosi na radni fluid. Ovaj fluid se koristi za stvaranje vodene pare koja pokreće turbinu i sinhroni generator koji proizvodi električnu energiju. Efikasnost solarnih termalnih elektrana u konverziji sunčeve energije u električnu energiju kreće se između 15-30%, što je veće od efikasnosti fotonaponskih sistema. Zbog visokih temperatura koje su potrebne, gotovo sve solarne termalne elektrane koriste kolektore sa optičkim ogledalima ili sočivima za koncentraciju sunčevog zračenja. Takođe, kako bi kolektori pratili promjenljiv položaj sunca, neophodno je koristiti mehanizme za automatsko podešavanje njihove orijentacije.

2.2.2. Solarno – termalni sistemi

Solarno termalni sistemi koriste energiju sunčevog zračenja za zagrijavanje vode, što omogućava ekološki prihvatljivo i energetski efikasno snabdijevanje tople vode za različite potrebe u domaćinstvima, kao što su pranje veša i suđa, kao i za rad električnih bojlera. Umjesto korišćenja električnih grijača za zagrijavanje hladne vode na visoke temperature, ovaj sistem omogućava grijanje vode putem solarnih kolektora na krovovima objekata. Električni grijači bi se koristili samo za dogrijavanje vode, čima bi se značajno smanjila potrošnja električne energije [36].

3. FOTONAPONSKA ČELIJA

U elektroenergetskim sistemima koriste se tehnologije u kojima se vrše različite međukonverzije energije kako bi se kao krajnji oblik dobila električna energija. Za transformisanje energije koriste se primarni izvori koji se dijele na nosioce hemijske, potencijalne, nuklearne, kinetičke, toplotne energije i energije zračenja. Među primarnim oblicima energije postoje razlike u pogledu tehno-ekonomske isplativosti korišćenja. Procesi dobijanja električne energije dešavaju se sagorijevanjem goriva, pretvaranjem unutrašnje toplotne energije u mehaničku energiju, nuklearnim reakcijama ili turbinskim transformacijama. Kod fotonaponske konverzije, električna energija se dobija direktnom konverzijom solarnog zračenja u električnu energiju, korišćenjem solarnih ćelija kao osnovnih komponenti ovih sistema. Materijali koji se koriste u solarnim ćelijama su poluprovodnici, nazivaju se fotonaponski materijali ili fotovoltaici, a među njima je najznačajniji i najčešće korišćen materijal – silicijum [37].

3.1. FOTONAPONSKI EFEKAT

Krajem 19. vijeka znalo se za pojavu fotoelektričnog efekta. Ovu pojavu je otkrio Herc 1998. godine, objasnio ga je Ajnštajn 1905. godine, koristeći kvantnu teoriju svjetlosti, za šta je dobio Nobelovu nagradu 1921. godine. Spoljašnji fotoelektrični efekat je pojava da zahvaljujući elektromagnetnom zračenju koje pada na neku podlogu, iz te podloge izlaze elektroni, kada imaju dovoljno energije da napuste površinu materijala. Elektromagnetno zračenje prenosi se kao talas ili čestica, a čestice koje ga kvantifikuju su fotoni. Spektar elektromagnetnog zračenja obuhvata opsege različitih talasnih dužina, od kojih zavisi energija fotona. Sunčeva energija se može pretvoriti u električnu energiju zahvaljujući fotonaponskom efektu koji je otkrio francuski naučnik Edmund Becquerel. Kada fotoni udare u solarnu ćeliju, poluprovodnički p-n spojni uređaj, mogu se reflektovati ili apsorbovati, ili mogu proći kroz ćeliju. Apsorpcija fotona dovodi do stvaranja para elektron-šupljina. Kada se elektroni razdvoje od šupljina dopiranjem poluprovodničkog materijala, elektrostatičkim poljem u p-n spoju, kao rezultat se dobija napon na krajevima solarne ćelije. Ovaj napon može generisati struju u kolu, kada se sistem spoji sa spoljim kolom [38].

3.1.1. Fotonaponski materijali za izradu solarnih ćelija

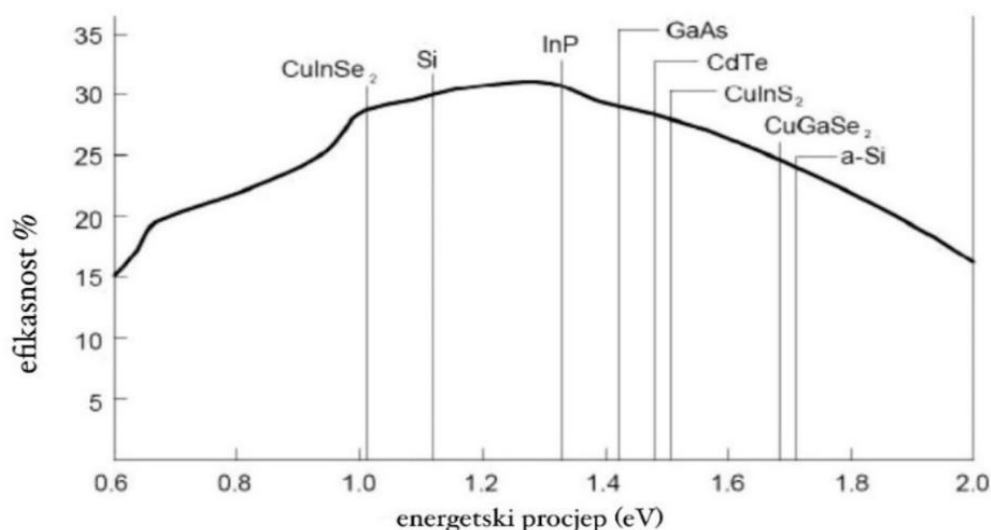
Solarne ćelije se mogu proizvesti od brojnih poluprovodničkih materijala, od kojih je najčešće korišćen, i najzastupljeniji na Zemlji, silicijum (Si) – kristalni, polukristalni i amorfni. Solarne ćelije se takođe proizvode od GaAs, GaInP, CuGaSe₂, u kojima je germanijum dominantan element. Silicijum i germanijum, kao najčešće korišćeni elementi, nalaze se u IV grupi periodnog sistema elemenata, što znači da imaju četiri valentna elektrona koji mogu stvarati kovalentne veze

sa susjednim atomima. U kristalnom silicijumu, atomi su raspoređeni u dijamantsku rešetku sa tetraedarskom vezom – četiri veze od svakog atoma gdje je ugao između bilo koje dvije veze $109,5^\circ$. Kada se u kristalnom silicijumu, kao čvrtstom materijalu, nađe više atoma jedan do drugog, njihovi elektroni zauzimaju određene energetske zone. Da bi elektron napustio valentnu zonu atoma silicijuma, i prešao u višu, provodnu zonu, potrebno je da preskoči razmak između ove dvije zone, koji se zove zabranjena zona ili energetska barijera (E_g). Veličina energetske barijere određuje koliko energije je potrebno da elektron pređe u provodnu zonu. Kod silicijuma, energetska barijera iznosi $1,12\text{eV}$, što znači da kvant svjetlosti (foton) mora imati najmanje toliku energiju da bi izbacio elektron iz valentne zone. Energija fotona zavisi od njegove talasne dužine, pa samo određeni dio sunčevog spektra može da postigne izbacivanje elektrona iz valentne zone, na čijem mjestu ostaje pozitivna šupljina.

Silicijum je uobičajen element za proizvodnju solarnih ćelija, zbog činjenice da se njegove karakteristike apsorpcije prilično dobro poklapaju sa solarnim spektrom, a tehnologija proizvodnje silicijuma je dobro razvijena kao rezultat njegove iskoristivosti u industriji poluprovodničke elektronike. Efikasnost solarne ćelije zavisi od procesa apsorpcije fotona i razdvajanja elektrona od atoma poluprovodničkog materijala, ali i od brojnih drugih faktora poput gubitaka energije usljed unutrašnjih otpornosti i refleksije svjetlosti. Analiziranjem spektra solarnog zračenja, može se doći do preciznijih informacija o efikasnosti solarnih ćelija. U laboratorijama, maksimalna efikasnost monokristalnog silicijuma dostiže oko $25,8\%$, dok komercijalne ćelije dostižu oko 20% (slika 3.1). Ako je energetska barijera manja, elektronima je lakše da pređu u provodnu zonu, ali to smanjuje napon ćelije. Suprotno tome, veća barijera znači da manji broj fotona ima dovoljnu energiju za oslobađanje elektrona, što smanjuje generisanu struju. Idealna vrijednost energetske barijere za fotonaponske materijale kreće se između 1.4eV i 1.6eV , jer upravo u tom opsegu solarna ćelija postiže najbolju ravnotežu između struje i napona, a samim tim i veću efikasnost [39]-[41].

Tabela I - Energetske barijere poluprovodnika i odgovarajuće talasne dužine fotona

Poluprovodnik	Talasna dužina fotona (μm)	Energetska barijera (eV)
Si	1.11	1.12
GaAs	0.87	1.42
CdTe	0.83	1.5
InP	0.92	1.35



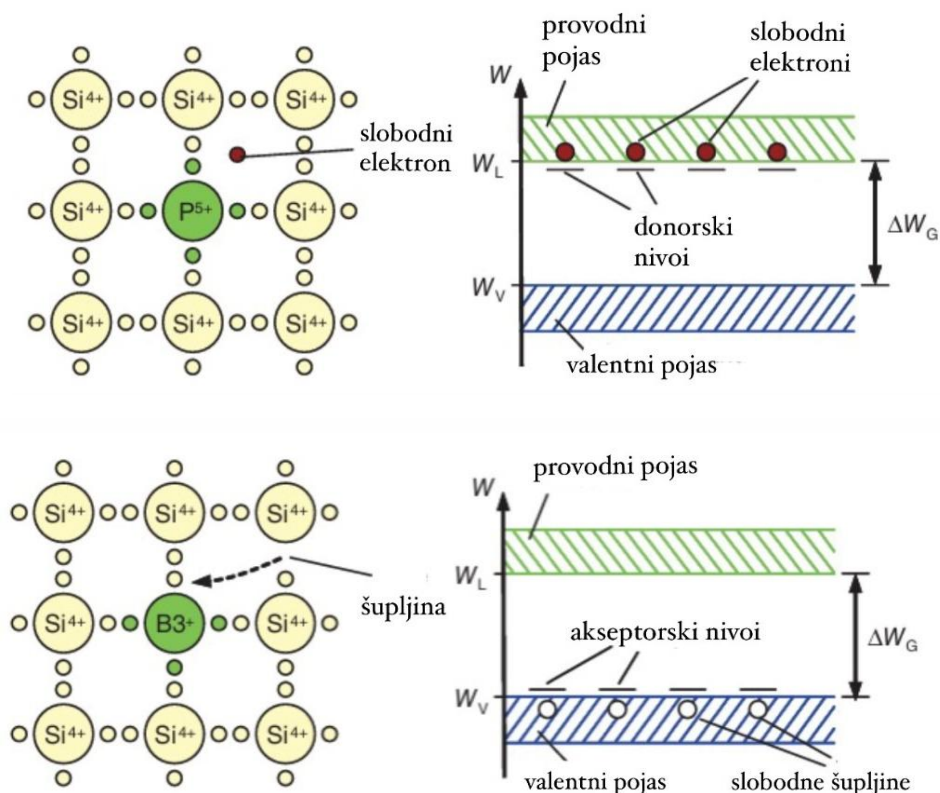
Slika 3.1 Zavisnost efikasnosti fotonaponske konverzije od veličine energetske barijere fotonaponskog materijala⁵

3.1.2. Formiranje P-N spoja

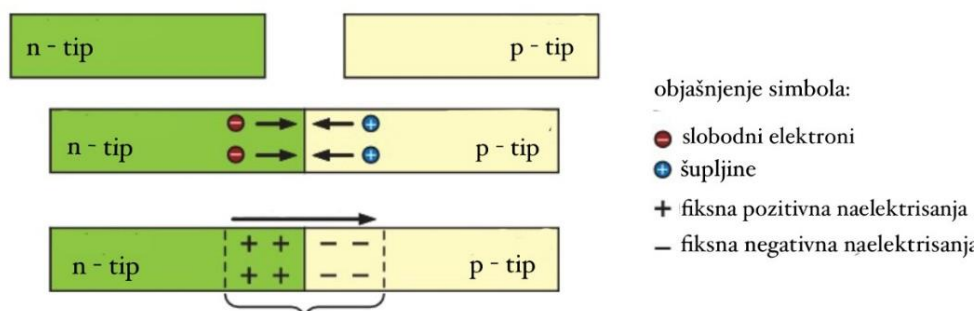
Pod dejstvom elektromagnetnog zračenja, u poluprovodničkom materijalu dolazi do izbijanja elektrona iz valentne zone, što predstavlja osnovu fotoelektričnog efekta. Oslobođanjem elektrona nastaje šupljina na mjestu koje je elektron napustio. Proces razdvajanja elektrona se dešava u svim atomima čvrstog poluprovodnika, i počinje njihovo kretanje u materijalu. Proces generisanja parova elektron-šupljina odvija se u čitavom volumenu čvrstog poluprovodnika. Tokom kretanja elektrona i šupljina dolazi do rekombinacije, kada elektron zauzima slobodno mjesto u valentnoj zoni drugog atoma. Ovaj proces bi, u nedostatku unutrašnjeg električnog polja, rezultirao nasumičnim kretanjem nosilaca naelektrisanja, bez postizanja korisnog električnog napona [42]. Da bi se uspostavio red u kretanju nosilaca naelektrisanja i ostvario fotonaponski efekat, potrebno je formirati *p-n* spoj unutar poluprovodničkog materijala. S obzirom da se solarne ćelije pretežno izrađuju od silicijuma i germanijuma, koji pripadaju IV grupi periodnog sistema elemenata, ovaj spoj se formira procesom dopiranja. Dopiranje podrazumijeva uvođenje elemenata iz III i IV grupe periodnog sistema, pri čemu se najčešće koriste bor i fosfor [43]. Silicijum sa četiri valentna elektrona, gradi kovalentne veze sa susjednim atomima silicijuma. Kada se u kristalnu rešetku silicijuma ugradi atom bora iz III grupe, koji posjeduje tri valentna elektrona, dolazi do stvaranja kovalentnih veza, ali ostaje jedna šupljina – slobodno mjesto za elektron. Bor u ovom slučaju djeluje kao akceptor elektrona i poluprovodnik postaje p-tipa. S druge strane, kada se silicijum dopira fosforom iz V grupe, koji ima pet valentnih elektrona, četiri elektrona učestvuju u stvaranju kovalentnih veza, dok jedan elektron ostaje slobodan za provodljivost. Fosfor u ovom slučaju funkcioniše kao donator, a poluprovodnik postaje n-tipa (slika 3.2). Kombinovanjem ovih

⁵ I. M. Babić, "Modelovanje uticaja vremenskog profila solarnog zračenja na efekte rada fotonaponskih sistema u elektroenergetskom sistemu", Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, 2016.

slojeva formira se p - n spoj koji stvara unutrašnje električno polje neophodno za odvijanje fotonaponskog efekta, koje se još naziva osiromašena zona ili prostorni tovar (slika 3.3) [44]. Na krajevima poluprovodničkog materijala sa p - n spojem formira se razlika električnog potencijala, pri čemu p - n spoj funkcioniše kao direktno polarizovana poluprovodnička dioda. Ukoliko se spoljašnji napon primijeni na krajeve spoja, uspostavlja se električna struja kroz diodu. Kada je p - n spoj izložen svjetlosnom zračenju, dolazi do apsorpcije fotona i generisanja dodatnih parova elektron-šupljina u oblasti prostornog tovara. Unutrašnje električno polje ovog sloja usmjerava elektrone ka n -strani, a šupljine ka p -strani poluprovodnika. Na taj način na spoljnim kontaktima poluprovodničkog materijala formira se napon, suprotno orjentisan u odnosu na unutrašnje polje prostornog tovara. Kada je električno kolo otvoreno, tj. u stanju praznog hoda, a p - n spoj osvijetljen, napon na krajevima spoja raste sve dok ne dostigne vrijednost dovoljnu da poništi unutrašnje električno polje prostornog tovara. U tom trenutku, stvaranje dodatnih nosilaca naelektrisanja se zaustavlja, a višak apsorbovane energije dovodi do zagrijavanja materijala.



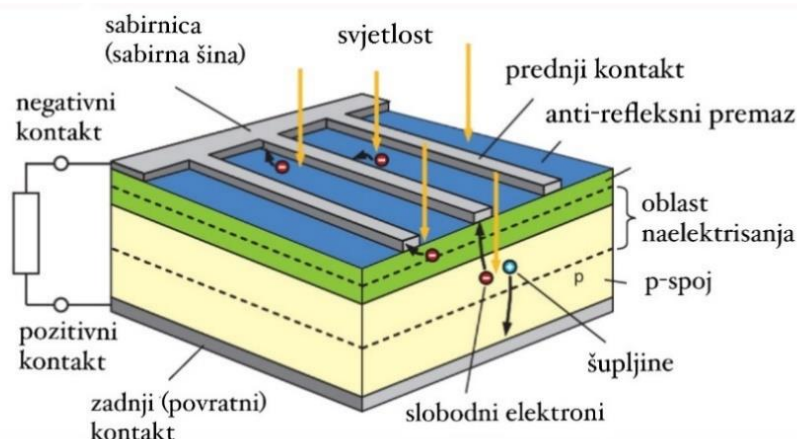
Slika 3.2 Dopiranje silicijumskog kristala atomima fosfora i bora, jedan od elektrona fosfora nije neophodan za kovalentnu vezu i s toga je slobodan elektron, atom bora nudi tri valentna elektrona i generiše šupljinu



Slika 3.3 p-n spoj, u prostornom tovaru na p-strani ostaju fiksni elektroni, a na n-strani ostaju fiksna pozitivna naelektrisanja⁶

3.1.3. Jednodiodni model solarne ćelije

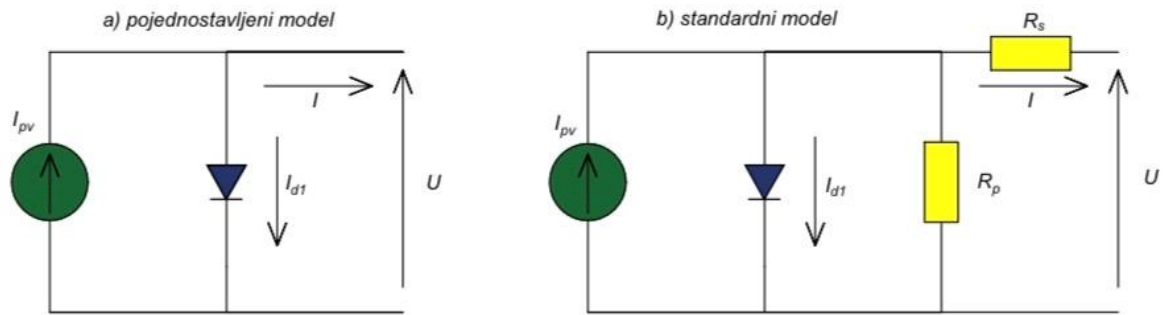
Na donjoj strani p-tipskog sloja nalazi se metalna elektroda u obliku pune provodne ploče, čija je funkcija da obezbijedi kvalitetnu električnu povezanost sa spoljnim kolom. Gornji kontakt, postavljen na n-tipski sloj, formiran je u obliku tanke rešetke ili sistema uskih metalnih traka, kako bi se omogućio što veći protok zračenja do samog *p-n* spoja. Gornja površina ćelije prekrivena je antirefleksnim slojem koji smanjuje refleksiju svjetlosti i povećava stepen apsorpcije sunčevog zračenja u poluprovodniku (slika 3.4). Fotonaponska ćelija se može modelovati jednostavnom ekvivalentnom šemom, koja se sastoji od realne diode i idealnog strujnog izvora, pri čemu izvor struje predstavlja fotogenerisanu struju, dok dioda opisuje rekombinacione procese i unutrašnje gubitke u strukturi ćelije. Opisano kolo se naziva pojednostavljenim ekvivalentnim kolom solarne ćelije, jer samo približno opisuje ponašanje solarnih ćelija. Da bi se uvažila struja “curenja” u *p-n* spoju, usled rekombinacije elektrona i šupljina, i otpornost kontaktnih otpora ćelije i provodnika spoljašnjeg kola, pojednostavljeni model solarne ćelije se usložnjava i nastaje kompletna zamjenska šema, odnosno standardni jednodiodni model solarne ćelije (slika 3.5).



Slika 3.4 Tipična silicijumska solarna ćelija⁷

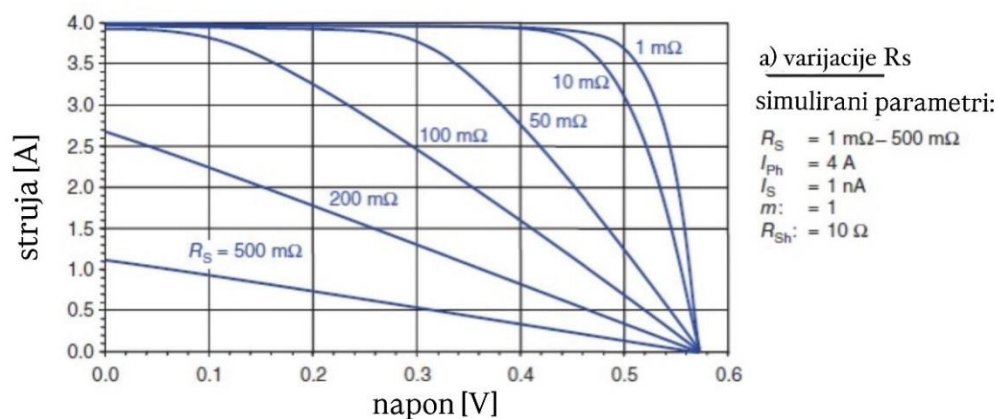
⁶ Izvor za obje slike (3.2 i 3.3): Solanki, C.S. “Solar Photovoltaics: Fundamentals, Technologies and applications”, 3rd ed. New Delhi: McGraw Hill Education.

⁷ Solanki, C.S. “Solar Photovoltaics: Fundamentals, Technologies and applications”, 3rd ed. New Delhi: McGraw Hill Education.



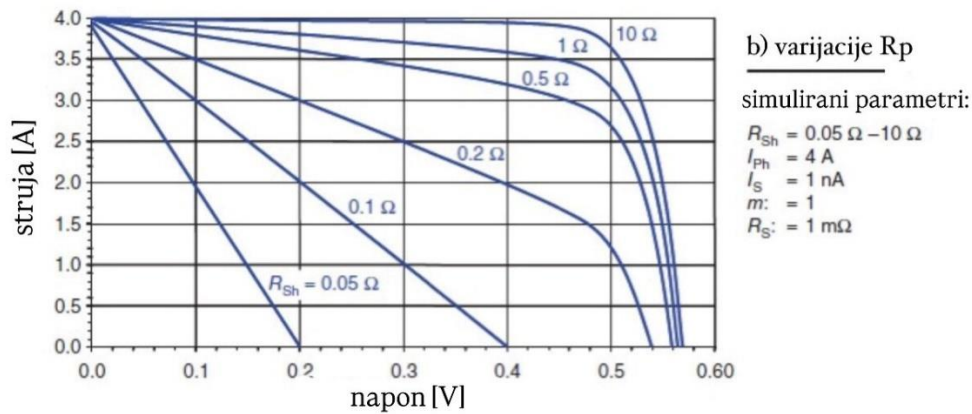
Slika 3.5 Pojednostavljeni i standardno jednodiodno kolo solarnih ćelija

Serijski otpor R_s posebno opisuje omske gubitke u prednjim kontaktima solarne ćelije i na interfejsu metal-provodnik (slika 3.6). Nasuprot tome, struje curenja na ivicama solarne ćelije kao i kratki spojevi bilo koje tačke $p-n$ spoja su modelovani otporom šanta R_p (slika 3.7). Dva karakteristična režima rada solarne ćelije su: režim kratkog spoja i režim otvorenog kola. U režimu kratkog spoja, kada su priključci ćelije kratko spojeni, kroz ćeliju teče struja kratkog spoja (I_{ks}). Ova struja je direktno povezana sa intenzitetom sunčevog zračenja, jer idealni strujni izvor daje struju koja je proporcionalna zračenju. U ovom režimu svi fotogenerisani elektroni, koji su razdvojeni uticajem električnog polja prostornog tovara, prolaze kroz kratkospojeni spoljašnji krug. Pošto je napon kratkog spoja jednak nuli, nema nagomilavanja naelektrisanja na krajevima ćelije. S druge strane, režim otvorenog kola nastaje kada su priključci ćelije otvoreni i napon na priključcima postaje napon otvorenog kola (U_{ok}). U ovom režimu, broj fotogenerisanih naelektrisanja koji nastaju u jedinici vremena jednak je broju rekombinovanih naelektrisanja. Stoga, generisana struja odgovara struji koja teče kroz $p-n$ spoj diode, koja je u ovom režimu direktno polarizovana, dok je napon jednak naponu provođenja diode.



Slika 3.6 Uticaj redne otpornosti na I-U karakteristiku solarne ćelije ⁸

⁸ Solanki, C.S. "Solar Photovoltaics: Fundamentals, Technologies and applications", 3rd ed. New Delhi: McGraw Hill Education.



Slika 3.7 Uticaj paralelne otpornosti na I-U karakteristiku solarne ćelije

Struja na priključima solarne ćelije u funkciji napona opisuje se jednačinom:

$$I = I_{pv} - I_0 \left(e^{\frac{U+RsI}{nVt}} - 1 \right) - \frac{U+RsI}{R_p} , \quad (2)$$

gdje je:

n - faktori idealnosti diode,

I_0 - struja zasićenja diode,

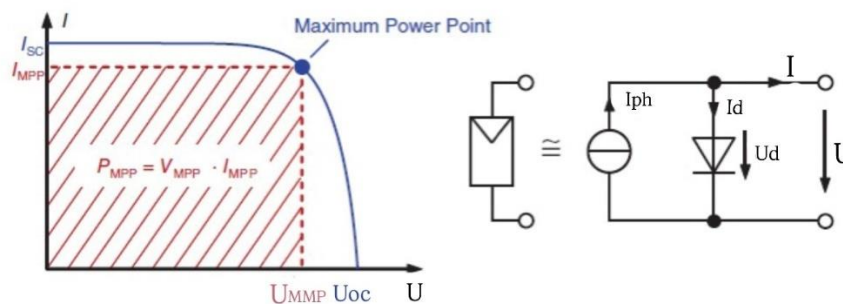
$Vt = kT/q$ – termički napon,

$k = 1.3806505 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ Bolcmanova konstanta,

$q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ naelektrisanje elektrona i

T - temperature sredine.

Za bolje modelovanje stvarne krive solarnih ćelija uvodi se faktor idealnosti diode (n), čija vrijednost se obično kreće između 1 i 2. Tipična karakteristična kriva solarne ćelije, odgovara ekvivalentnom kolu standardnog jednodiodnog modela solarne ćelije (slika 3.8).



Slika 3.8 Karakteristična kriva solarne ćelije i njenog pojednostavljenog ekvivalentnog kola⁹

⁹ Isti izvor za obje slike (3.7 i 3.8): Solanki, C.S. “Solar Photovoltaics: Fundamentals, Technologies and applications”, 3rd ed. New Delhi: McGraw Hill Education.

Solarna ćelija obezbeđuje različitu iznaznu snagu u zavisnosti od stvarne radne tačke u kojoj radi. Radna tačka u kojoj se obezbeđuje maksimalna snaga naziva se tačka maksimalne snage (MPP). Kako snaga radne tačke odgovara površini U-I, ova površina mora biti maksimalna u slučaju MPP.

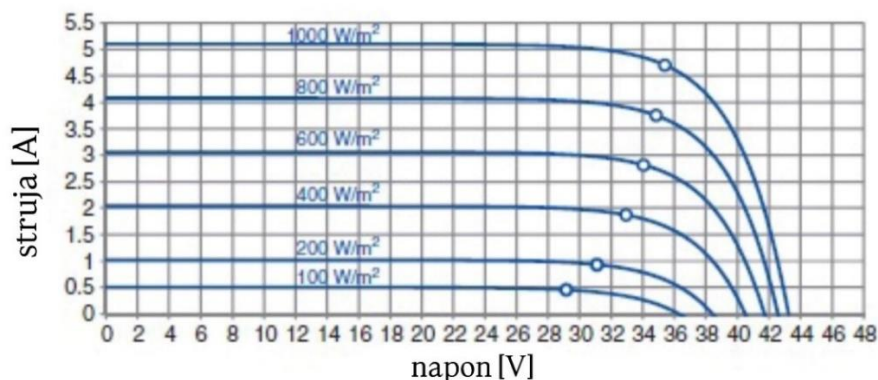
3.2. UTICAJ SOLARNE IRADIJANSE I TEMPERATURE NA STRUJNO-NAPONSKU KARAKTERISTIKU FOTONAPONSKE ĆELIJE

Solarna iradijansa definisana kao snaga sunčevog zračenja koja pada na jedinicu površine, ima direktan uticaj na radne karakteristike solarne ćelije. Prije svega, povećanje iradijanse dovodi do povećanja fotogenerisane struje, s obzirom da veća količina fotona dolazi u interakciju sa poluprovodničkim materijalom, čime se generiše veći broj parova elektron-šupljina. Nasuprot tome, promjene u iradijansi imaju znatno manji uticaj na napon na krajevima solarne ćelije (slika 3.9). Zavisnost struje kratkog spoja od sunčevog zračenja se analizira uzimajući u obzir spektralni fluks fotona i kvantnu efikasnost ćelije. Spektralni fluks fotona definiše se na osnovu spektralne raspodjele upadnog zračenja $P_{A,\lambda}$, i energije fotona E_γ :

$$\phi = \int_0^\infty P_{A,\lambda} \cdot \frac{\lambda}{hc} d\lambda \quad (3)$$

Spoljašnja kvantna efikasnost EQE_λ opisuje koliki procenat fotona određene talasne dužine učestvuje u stvaranju fotonaponske struje. Kod silicijumskih fotonaponskih ćelija, značajan pad kvantne efikasnosti nastupa za talasne dužine oko 1.11 μm . Ovaj prag direktno proizilazi iz energetske barijere silicijuma, jer fotoni sa talasnim dužinama većim od 1.11 μm nemaju dovoljnu energiju za pobuđivanje elektrona iz valentne u provodnu zonu. Gustina struje kratkog spoja J_{ks} računa se integracijom spektralne gustine struje kratkog spoja po čitavom spektru sunčevog zračenja:

$$J_{ks} = q \int_0^\infty \phi_\lambda \cdot EQE \cdot d\lambda \quad (4)$$



Slika 3.9 Uticaj solarne iradijanse na I-U karakteristiku solarne ćelije ¹⁰

¹⁰ Solanki, C.S. "Solar Photovoltaics: Fundamentals, Technologies and applications", 3rd ed. New Delhi: McGraw Hill Education.

Pored solarne iradijance, temperatura fotonaponske ćelije predstavlja jedan od ključnih faktora koji utiču na njene radne karakteristike. Porast temperature poluprovodnika sa sobom nosi povećanje toplotnog kretanja elektrona ugrađenih u kristalnu rešetku. U ovom slučaju, sve više elektrona se pobuđuje i pomjera u provodni pojas, i raste koncentracija unutrašnjih nosilaca naelektrisanja. Veća koncentracija nosilaca naelektrisanja dovodi do povećanja struje. Energija elektrona raste, a smanjuje se energetska barijera između provodne i valentne zone. U ovom slučaju, povećana struja zasićenja dovodi do smanjenja napona otvorenog kola. Dakle, pri većim temperaturama, manja je energetska barijera, tako da je za istu iradijansu neznatno veća fotogenerisana struja, ali značajno manji napon otvorenog kola (slika 3.10). Napon otvorenog kola u funkciji temperature računa se prema formuli:

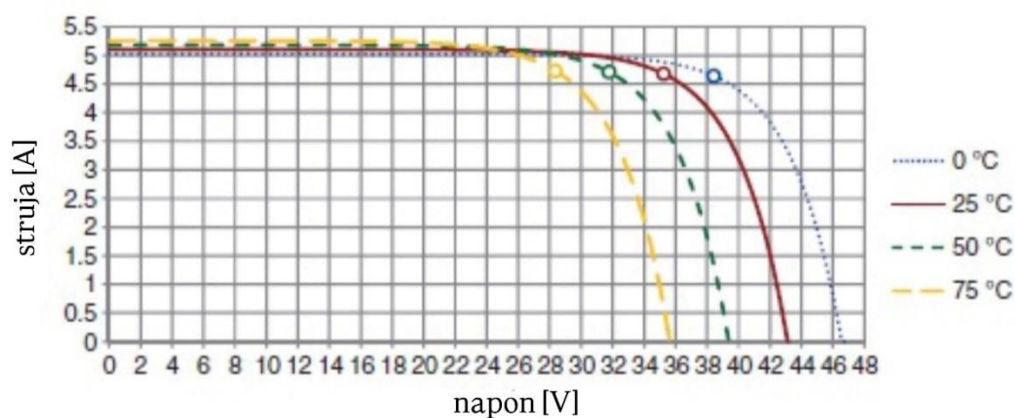
$$U_{ok} = \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_{ks}}{c_0 T^3 e^{\frac{E_g}{kT}}} + 1\right), \quad (5)$$

gdje je:

c_0 - konstanta proporcionalnosti,

T – temperatura fotonaponske ćelije i

E_g – energetska barijera.



Slika 3.10 Uticaj temperature na I-U karakteristiku solarne ćelije¹¹

¹¹ Solanki, C.S. "Solar Photovoltaics: Fundamentals, Technologies and applications", 3rd ed. New Delhi: McGraw Hill Education.

4. STANDARDNA KOLA SOLARNIH ČELIJA SDM, DDM I TDM

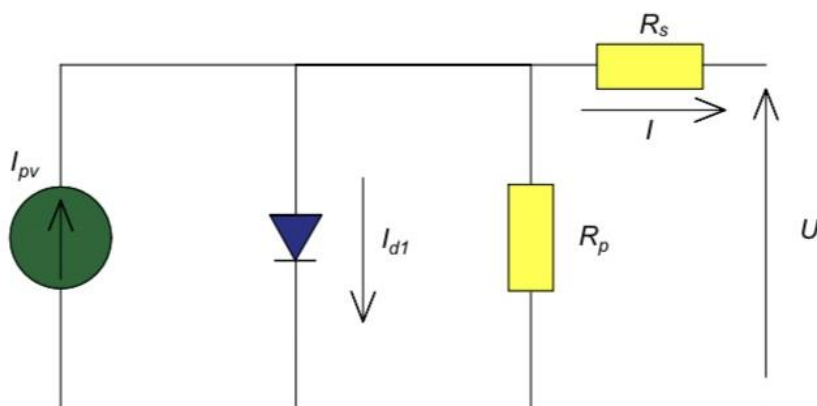
Prilikom analize i modelovanja karakteristika solarnih ćelija, koriste se strujna kola koja omogućavaju matematički opis $I-U$ karakteristike. Osnovni model je jednodiodni model, koji pretpostavlja da je fotonaponska ćelija idealna $p-n$ dioda, u seriji sa otpornikom R_s , i paralelnim otpornikom R_p . Međutim ovaj model ne može u potpunosti objasniti realne gubitke u ćeliji. U fotonaponskim uređajima, samo mali dio upadne solarne energije pretvara se u električnu energiju. Procesi gubitaka u solarnim ćelijama igraju veoma važnu ulogu u procesu solarno-električne konverzije. Procesi gubitaka utiču na strukturne i radne karakteristike solarne ćelije kao što su efikasnost eksternog zračenja i radna temperatura, što utiče na performanse solarnog sistema.

Gubici u solarnim ćelijama mogu biti optički, električni, toplotni, gubici usled emisije fotona kao rezultat rekombinacije. Kada fotoni nemaju dovoljno energije da pobude slobodne elektrone, njihova energija se prenosi na fotone u uređaju, doprinoseći stvaranju toplote umjesto električne energije. Gubici se javljaju i usled radijativne rekombinacije, kada dolazi do emisije fotona iz ćelije. Navedeni gubici nazivaju se unutrašnjim gubicima. Pored unutrašnjih postoje i ekstrinzični gubici, kao što su gubici neradijativne rekombinacije, gubitak serijskog otpora R_s , gubitak otpora šanta R_p i gubitak parazitske apsorpcije. Serijska otpornost može uključivati kontaktni otpor između dijelova ćelije i dovodi do stvaranja toplote koja odgovara smanjenju napona ćelije. Otpornost šanta se može izjednačiti sa procesom rekombinacije, i dovodi do gubitaka fotostruje [45]-[51].

Parametri ćelija u velikoj mjeri utiču na procese gubitaka u solarnim ćelijama. Pokazalo se da različiti parametri imaju različite kontrolne sposobnosti na različitim procesima u fotonaponskim uređajima. Zajednička osobina solarnih ćelija je u tome da stvaranje toplote, koja je rezultat procesa gubitaka, uzrokuje porast temperature, i uzrokuje značajan pad efikasnosti ćelije [51]-[55]. Primjena jednodiodnog modela solarne ćelije često vodi do značajnih odstupanja između simuliranih i mjerenih karakteristika. Zbog prisustva strukturnih nesavršenosti, u uslovima niskog osvjetljenja ili pri nižim radnim naponima, kada rekombinacije u oblasti prostornog tovara dolaze do izražaja, uvodi se dvodiodni model solarne ćelije. Dodatna dioda opisuje rekombinacije nosilaca naelektrisanja u oblasti prostornog tovara (osiromašenoj zoni). Primjena dvodiodnog modela omogućava znatno bolje slaganje teorijskih i eksperimentalnih podataka, posebno kod ćelija nižeg kvaliteta. Za još preciznije modelovanje koristi se trodiodni model solarne ćelije. Ovaj model uvodi treću diodu koja opisuje gubitke na granicama između slojeva u solarnoj ćeliji, zbog defekata i nesavršenosti u tim oblastima. Trodiodni model pruža realniji matematički opis od jednodiodnog i dvodiodnog modela, i omogućava analizu mehanizama rekombinacije u savremenim ćelijama.

4.1. JEDNODIODNI MODEL SOLARNE ČELIJE

Jednodiodni model solarne ćelije predstavlja osnovu za razvoj složenijih modela, zahvaljujući svojoj konceptualnoj jednostavnosti, teorijskoj utemeljenosti i pogodnosti za implementaciju u realnom vremenu. Model se sastoji od fotostruje (strujni generator) I_{pv} , čija veličina zavisi od intenziteta i spektra apsorbovanog sunčevog zračenja, zatim od jedne diode d_1 , serijskog otpora R_s i paralelnog otpora R_p , kako je prikazano na slici 4.1.



Slika 4.1 Standardni jednodiodni model solarne ćelije SDM

Izraz koji matematički opisuje ovaj model dat je jednačinom:

$$I = I_{pv} - I_{01} \left(e^{\frac{U+IR_s}{n_1 V_{th}}} - 1 \right) - \frac{U+IR_s}{R_p}, \quad (6)$$

gdje je:

n_1 – faktor idealnosti diode,

I_{01} – inverzne struje zasićenja diode,

V_{th} – termalni napon, $V_{th} = kT/q$,

$k = 1.3806505 \cdot 10^{-23}$ J/K Bolcmanova konstanta,

$q = 1.6 \cdot 10^{-19}$ C naelektrisanje elektrona i

T - temperatura sredine.

Odnos između izlazne struje i napona u solarnoj ćeliji opisan jednodiodnim modelom je nelinearan, usled složenih fizičkih procesa koji se odvijaju unutar strukture ćelije. Ova nelinearnost proističe iz fenomena poput rekombinacije nosilaca naelektrisanja, generacije elektronsko-šupljinskih parova, curenja struje kroz materijal, kao i prisustva aktivnih (serijskih i paralelnih) otpornosti. Parametri jednodiodnog modela mogu se određivati analitičkim, numeričkim i metaheurističkim metodama, pri čemu metaheuristički pristupi, kao što su algoritmi rojeva čestica, genetski algoritmi i sl., daju najpreciznije rezultate. Radi formulacije problema u programskom

okruženju, izrađena je zavisnost izlazne struje od napona korišćenjem Lambert W funkcije, što omogućava zatvoreno analitičko rješenje jednačine za struju koja ima oblik:

$$I = \left(I_{pv} + I_{o1} - \frac{U}{R_p} \right) \cdot \frac{R_p}{R_p + R_s} - \frac{n_1 \cdot V_{th}}{R_s} \cdot W(\beta), \quad (7)$$

gdje je:

$$\beta = \frac{\alpha \cdot R_s}{n_1 \cdot V_t} \frac{R_p}{R_p + R_s} \cdot e^{\left(\frac{R_s \cdot \left(I_{pv} + I_{o1} - \frac{U}{R_p} \right)}{n_1 \cdot V_t} \frac{R_p}{R_p + R_s} \right)}, \quad (8)$$

i

$$\alpha = I_{o1} \left(e^{\frac{U}{n_1 \cdot V_{th}}} \right). \quad (9)$$

4.2. DVODIODNI MODEL SOLARNE ČELIJE

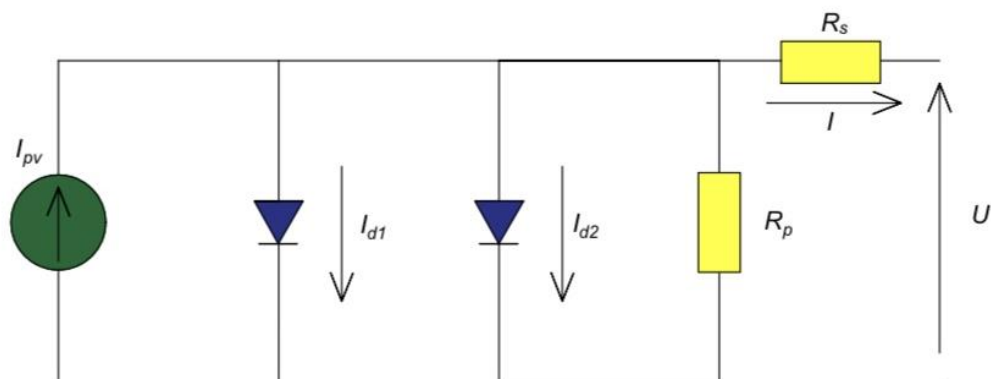
Dvodiodni model solarne ćelije je precizniji od jednodiodnog modela jer uzima u obzir neidealnosti, kao što su rekombinacija nosilaca naelektrisanja u zapreminskom dijelu $p-n$ spoja ćelije i oblasti prostornog tovara. Kolo dvodiodne solarne ćelije sastoji se od fotostruje I_{pv} , diode d_1 , diode d_2 , serijskog otpora R_s i paralelnog otpora R_p [56]-[68]. Struja I_{pv} predstavlja struju generisanu apsorpcijom sunčeve svjetlosti, i proporcionalna broju fotona koje apsorbuje strujna ćelija (slika 4.1). Izraz koji matematički opisuje ovaj model dat je jednačinom:

$$I = I_{pv} - I_{o1} \left(e^{\frac{U + IR_s}{n_1 \cdot V_{th}}} - 1 \right) - I_{o2} \left(e^{\frac{U + IR_s}{n_2 \cdot V_{th}}} - 1 \right) - \frac{U + IR_s}{R_p}, \quad (10)$$

gdje su:

n_1, n_2 - faktori idealnosti dioda i

I_{o1}, I_{o2} – inverzne struje zasićenja dioda.



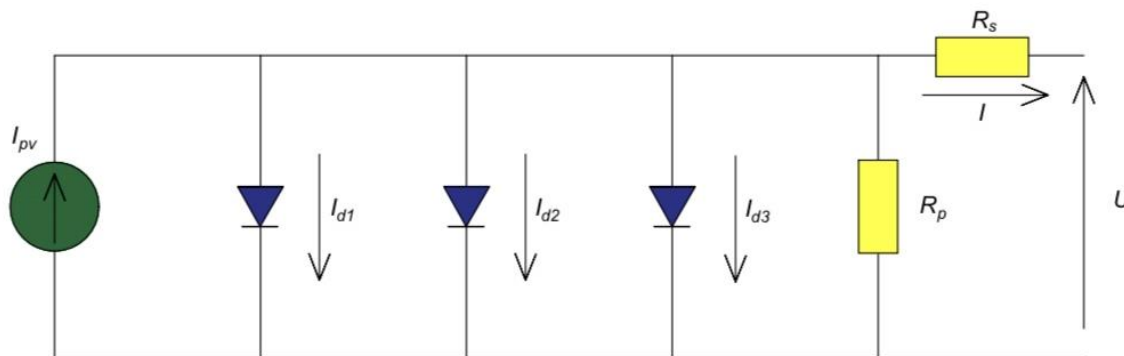
Slika 4.2 Standardni dvodiodni model solarne ćelije DDM

Izraz koji može dati direktnu povezanost struje i napona za ovaj model diode, još uvijek nije razvijen. Korišćenjem aproksimacija mogu se dobiti aproksimativni izrazi zavisnosti izlazne struje

od napona. Dvodiodni model solarne ćelije sastoji se od sedam nepoznatih parametara, I_{pv} , I_{o1} , I_{o2} , n_1 , n_2 , R_s , R_p . Određivanjem parametara modela solarne ćelije, može se optimizovati rad i predvidjeti proizvodnja energije u realnim uslovima [59] [60].

4.3. TRODIODNI MODEL SOLARNE ĆELIJE

Ekvivalentno kolo modela sa tri diode sastoji se od fotostruje I_{pv} , diode d_1 , diode d_2 , diode d_3 , serijskog otpora R_s , i paralelnog otpora R_p (slika 4.2). U matematičkom smislu trodiodni model sadrži devet nepoznatih parametara, struje I_{pv} , faktora idealnosti diode n_1 , n_2 , n_3 , struje zasićenja diode I_{o1} , I_{o2} , I_{o3} , serijskog otpora R_s , i paralelnog otpora R_p [61]-[62]. Treća dioda opisuje rekombinaciju na granicama između različitih slojeva materijala, ili između metala i p - n spoja. Izraz koji matematički opisuje ovaj model dat je jednačinom:



Slika 4.3. Standardni trodiodni model solarne ćelije TDM

$$I = I_{pv} - I_{o1} \left(e^{\frac{U+IR_s}{n_1 \cdot V_{th}}} - 1 \right) - I_{o2} \left(e^{\frac{U+IR_s}{n_2 \cdot V_{th}}} - 1 \right) - I_{o3} \left(e^{\frac{U+IR_s}{n_3 \cdot V_{th}}} - 1 \right) - \frac{U+IR_s}{R_p}, \quad (11)$$

gdje je:

I_{o3} – inverzna struja zasićenja treće diode i

n_3 – faktor zasićenja treće diode.

Devet parametara koji figurišu u jednačini trodiodnog modela solarne ćelije, osjetljivi su na uslove rada (sunčevo zračenje i temperaturu ćelije) [63]-[65].

4.4. AROKSIMATIVNA DVODIODNA KOLA DDM-1 DDM-2

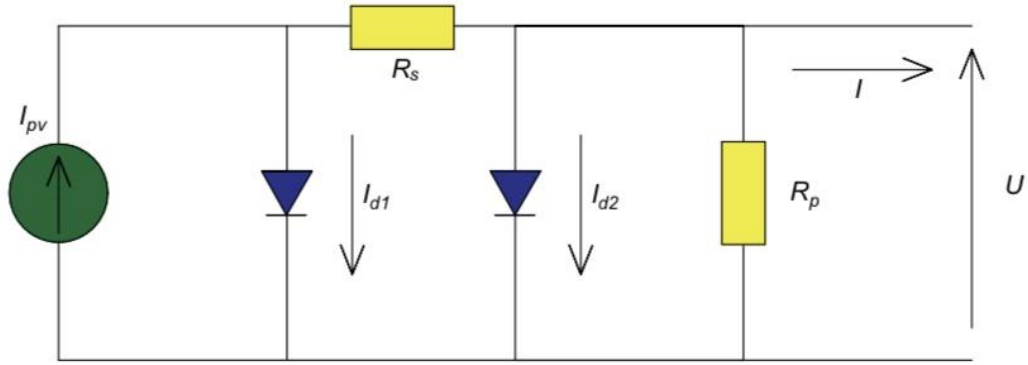
Kako bi se bolje razumjeli složeni mehanizmi gubitaka unutar solarnih ćelija, savremena istraživanja sve više ukazuju na potrebu korišćenja aproksimativnih električnih modela, koji preciznije odražavaju fizičke procese unutar ćelije. Standardni električni modeli, iako široko primjenjivani zbog svoje jednostavnosti, često ne omogućavaju zadovoljavajuće podudaranje između eksperimentalnih i simulacionih rezultata. Iz tog razloga, u savremenoj literaturi sve češće se ističe značaj aproksimativnih modela, poput DDM-1 i DDM-2, koji su razvijeni u cilju preciznijeg modeliranja internih gubitaka solarnih ćelija.

Model DDM-1 se strukturno razlikuje od standardnog dvodioidnog modela (DDM) po tome što sadrži dodatni otpornik R_s postavljen između dvije diode, dok standardni serijski otpor nije prisutan. Ostatak kola je identičan standardnom modelu i uključuje paralelnu otpornost R_p . Prema dostupnoj literaturi, upravo ovakvi aproksimativni modeli omogućavaju bolje fitovanje simuliranih sa eksperimentalnim I-U karakteristikama solarnih ćelija. Konkretno, pri upotrebi aproksimativnih DDM modela, vrijednosti srednjeg kvadratnog odstupanja (RMSE) su značajno niže u poređenju sa standardnim modelima, što ukazuje na njihovu veću tačnost.

U kontekstu matematičkog modelovanja, kod standardnih modela (npr. SDM – jednodiodni model), često se koristi Lambert W funkcija kako bi se dobila eksplicitna relacija između izlazne struje i napona. Ova relacija je matematički precizna i ne zahtijeva dodatne aproksimacije. Međutim, primjena Lambert W funkcije nije moguća kod DDM i TDM modela zbog njihove složenije nelinearne strukture. U tim slučajevima, dobijanje funkcionalne zavisnosti između struje i napona zahtijeva dodatne matematičke aproksimacije.

Kako bi rezultati analize bili konzistentni i međusobno uporedivi, u ovom radu će se razmatrati isključivo modeli kod kojih je moguće dobiti matematički precizne relacije. Takođe, korišće se rezultati iz relevantne naučne literature [14]-[17], u kojoj je potvrđena opravdanost upotrebe višediodnih aproksimativnih modela i njihova nadmoć u odnosu na standardne modele, kada je riječ o tačnosti prikaza karakteristika solarnih ćelija.

Stoga, polazna osnova ovog istraživanja jeste poređenje performansi novijih aproksimativnih modela sa postojećim dvodioidnim modelima, pri čemu se posebno ističu DDM-1 i DDM-2 kao modeli sa najmanjom RMSE vrijednošću zabilježenom u dostupnoj literaturi.



Slika 4.4. Aproksimativno ekvivalentno dvodiodno kolo **DDM-1**

Matematički izraz koji opisuje ovo kolo dat je sledećom jednačinom:

$$I_{pv} = I_{d1} + I_{d2} + \frac{U}{R_p} + I, \quad (12)$$

gdje je:

$$I_{d1} = I_{01} \left(e^{\frac{U + R_s I_{d2} + R_s U / R_p + R_s I}{n_1 V_{th}}} - 1 \right), \quad (13)$$

$$I_{d2} = I_{02} \left(e^{\frac{U}{n_2 V_{th}}} - 1 \right). \quad (14)$$

Koristeći Lambert W funkciju, iz izraza (12) dobija se jednačina:

$$I = I_x - \frac{n_1 V_{th}}{R_s} W(\beta), \quad (15)$$

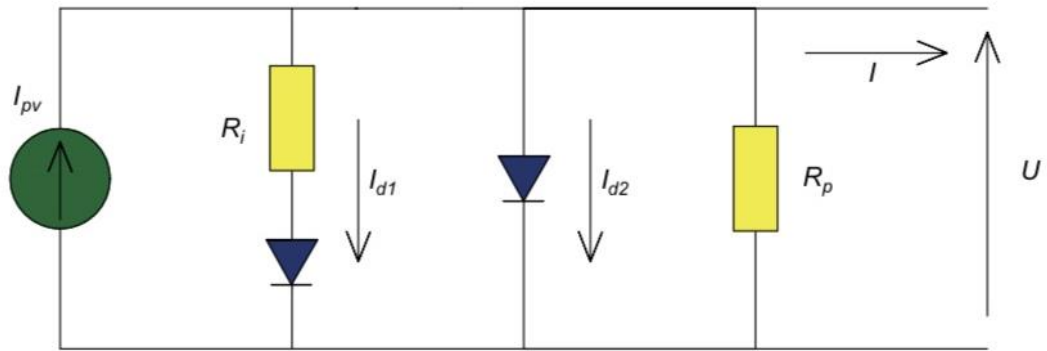
gdje je:

$$I_x = I_{pv} - I_{d2} + I_{01} - U / R_p, \quad (16)$$

$$\beta = \alpha \frac{R_s}{n_1 V_{th}} e^{\frac{R_s I_x}{n_1 V_{th}}}, \quad (17)$$

$$\alpha = I_{01} e^{\frac{U + R_s I_{d2} + R_s I_{d3} + R_s U / R_p}{n_1 V_{th}}}. \quad (18)$$

Model DDM-2 se strukturno razlikuje od standardnog dvodiodnog modela (DDM) po tome što sadrži dodatni otpornik R_s pozicioniran u grani sa prvom diodom, dok standardni serijski otpor nije prisutan. Osim te razlike, preostali elementi kola ostaju nepromijenjeni u odnosu na standardni model i uključuju paralelnu otpornost R_p .



Slika 4.5. Aproximativno ekvivalentno dvodiодно kolo **DDM-2**

Matematički izraz koji opisuje ovo kolo dat je sledećom jednačinom:

$$I_{pv} = I_{d1} + I_{d2} + \frac{U}{R_p} + I, \quad (19)$$

gdje je:

$$I_{d1} = I_{01} \left(e^{\frac{U - R_i \left(I_{pv} - I_{d2} - \frac{U}{R_p} - I \right)}{n_1 V_{th}}} - 1 \right), \quad (20)$$

$$I_{d2} = I_{02} \left(e^{\frac{U}{n_2 V_{th}}} - 1 \right). \quad (21)$$

Koristeći Lambert W funkciju, koja omogućava analitičko rešavanje eksponencijalnih jednačina, izraza (19) dobija se jednačina:

$$I = I_x - \frac{n_1 V_{th}}{R_i} W(\beta), \quad (22)$$

gdje je:

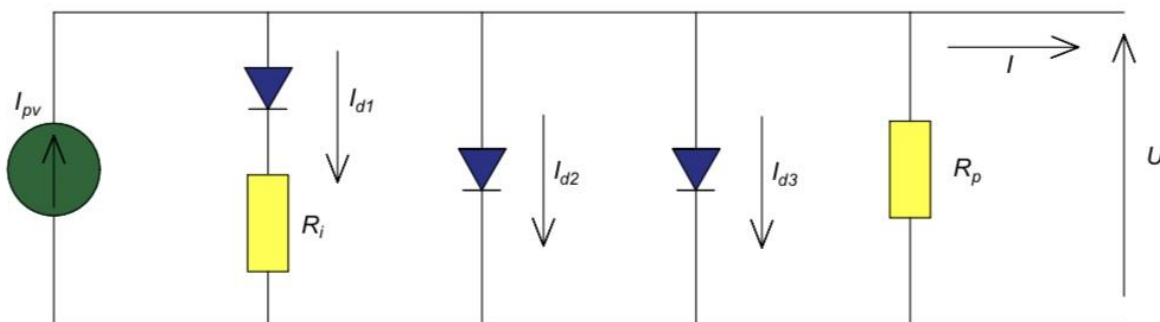
$$I_x = I_{pv} - I_{d2} + I_{01} - U/R_p, \quad (23)$$

$$\beta = \alpha \frac{R_i}{n_1 V_{th}} e^{\frac{R_i I_x}{n_1 V_{th}}}, \quad (24)$$

$$\alpha = I_{01} e^{\frac{U - R_i I_{pv} + R_i I_{d2} + R_i U/R_p}{n_1 V_{th}}}. \quad (25)$$

5. APROKSIMATIVNA EKVIVALENTNA KOLA TRODIODNIH I ČETVORODIODNIH MODELA SOLARNIH ČELIJA

U standardnim električnim modelima solarnih ćelija, gubici se aproksimiraju pomoću otpornika – jedan se vezuje paralelno s osnovnim elementima kola, dok se drugi postavlja u seriju sa cjelokupnim sistemom. Ovakav način modelovanja ima teorijsko utemeljenje, jer analize sprovedene na ovim modelima pružaju korisna i primjenljiva rješenja. Međutim, pokazalo se da standardni modeli solarnih ćelija nisu univerzalni, te da različiti rasporedi otpornika u modelu mogu omogućiti precizniju reprezentaciju tokova snaga u ćeliji. Poboljšavanje tačnosti modela u poređenju sa eksperimentalnim rezultatima izlazne struje i napona pri STC doprinosi boljem razumijevanju i optimizaciji rada solarnih ćelija. Na slici 5.1 prikazan je prvi aproksimativni model solarne ćelije sa tri diode.



Slika 5.1 Prvo aproksimativno trodiodno kolo solarne ćelije, sa tri diode

Matematički model ovog kola opisan je sledećom jednačinom:

$$I_{pv} = I_{d1} + I_{d2} + I_{d3} + \frac{U}{R_p} + I, \quad (26)$$

gdje je:

$$I_{d1} = I_{01} \left(e^{\frac{U - R_i \left(I_{pv} - I_{d2} - I_{d3} - \frac{U}{R_p} - I \right)}{n_1 V_{th}}} - 1 \right), \quad (27)$$

$$I_{d2} = I_{02} \left(e^{\frac{U}{n_2 V_{th}}} - 1 \right), \quad (28)$$

i

$$I_{d3} = I_{03} \left(e^{\frac{U}{n_3 V_{th}}} - 1 \right). \quad (29)$$

Koristeći Lambert W funkciju, koja omogućava analitičko rješavanje eksponencijalnih jednačina, izraza (26) dobija se jednačina:

$$I = I_x - \frac{n_1 V_{th}}{R_i} W(\beta), \quad (30)$$

gdje je:

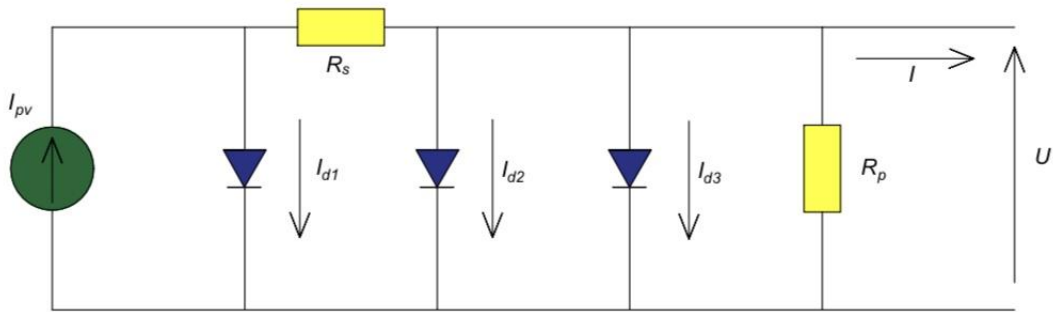
$$I_x = I_{pv} - I_{d2} - I_{d3} + I_{01} - U/R_p, \quad (31)$$

$$\beta = \alpha \frac{R_i}{n_1 V_{th}} e^{\frac{R_i I_x}{n_1 V_{th}}} \quad (32)$$

i

$$\alpha = I_{01} e^{\frac{U - R_i I_{pv} + R_i I_{d2} + R_i I_{d3} + R_i U/R_p}{n_1 V_{th}}}. \quad (33)$$

Na slici 5.2 prikazan je drugi aproksimativni model koja sa tri diode.



Slika 5.2 Drugo aproksimativno trodiodno kolo solarne ćelije, sa tri diode

Matematički izraz koji opisuje ovo kolo dat je sledećom jednačinom:

$$I_{pv} = I_{d1} + I_{d2} + I_{d3} + \frac{U}{R_p} + I, \quad (34)$$

gdje je:

$$I_{d1} = I_{01} \left(e^{\frac{U + R_s I_{d2} + R_s I_{d3} + R_s U/R_p + R_s I}{n_1 V_{th}}} - 1 \right), \quad (35)$$

$$I_{d2} = I_{02} \left(e^{\frac{U}{n_2 V_{th}}} - 1 \right), \quad (36)$$

i

$$I_{d3} = I_{03} \left(e^{\frac{U}{n_3 V_{th}}} - 1 \right). \quad (37)$$

Koristeći Lambert W funkciju, iz izraza (34) dobija se jednačina:

$$I = I_x - \frac{n_1 V_{th}}{R_s} W(\beta), \quad (38)$$

gdje je:

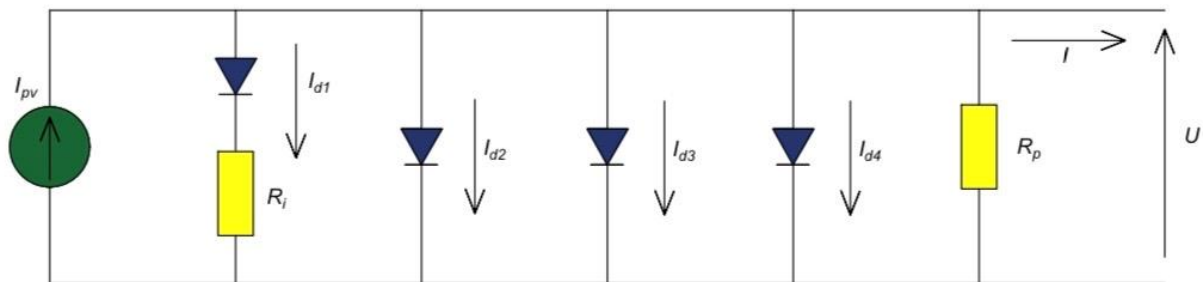
$$I_x = I_{pv} - I_{d2} - I_{d3} + I_{01} - U/R_p, \quad (39)$$

$$\beta = \alpha \frac{R_s}{n_1 V_{th}} e^{\frac{R_s I_x}{n_1 V_{th}}}, \quad (40)$$

i

$$\alpha = I_{01} e^{\frac{U + R_s I_{d2} + R_s I_{d3} + R_s U/R_p}{n_1 V_{th}}}. \quad (41)$$

Na slici 5.3 prikazan je treći aproksimativni model koja sa četiri diode. Matematički model ovog kola opisan je sledećom jednačinom:



Slika 5.3 Treće aproksimativno kolo solarne ćelije, sa četiri diode

$$I_{pv} = I_{d1} + I_{d2} + I_{d3} + I_{d4} + \frac{U}{R_p} + I , \quad (42)$$

gdje je:

$$I_{d1} = I_{01} \left(e^{\frac{U - R_i(I_{pv} - I_{d2} - I_{d3} - I_{d4} - \frac{U}{R_p} - I)}{n_1 V_{th}}} - 1 \right) , \quad (43)$$

$$I_{d2} = I_{02} \left(e^{\frac{U}{n_2 V_{th}}} - 1 \right) , \quad (44)$$

$$I_{d3} = I_{03} \left(e^{\frac{U}{n_3 V_{th}}} - 1 \right) , \quad (45)$$

i

$$I_{d4} = I_{04} \left(e^{\frac{U}{n_4 V_{th}}} - 1 \right) . \quad (46)$$

Koristeći Lambert W funkciju, iz izraza (42) dobija se jednačina:

$$I = I_x - \frac{n_1 V_{th}}{R_s} W(\beta) , \quad (47)$$

gdje je:

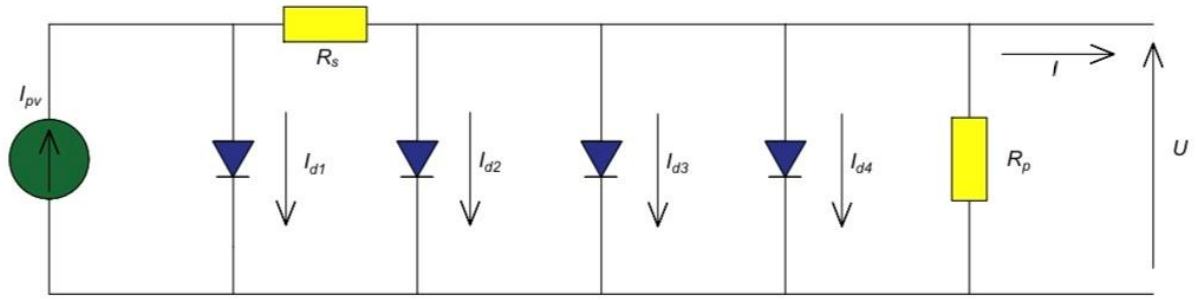
$$I_x = I_{pv} - I_{d2} - I_{d3} - I_{d4} + I_{01} - U/R_p , \quad (48)$$

$$\beta = \alpha \frac{R_i}{n_1 V_{th}} e^{\frac{R_i I_x}{n_1 V_{th}}} , \quad (49)$$

i

$$\alpha = I_{01} e^{\frac{U - R_i I_{pv} + R_i I_{d2} + R_i I_{d3} + R_i I_{d4} + R_i U/R_p}{n_1 V_{th}}} . \quad (50)$$

Na slici 5.4 prikazan je četvrti aproksimativni model kola sa četiri diode.



Slika 5.4 Četvrto aproksimativno kolo solarne ćelije, sa četiri diode

Matematički izraz koji opisuje ovo kolo dat je sledećom jednačinom:

$$I_{pv} = I_{d1} + I_{d2} + I_{d3} + I_{d4} + \frac{U}{R_p} + I, \quad (51)$$

gdje je:

$$I_{d1} = I_{01} \left(e^{\frac{U + R_s I_{d2} + R_s I_{d3} + R_s I_{d4} + \frac{R_s U}{R_p} + R_s I}{n_1 V_{th}}} - 1 \right), \quad (52)$$

$$I_{d2} = I_{02} \left(e^{\frac{U}{n_2 V_{th}}} - 1 \right), \quad (53)$$

$$I_{d3} = I_{03} \left(e^{\frac{U}{n_3 V_{th}}} - 1 \right), \quad (54)$$

i

$$I_{d4} = I_{04} \left(e^{\frac{U}{n_4 V_{th}}} - 1 \right). \quad (55)$$

Koristeći Lambert W funkciju, iz izraza (51) dobija se jednačina:

$$I = I_x - \frac{n_1 V_{th}}{R_s} W(\beta), \quad (56)$$

gdje je:

$$I_x = I_{pv} - I_{d2} - I_{d3} - I_{d4} + I_{01} - U/R_p, \quad (57)$$

$$\beta = \alpha \frac{R_s I_x}{n_1 V_{th}} e^{\frac{R_s I_x}{n_1 V_{th}}}, \quad (58)$$

i

$$\alpha = I_{01} e^{\frac{U + R_s I_{d2} + R_s I_{d3} + R_s I_{d4} + R_s U/R_p}{n_1 V_{th}}}. \quad (59)$$

U navedenim modelima solarnih ćelija, izrazi koji su formirani korišćenjem Lambert W funkcije, matematički su tačni, jer nisu zasnovani na pretpostavkama ili aproksimacijama.

6. NAPREDNE METODE I ALATI ZA OPTIMIZACIJU I ESTIMACIJU PARAMETARA SOLARNIH ČELIJA

U ovom poglavlju analizirane su optimizacione metode koje se primjenjuju u procesu estimacije parametara solarnih ćelija. Poseban fokus je stavljen na metaheurističke algoritme, koji omogućavaju efikasno rješavanje optimizacionih problema većih razmjera pružajući zadovoljavajuća rješenja u razumljivom vremenskom okviru. Iako metaheuristički pristupi ne garantuju pronalaženje globalno optimalnog rješenja, njihova sposobnost pretrage velikih prostora rješenja čini ih izuzetno korisnim u inženjerskim i naučnim primjenama. Primjena metaheurističkih algoritama dokazana je u širokom spektru disciplina, uključujući mašinsko učenje, modelovanje i identifikaciju sistema u oblastima hemije, fizike i biologije, optimizaciju problema procesa planiranja i proizvodnje, bioinformatiku, računarsku biologiju, finansijske analize i mnoge druge domene. Njihova fleksibilnost i adaptivnost čine ih posebno pogodnim za probleme gdje tradicionalne determinističke metode ne daju zadovoljavajuće rezultate ili su računarski preskupe.

U ovom istraživanju koristi se Evaporation Rate Water Cycle Algorithm (ER-WCA), optimizacioni algoritam inspirisan procesima isparavanja i kondenzacije u okviru vodenog ciklusa. Proces pretrage rješenja u ovom algoritmu ostvaruje se kroz evaluaciju funkcije cilja, pri čemu se kao kriterijum koristi srednja kvadratna greška (Root Mean Square Error – RMSE). Detaljna analiza i značaj funkcije RMSE, kao i njen uticaj na efikasnost optimizacije, biće predstavljen u nastavku rada.

6.1. OPTIMIZACIONE METODE

U elektrotehnici kao i u drugim granama inženjerstva, primjenjuju se mnogobrojne matematičke tehnike za postizanje boljih performansi najrazličitijih sistema. U nauci se ne mogu izostaviti promjenljivi uslovi sredine pri radu sistema, što predstavlja ozbiljan izazov kad je u pitanju pronalaženje najbolje vrijednosti parametara ili funkcije od interesa. S toga, razvijena je posebna oblast u matematici koja se bavi optimizacionim metodama, za različite sisteme u različitim uslovima rada [66]. Ne postoji univerzalni optimizacioni metod, koji bi bio primjenljiv na svaki problem i svaku funkciju, ali je uspostavljen opšti matematički okvir za definisanje funkcija koje se optimizuju.

Najčešće se optimizacija svodi na pronalaženje minimuma ili maksimuma određene ciljne funkcije, u postizanju maksimalne efikasnosti sistema. Glavni cilj optimizacije u inženjerskoj praksi često je ostvarivanje najveće moguće ekonomske koristi, kao i pouzdana procjena

isplativosti investicija, čime se olakšava donošenje odluka o ulaganju u određeni projekat. Sa razvojem nauke i industrije, te većom potrošnjom električne energije, pitanje energetske efikasnosti, ekološke održivosti i ekonomske isplativosti dobijaju sve veći značaj. U tom kontekstu, primjena i dalji razvoj optimizacionih metoda predstavljaju jednu od ključnih tema savremenog inženjeringa. Ipak, potreba za optimizacijom nije novijeg datuma – ona se javila još u ranim fazama naučnog razvoja. Počeci teorijskih osnova optimizacije vezuju se za radove naučnika poput Lagranža, Košija i Njutna, čiji su doprinosi u oblasti diferencijalnog računa otvorili put ka razvoju različitih optimizacionih tehnika.

Primjena matematičkih metoda u cilju minimizacije funkcija prvi put se intenzivnije javila kroz radove Bernulija, Ojlera i Lagranža. Poseban značaj je Lagranžov doprinos, jer je razvio metodu optimizacije funkcija uz prisustvo ograničenja – pristup koji je i danas temelj brojnih optimizacionih algoritama. Ipak, sve do pojave savremenih računara, ove metode nisu mogle biti efikasno primijenjene na složenije nelinearne probleme ili probleme sa velikim brojem promjenljivih. Razvojem računarske tehnologije otvorena je mogućnost za intenzivniji razvoj novih optimizacionih tehnika.

Među najznačajnijim doprinosima tog perioda ističu se Danzing koji je razvio simpleks metodu za rješavanje problema linearnog programiranja, i Belman, koji je postavio temelje dinamičkog programiranja. U savremenom dobu, uz konstantan napredak u brzini i kapacitetu računara, postalo je moguće razviti metode koje mogu rješavati optimizacione probleme velikih dimenzija. U tom okviru, posebno mjesto zauzimaju metaheurističke metode, koje se danas koriste za rješavanje složenih, višedimenzionalnih problema.

Optimizacione metode se u osnovi dijele na egzaktne i približne. Egzaktne metode omogućavaju pronalaženje jedinstvenog i tačnog rješenja problema, dok približne metode, iako ne garantuju optimalnost, pružaju dovoljno kvalitetna rješenja u zadatim granicama tačnosti. U egzaktne metode ubrajaju se linearno programiranje, dinamičko programiranje i programiranje sa ograničenjima, dok su metaheurističke tipičan predstavnik približnih metoda. Bez obzira na razlike u pristupima, svi optimizacioni problemi se mogu predstaviti kroz jedan konceptualni model. Ovakav model podrazumijeva definisanje kriterijumske funkcije koju je potrebno maksimizovati ili minimizovati, uz odgovarajuća ograničenja koja definišu prostor mogućih rješenja. Formalna matematička formulacija optimizacionog problema obično se prikazuje na sledeći način:

$$\min/\max f(x)$$

pod ograničenjima: $f(x)$ – kriterijumska funkcija,

$x = [x_1 x_2 x_3 \dots x_n]$ – vektor upravljačkih promjenljivih,

$g_j(x)$ – ograničenja tipa jednakosti,

$h_k(x)$ – ograničenja tipa nejednakosti,

x_i^D – donja granica za promjenljivu x_i ,

x_i^G – gornja granica za promjenljivu x_i .

Vektor upravljačkih promjenljivih predstavlja vektor promjenljivih koje je potrebno optimizovati unutar definisanog prostora ograničenja. Broj ovih promjenljivih određuje dimenzionalnost prostora rješenja, koji se može posmatrati kao podskup Euklidovog prostora \mathbb{R}^n , gdje je n broj upravljačkih promjenljivih. Ograničenja u obliku jednakosti i nejednakosti modeluju se odgovarajućim funkcijama koje definišu geometrijski oblik dozvoljenog prostora rješenja. Donja i gornja granica svake promjenljive dodatno definišu opseg u kojem se mogu tražiti rješenja koja zadovoljavaju uslove optimizacionog problema. Linije koje omeđuju skup dopuštenih rješenja, poznate kao površ ograničenja, obuhvataju i igranične tačke koje takođe mogu predstavljati validna rješenja. Evaluacija kvaliteta svakog mogućeg rješenja predstavljenog vektorom promjenljivih x vrši se pomoću kriterijumske funkcije. U kontekstu optimizacije, cilj je pronalaženje vrijednosti upravljačkih promjenljivih koje dovode do minimizacije ili maksimizacije zadate kriterijumske funkcije, u zavisnosti od konkretnog problema.

U ovom radu koristi se metaheuristički algoritam ER-WCA (Evaporation Rate Water Cycle Algorithm) za procjenu parametara solarne ćelije. Na osnovu poznatih graničnih vrijednosti parametara, algoritam u svakoj iteraciji izračunava vrijednost kriterijumske funkcije, pri čemu se kao mjera preciznosti koristi RMSE (Root mean square error). Uloga metaheurističkih algoritama u naučnim istraživanjima, kao i njihova primjena u analizi solarnih ćelija, biće detaljno obrađena u narednim poglavljima, zajedno sa opisom toka algoritma i formulacijom kriterijumske funkcije.

6.2. METAHEURISTIČKE METODE

Metaheurističke metode spadaju u grupu približnih optimizacionih tehnika, čija se primjena intenzivno razvija uz napredak računarske tehnologije, softverskih alata i algoritamskih strategija [67]. Ove metode su naročito korisne za rješavanje problema koji uključuju veliki broj ulaznih podataka, složene nelinearne odnose između promjenljivih, kao i u situacijama kada nije moguće eksplicitno formulisati ciljnu funkciju u analitičkom obliku. Za razliku od egzaktnih metoda koje teže jedinstvenom i optimalnom rješenju, metaheuristički algoritmi omogućavaju pronalaženje rješenja koja, iako možda nisu globalno optimalna, pružaju dovoljno dobar rezultat za praktičnu primjenu. Tipično se radi o rješenjima koja se nalaze u blizini optimalnog, unutar zadovoljavajućih margina tačnosti. Prilikom definisanja metaheurističkog algoritma, ključno je odrediti broj i opseg promjenljivih koje se optimizuju, jasno formulisati funkciju cilja, i precizno

opisati način rješavanja problema kroz iterativni proces. Svaka iteracija algoritma predstavlja pokušaj poboljšanja trenutnog rješenja, zasnovan na unaprijed definisanim pravilima. Zanimljivo je da su mnogi metaheuristički algoritmi inspirisani pojavama i procesima iz prirodnog okruženja, što je uticalo na način njihove klasifikacije. Metaheuristički algoritmi se mogu klasifikovati prema različitim kriterijumima, u zavisnosti od njihovog porijekla, strukture, načina rada i memorijskog pristupa. U nastavku su prikazane najčešće kategorije u koje se svrstavaju ovi algoritmi:

1. **Prema inspiraciji:** Metaheuristički algoritmi često su zasnovani na procesima iz prirode, društva i nauke. Najzastupljenije grupe uključuju:

- Fizički procesi i prirodne pojave
- Biološki sistemi
- Matematičke strukture
- Sociološke interakcije
- Hibridne metode koje kombinuju više različitih pristupa,

Najčešće korišćeni biološki algoritmi uključuju (GA) Genetski algoritam (*Genetic Algorithms*) [68], (DE) Diferencijalnu evoluciju (Differential Evolution) [69], (ABC) (Ant Colony Optimization) [70]. Među algoritmima inspirisanim drugim domenima ističu se: (PSO) (Particle Swarm Optimization) [71]-[72], GWO (*Grey Wolf Optimizer*) [73]-[74], ACO (*Ant Colony Optimization*) [75], CSO (*Cat Swarm Optimization*) [76], CS (*Cuckoo Search*) [77], kao i ER_WCA (algoritam zasnovan na simulaciji vodenog ciklusa) koji je korišćen u ovom radu [78][79].

2. **Prema načinu korišćenja memorije:** Većina metaheurističkih algoritama koristi informacije iz prethodnih iteracija kako bi unaprijedila naredne korake. Međutim, postoje i algoritmi bez memorijskog efekta, koji u svakoj iteraciji generišu potpuno nova rješenja nezavisno od prethodnih.

3. **Prema determinističkoj ili stohastičkoj prirodi:**

- Deterministički algoritmi uvijek vode ka istom rješenju kada se pokreću iz istog početnog stanja.
- Stohastički algoritmi sadrže elemente slučajnosti, te mogu prizvesti različita rješenja čak i pri istim početnim uslovima, zahvaljujući nasumičnim komponentama u procesu pretrage.

4. **Prema načinu generisanja rješenja:**

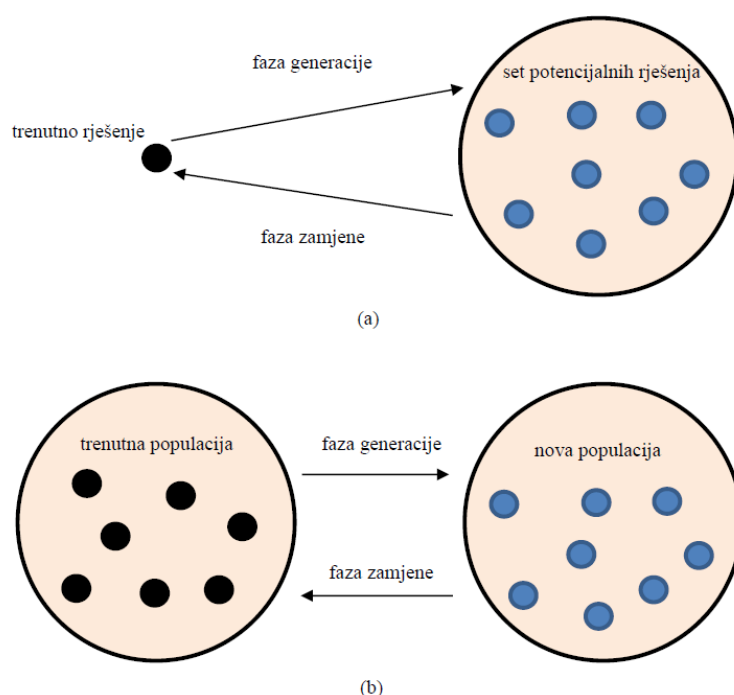
- Iterativni algoritmi počinju od početne populacije rješenja, koja se u svakoj iteraciji modifikuje uz pomoć predefinisanih operatora pretrage. Kvalitet rješenja se

procjenjuje pomoću kriterijumske funkcije, a proces se ponavlja sve do zadovoljenja uslova zaustavljanja.

- Pohlepni (greedy) algoritmi funkcionišu tako što kreću od praznog rješenja, a zatim dodaju elemente jedan po jedan, vodeći se unaprijed definisanim pravilima kako bi se postiglo prihvatljivo rješenje.

5. Prema strukturi zamjene rješenja:

- S-metaheuristike (single solution), rade sa jednim rješenjem koje se u svakoj iteraciji modifikuje. Proces obično uključuje dvije faze: faza generacije skupa kandidata I zamjenu trenutnog rješenja boljim iz tog skupa.
- P-metaheuristike (population-based), rade sa cijelom populacijom rješenja. Umjesto modifikacije jednog kandidata, vrši se simultana evolucija više rješenja. Svako rješenje se procjenjuje kroz kriterijumsku funkciju, a iterativni proces traje do ispunjenja uslova konvergencije ili dostizanja maksimalnog broja iteracija (slika 6.1).



Slika 6.1 Transformacija rješenja kod a) S-metaheuristika i b) P-metaheuristika ¹²

¹² M.Micev "Optimizacija parametara modela i upravljačkih uglova prekidačkog reluktantnog motora primjenom metaheurističkih algoritama", Magistarski rad, Podgorica 2020.

6.3. ER-WCA (Evaporation Rate Water Cycle Algorithm)

Metaheuristički ER-WCA (Evaporation Rate Water Cycle Algorithm) pripada grupi iterativnih algoritama, a njegova inspiracija potiče iz prirodnog hidrološkog ciklusa vode, koji obuhvata procese poput isparavanja vode iz potoka, rijeka i mora, kondenzacije u atmosferi i padavina koje vraćaju vodu na tlo. Mehanizam isparavanja pri višim temperaturama poslužio je kao osnova za razvoj ovog algoritma. Početna populacija parametara, koju korisnik definiše u okviru zadanih granica, nasumično se generiše i naziva *kišnim kapima*. Najbolje kišne kapi, one koje rezultiraju najmanjom vrijednošću funkcije cilja – identifikuju se kao more, dok se dobre kapi svrstavaju u rijeke. Preostale kapi čine potoke, koji se kreću ka rijekama i moru, oponašajući prirodne tokove (slika 6.2). Populacija se generiše u graničnim okvirima, nasumičnim izborom, i može se opisati sledećim jednačinama:

$$\text{Kišne kapi} = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_N], \quad (60)$$

$$\text{Populacija kišnih kapi} = \begin{pmatrix} \text{More} \\ \text{Rijeka}_1 \\ \text{Rijeka}_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \text{Potok}_{N_{sr}+1} \\ \text{Potok}_{N_{sr}+2} \\ \text{Potok}_{N_{sr}+3} \\ \vdots \\ \vdots \\ \text{Potok}_{N_{pop}} \end{pmatrix}, \quad (61)$$

gdje je N broj varijabli odluke, N_{pop} veličina populacije, a N_{sr} zbir broja rijeka i jednog mora. Na osnovu vrijednosti funkcije cilja ocjenjuje se intenzitet protoka:

$$\text{Cost}_i = f(x_1^i, x_2^i, \dots, x_N^i) \quad i = 1, 2, \dots, N_{pop}. \quad (62)$$

Broj N_{sr} se dobija iz minimalne vrijednosti funkcije ciljka, i to kao zbir rijeka i jednog mora:

$$N_{sr} = \text{Broj rijeka} + 1. \quad (63)$$

Ostatak tokova se računa na sledeći način:

$$N_{potoka} = N_{pop} - N_{sr}. \quad (64)$$

Od veličine potoka zavisi da li će se uliti u rijeku ili more. Broj potoka koji se ulivaju u more ili u reijeke, a koji se određuje na osnovu intenziteta toka računa se na sledeći način:

$$N_{sh} = \text{round} \left\{ \left\lfloor \frac{c_h}{\sum_{n=1}^{N_{sr}} c_n} \right\rfloor \times N_{potoka} \right\} \quad h = 1, 2, \dots, N_{sr}, \quad (65)$$

gdje je N_{sh} broj potoka, koji se ulivaju u more ili rijeke. Nova lokacija za potoke i rijeke u populaciji kišnih kapi može se izračunati kao:

$$X_{potok}^{i+1} = X_{potok}^i + rand \times C \times (X_{rijeke}^i - X_{potok}^i) , \quad (66)$$

$$X_{potok}^{i+1} = X_{potok}^i + rand \times C \times (X_{more}^i - X_{potok}^i) , \quad (67)$$

$$X_{rijeke}^{i+1} = X_{rijeke}^i + rand \times C \times (X_{more}^i - X_{rijeke}^i) , \quad (68)$$

gdje je:

C - vrijednost između 1 i 2,

rand - slučajni broj između 0 i 1.

Lokacije potoka i rijeka se ažuriraju u odnosu na bolja rješenja. Ako neki potok ponudi bolje rješenje od postojeće rijeke, zamjena se vrši automatski. Isto važi i za odnos između rijeka i mora, čime se omogućava algoritmu da izađw iz lokalnog minimuma. Za provjeru uslova isparavanja koriste se sledeći kodovi:

$$if |X_{more}^k - X_{rijeke}^k| < d_{max} \quad k = 1, 2, 3 \dots, N_{sr} - 1 , \quad (69)$$

ako je prethodni uslov zadovoljen počinje proces kiše, koristeći formulu (72),

$$if |X_{more}^k - X_{potok}^k| < d_{max} \quad k = 1, 2, 3 \dots, N_{sr} - 1 , \quad (70)$$

ako je prethodni uslov zadovoljen počinje proces kiše koristeći formulu (73). U prethodnim jednačinama d_{max} je mala vrijednost koja kontroliše intenzitet pretrage u blizini mora. Vrijednost d_{max} se postepeno smanjuje kroz iteracije, čime se sužava prostor lokalne pretrage:

$$d_{max}^{k+1} = d_{max}^k - \frac{d_{max}^k}{Max.Alteration} , \quad (71)$$

gdje Max.Alteration označava maksimalan broj promjena, odnosno izmjena dozvoljenih u toku rada algoritma. Položaj novih tokova može se izračunati na sledeći način:

$$X_{potok}^{novi} = LB + rand \times (UB - LB) , \quad (72)$$

gdje UB (upper range), LB (lower range), predstavljaju donju i gornju granicu promjenljivih parametara. Lokacije novih potoka koji se direktno ulivaju u more mogu se izraziti kao:

$$X_{potok}^{novi} = X_{more} + \sqrt{\mu} \times rand(1, N_{var}) , \quad (73)$$

gdje je μ mala vrijednost i postavljena je na 0,1. Ova vrijednost navodi algoritam da traži u blizini mora. Rijeke sa slabijim protokom, koje ne uspijevaju da se približe moru, bivaju eliminisane iz populacije kroz mehanizam brzine isparavanja ($ER - evaporation rate$), čime se simulira njihovo “nestajanje” kao u prirodi:

$$ER = \frac{Sum(N_{sh})}{N_{sr}-1} \times rand \quad m = 2, \dots, N_{sr} . \quad (74)$$

Iz (74) rijeka sa nižim tokovima ima šansu da ispari u poređenju sa rijekama sa boljim tokovima. Sledeći preudo kod se koristi za provjeru stanja brzine isparavanja među rijekama:

$$\text{for } i = 1: N_{sr} - 1 \quad (75)$$

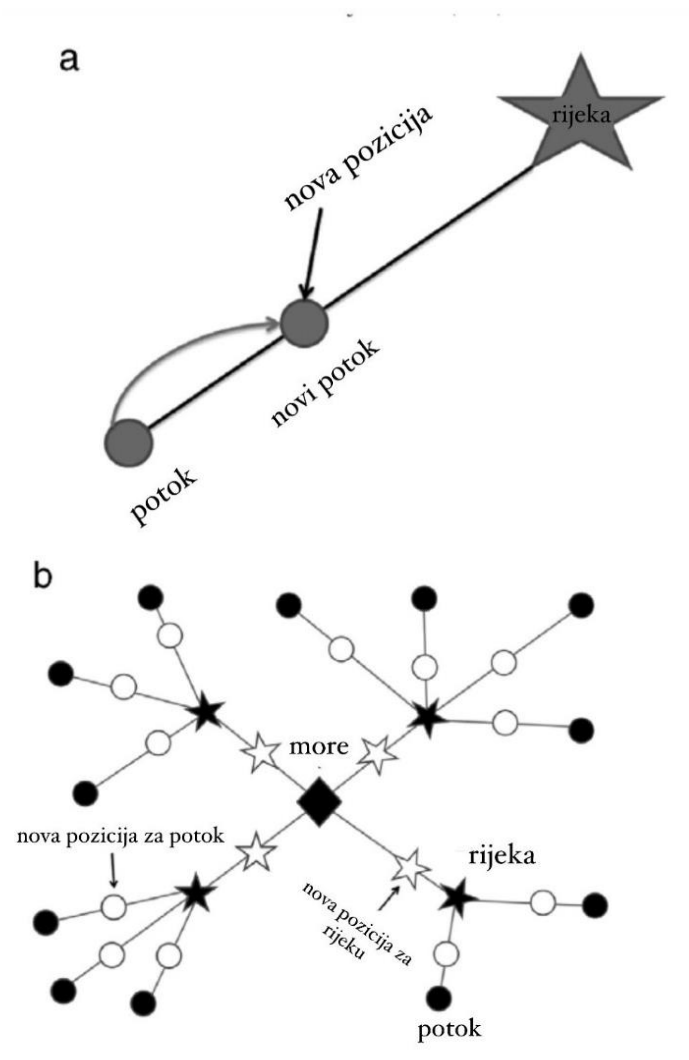
$$\text{if } \left(\exp\left(\frac{-m}{\text{maxit}}\right) < \text{rand} \right) \& (N_s^i < ER), \quad (76)$$

gdje je:

m - trenutna iteracija,

max_it – maksimalni broj iteracija.

Sledeći korak je proces kiše koristeći (72). Na kraju svake iteracije, nakon ažuriranja pozicija i potencijalnih isparavanja, algoritam pokreće proces formiranja nove “kiše”; čime se zatvara ciklus i započinje nova iteracija optimizacije.



Slika 6.2 Šematski prikaz a) potoka kako se uliva u određenu rijeku b) proces optimizacije ER-WCA¹³

¹³ A. Sadollah, H. Eskandar, H.M. Lee, D.G. Yoo, J.H. Kim, “Water cycle algorithm: A detailed standard code”, Elsevier B.V. 21. Mart 2016.

6.4. RMSE - Root Mean Square Error

Kod metaheurističkih algoritama neophodan i sastavni korak predstavlja definisanje kriterijumske funkcije. U problematici procjene parametara solarnih ćelija, kao kriterijumska funkcija koristi se RMSE – root mean square error. Matematički izraz koji opisuje RMSE izražava se na sledeći način:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N_{meas}} \sum_{k=1}^{N_{meas}} (I_k^{meas} - I_k^{sim})^2} , \quad (77)$$

gdje je:

index k – mjerna tačka,

N_{meas} – broj mjernih tačaka,

I_{meas} – mjerena vrijednost struje u tački k ,

I_{sim} – simulirana vrijednost struje u tački k .

Ova funkcija se koristi za procjenu razlike između vrijednosti izlazne struje solarne ćelije dobijene u standardnim test uslovima, i izlazne struje dobijene u proračunima na osnovu parametara dobijenih u svakoj od iteracija korišćenog algoritma. U toku optimizacije minimizuje se kriterijumska funkcija. Na kraju optimizacionog problema, dobija se minimum kriterijumske funkcije i odgovarajuće vrijednosti parametara.

7. NUMERIČKI REZULTATI

U ovom odjeljku predstavljani su rezultati procjene parametara standardnog SDM modela solarne ćelije, literaturno poznatih aproksimativnih DDM1 i DDM2 modela, kao i predloženih aproksimativnih trodiodnih i četvorodiodnih modela. Proces procjene zasniva se na minimizaciji RMSE kriterijumske funkcije, dok su svi proračuni realizovani u Matlab okruženju (verzija R2021a), s ciljem evaluacije tačnosti predloženih ekvivalentnih kola i algoritma. Poseban akcenat stavljen je na ispitivanje opravdanosti primjene složenijih modela sa više dioda i nestandardne konfiguracije kola u pogledu pozicioniranja otpornosti kola. U svim modelima parametri su procjenjivani korišćenjem Lambert W funkcije, prema relacijama (7), (15), (22), (30), (38), (47) i (56).

Na slici 7.1 prikazana je uporedna analiza mjerene i simuliranih I–U karakteristika aproksimativnih modela TDM1, TDM2, FDM1 i FDM2 za solarnu ćeliju RTC France. Dobijeni rezultati ukazuju na visoko poklapanje eksperimentalne i simuliranih krivih, što potvrđuje opravdanost primjene aproksimativnih ekvivalentnih kola u modelovanju rada solarnih ćelija.

Praktična primjenljivost predloženih modela dodatno je potvrđena analizom na nivou solarnog modula PWP. Na slici 7.2 prikazana je uporedna analiza mjerene i simuliranih I–U karakteristika za iste aproksimativne modele. Rezultati ukazuju da se metodologija razvijena za solarnu ćeliju može uspješno primijeniti i za modelovanje solarnog modula.

Na slikama 7.3 i 7.4 prikazana je analiza P–U karakteristika solarne ćelije RTC France i PWP modula. Ovaj prikaz je od ključnog značaja jer omogućava procjenu izlazne snage, koja u praksi predstavlja najvažniji parametar za korisnike solarnih sistema. Dobijeni rezultati ukazuju da modeli pouzdano predviđaju maksimalnu snagu, što značajno skraćuje proces analize performansi solarnih sistema.

Na slikama 7.5 – 7.8 prikazana je razlika simulirane i mjerene vrijednosti struje u funkciji od napona za predložene aproksimativne modele, solarne ćelije RTC France. Može se uočiti da su odstupanja kod svih modela relativno mala i da se u najvećem opsegu tačaka kreću unutar opsega $\pm 1\text{mA}$. To potvrđuje da svi aproksimativni modeli dovoljno precizno opisuju realno ponašanje solarne ćelije.

Kod TDM1 i TDM2 modela (slike 7.5 i 7.6) pri raspodjeli grešaka nema izraženih odstupanja. Najveće razlike se javljaju u oblasti viših napona (iznad 0.4V). Ipak, u praktično najvažnijem dijelu karakteristike, u tački maksimalne snage, razlika je zanemarljiva.

Kod FDM1 i FDM2 modela (slike 7.7 i 7.8) pojavljuju se tačke najvećeg odstupanja, u poređenju sa razlikama struja kod TDM1 i TDM2. Ovo može biti posledica složenije konfiguracije, koja može dovesti do veće osjetljivosti na numeričke greške prilikom procjene

parametara. Ipak, poređenjem svih rezultata, pokazuje se da četvorodiodni modeli u srednjoj vrijednosti rezultata daju manju razliku simulirane i mjerene struje u odnosu na napon, u odnosu na odgovarajući trodiodni model. U konačnici pokazuje se da su sva odstupanja dovoljno mala da potvrde visok stepen slaganja između mjerenih i simuliranih podataka, te opravdavaju primjenu višediodnih ekvivalentnih kola u preciznom modelovanju solarnih ćelija.

Na osnovu rezultata prikazanih na slikama 7.9 – 7.12 uočava se da su razlike između simulirane i mjerene struje kod PWP modula nešto izraženije nego kod pojedinačne solarne ćelije, što je i očekivano zbog složenije strukture modula. Vrijednosti odstupanja su i dalje niske i kreću se uglavnom unutar opsega $\pm 3\text{mA}$, što potvrđuje da svi razmatrani modeli zadržavaju visok stepen tačnosti i na nivou modula.

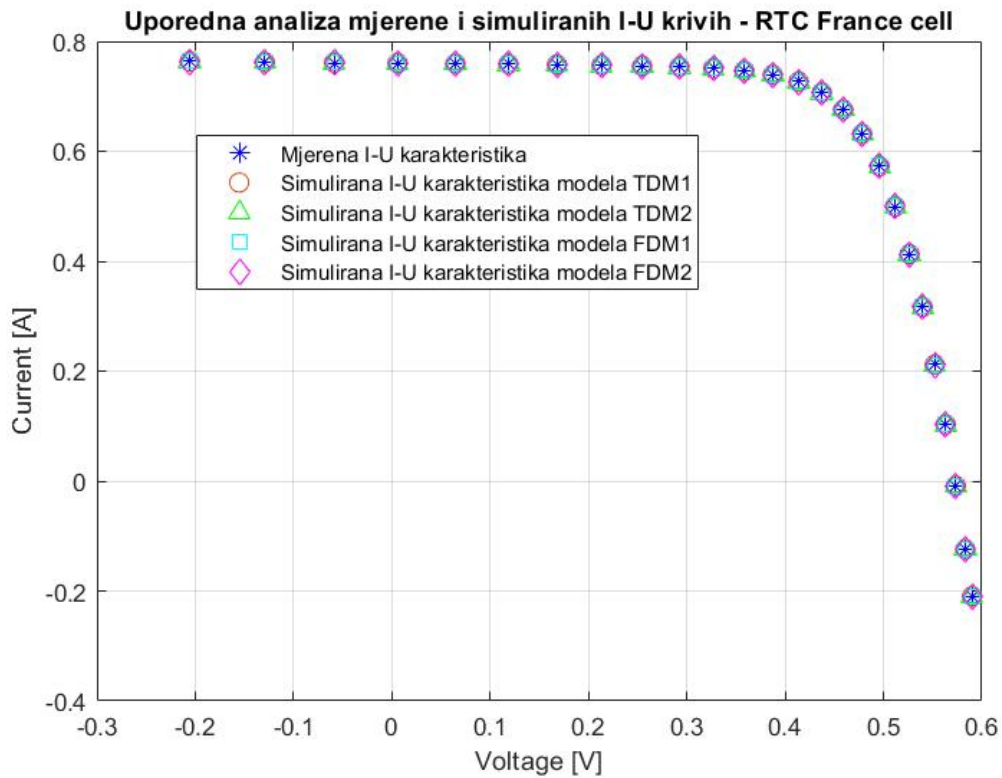
Kod TDM1 i TDM2 modela (slike 7.9 i 7.10) razlike su ravnomjerno raspoređene duž naponske ose, pri čemu se veća odstupanja javljaju pri višim naponima (između 6 i 12V). Ista situacija se uočava i pri analizi modela FDM1 i FDM2 (slike 7.11 i 7.12). Kao i kod solarne ćelije, u tački maksimalne snage, razlika između mjerene i simulirane struje se smanjuje i postaje zanemarljivo mala. Rezultati razlike struja u odnosu na napon dobijeni za trodiodne i četvorodiodne modele pokazuju se približno jednakim, pa će superiornost četvorodiodnih modela biti prikazana u nastavku, preko analize RMSE.

Na slici 7.13 je prikazan grafički prikaz poređenja RMSE za više modela solarne ćelije RTC France. RMSE je korišćen kao mjera tačnosti modela, pri čemu niže vrijednosti ukazuju na veću preciznost u aproksimaciji stvarnih izlaznih karakteristika. Upoređeni su rezultati standardnog SMD, aproksimativnih DDM1 i DDM2, i predloženih TDM1, TDM2, FDM1 i FDM2 modela. Najveću vrijednost RMSE pokazao je SMD (0.000773006268994221), što potvrđuje ograničenu tačnost jednostavnijih modela pri simulaciji karakteristika solarnih ćelija.

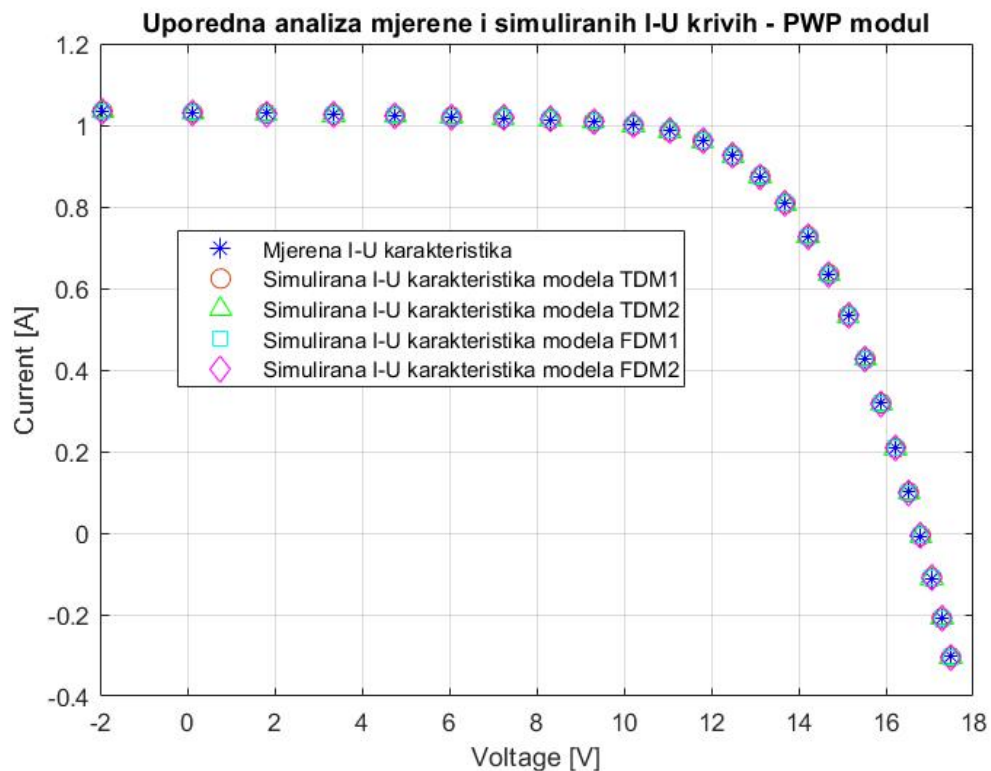
Poređenjem ekvivalentnih modela DDM1, TDM1 i FDM1, sa istim rasporedom otpornika, a različitim brojem dioda, pokazuje se da se bolji rezultat za RMSE dobija povećanjem broja dioda. U ovom slučaju model DDM1 (0.000633004073449695) ima veću vrijednost RMSE u odnosu na TDM1 (0.000577247270866694), a TDM1 ima veću vrijednost RMSE u odnosu na FDM1 (0.000574008196427373). Dalje, poređenjem vrijednosti RMSE ekvivalentnih kola DDM2, TDM2 i FDM2, opet se pokazuju bolji rezultati RMSE za kola sa većim brojem dioda. U ovom slučaju model DDM2 (0.000633002031473042) ima veću vrijednost RMSE u odnosu na TDM2 (0.000587435131128962), a TDM2 ima veću vrijednost RMSE u odnosu na FDM2 (0.000585565621035145). Najbolji rezultat RMSE dobija se za četvorodiodni FDM1 model, što je pozitivan rezultat u smjeru analize uticaja povećanja broja dioda na tačnost modela kola solarne ćelije.

Na slici 7.14 je prikazan grafički prikaz poređenja RMSE za više modela solarnog modula PWP. Razlike u vrijednostima RMSE različitih modela solarnog modula, manje su u odnosu na solarnu ćeliju, što je i očekivano zbog složenije konfiguracije modula. Ipak, opet se pokazuje da se najveća vrijednost RMSE dobija za SDM (0.00203999227321794). Kao i kod solarne ćelije, poređenje rezultata izvršeno je na ekvivalentnim kolima, pri čemu se dolazi do istog zaključka: model DDM1 (0.00144975673918403) ima veću vrijednost RMSE u odnosu na TDM1 (0.0014497278574256), a TDM1 ima veću vrijednost RMSE u odnosu na FDM1 (0.00144971209349117). Takođe, model DDM2 (0.00144975673891934) ima veću vrijednost RMSE u odnosu na TDM2 (0.00144975005048106), a TDM2 ima veću vrijednost RMSE u odnosu na FDM2 (0.00144971801896181). Ekvivalentno rezultatu dobijenom za solarnu ćeliju, najbolji rezultat RMSE dobija se za četvorodiodni FDM1 model, što potvrđuje kvalitet dobijenih rezultata.

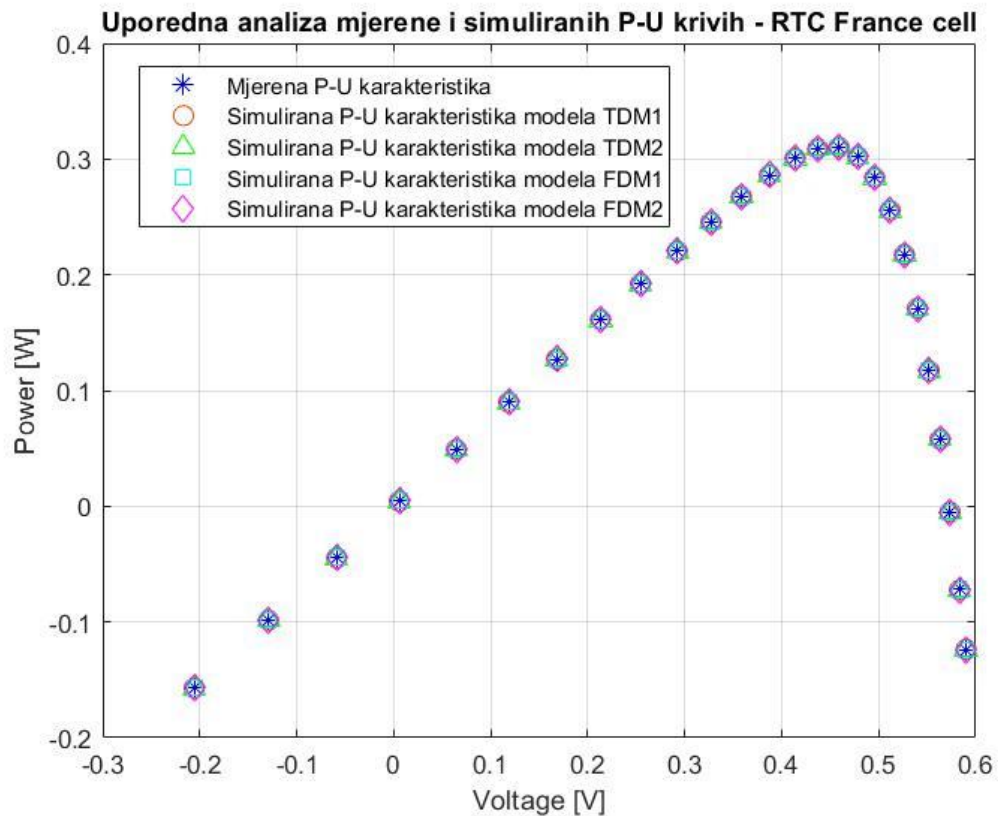
Parametri dobijeni za sve analizirane modele prikazani su u Tabelama II i III. Ovi rezultati omogućavaju generisanje I–U karakteristika u različitim uslovima rada solarne ćelije i modula, korišćenjem razvijenih algoritama i izvedenih formula.



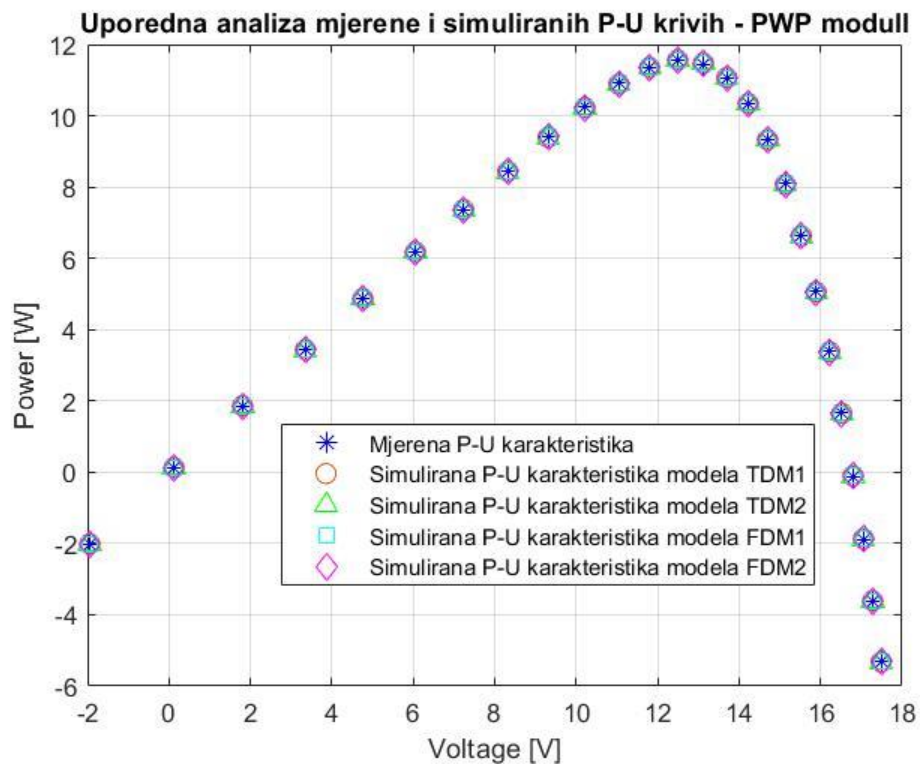
Slika 7.1 Uporedna analiza mjerene i simuliranih I-U karakteristika aproksimativnih modela (TDM1, TDM2, FDM1 i FDM2) solarne ćelije RTC France



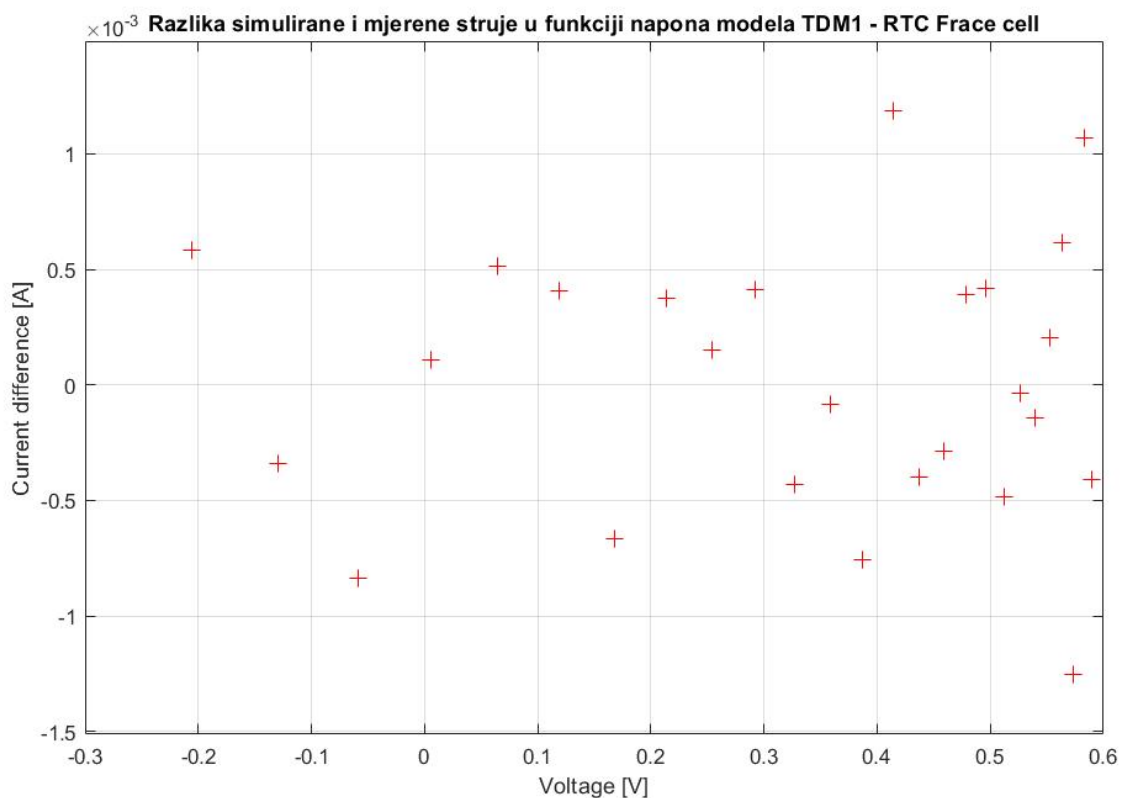
Slika 7.2 Uporedna analiza mjerene i simuliranih I-U karakteristika aproksimativnih modela (TDM1, TDM2, FDM1 i FDM2) solarnog modula PWP



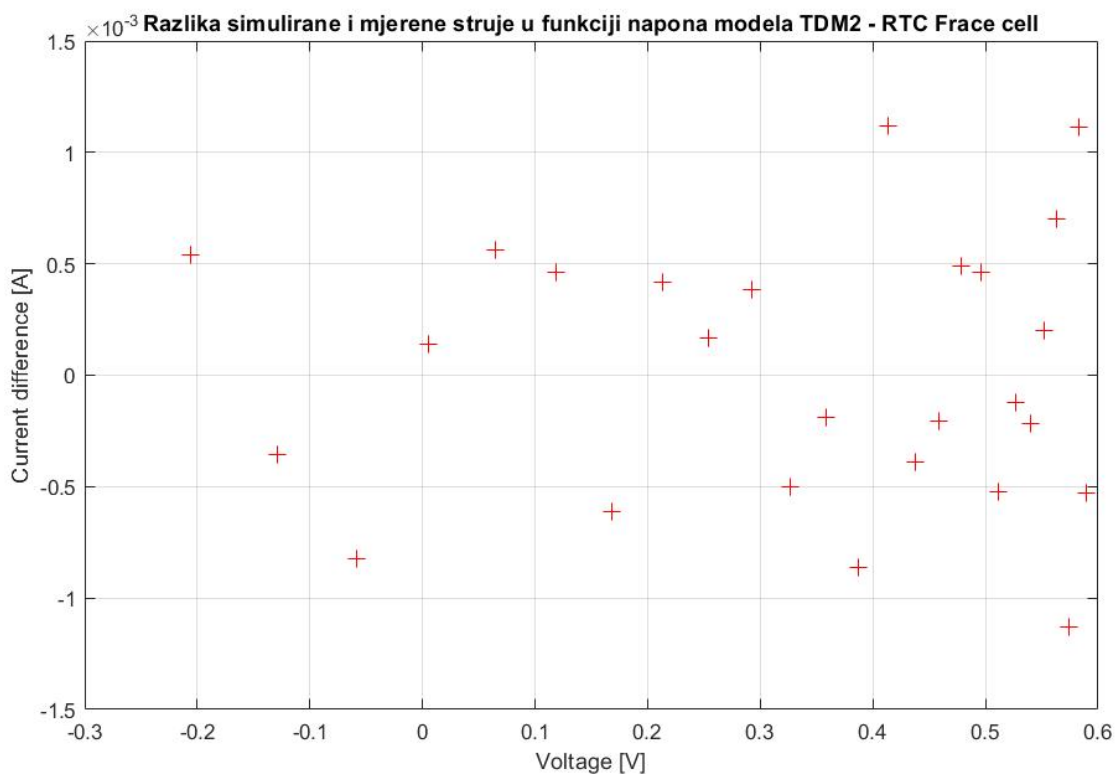
Slika 7.3 Uporedna analiza mjerene i simuliranih P-U karakteristika aproksimativnih modela (TDM1, TDM2, FDM1 i FDM2) solarne ćelije RTC France



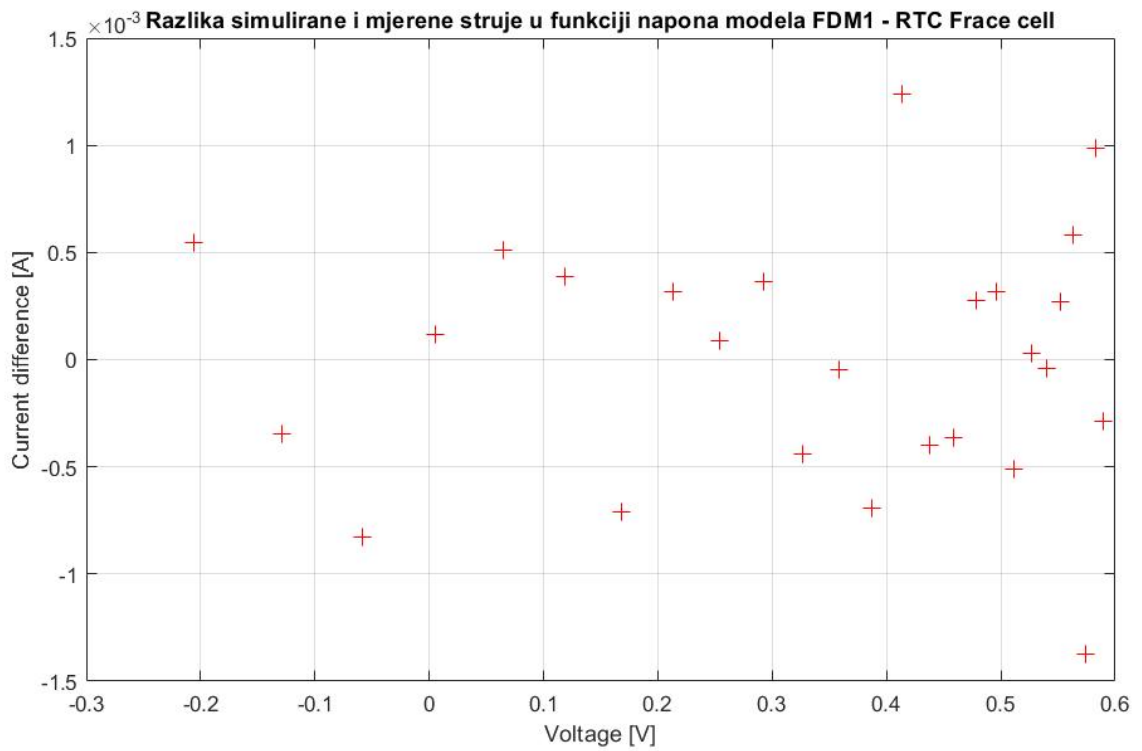
Slika 7.4 Uporedna analiza mjerene i simuliranih P-U karakteristika aproksimativnih modela (TDM1, TDM2, FDM1 i FDM2) solarnog modula PWP



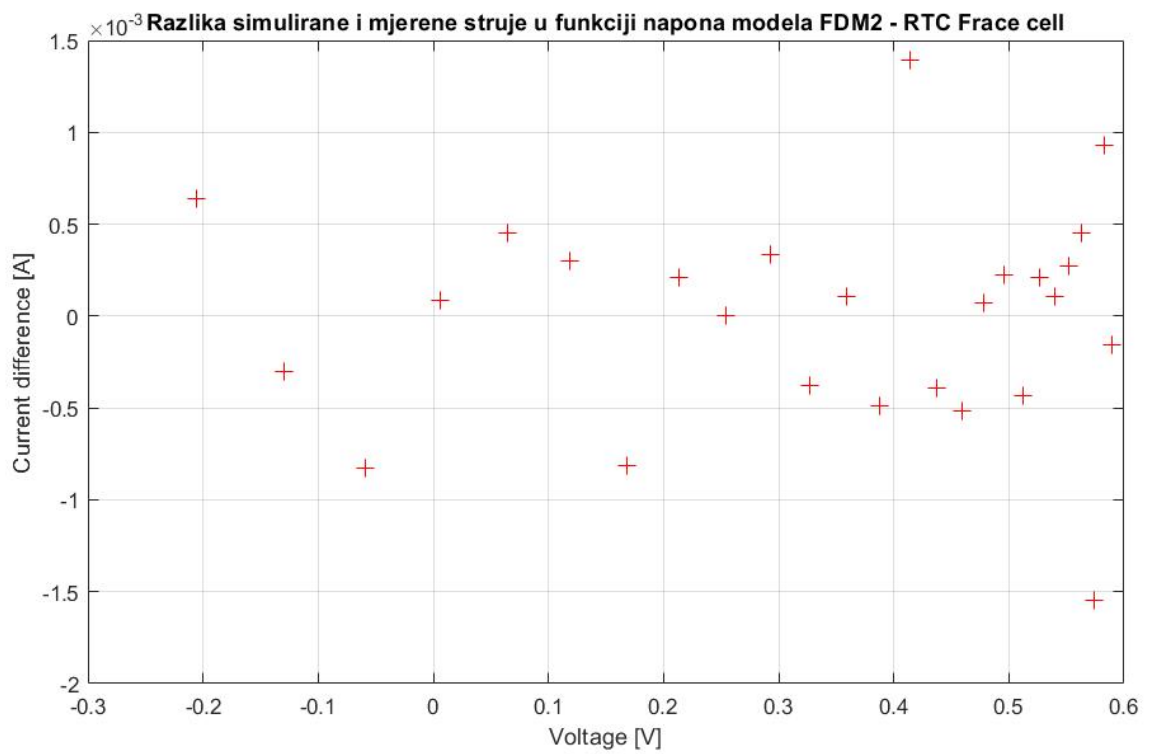
Slika 7.5 Razlika simulirane i mjerene struje u funkciji napona za model TDM1 – RTC France cell



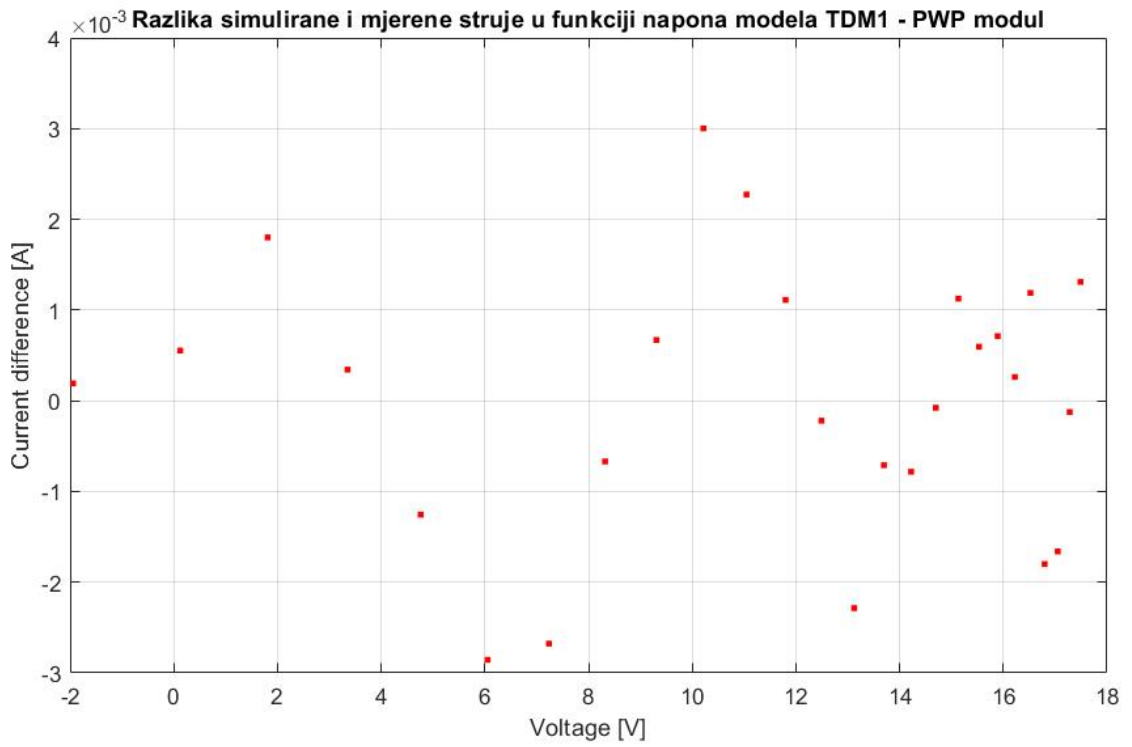
Slika 7.6 Razlika simulirane i mjerene struje u funkciji napona za model TDM2 – RTC France cell



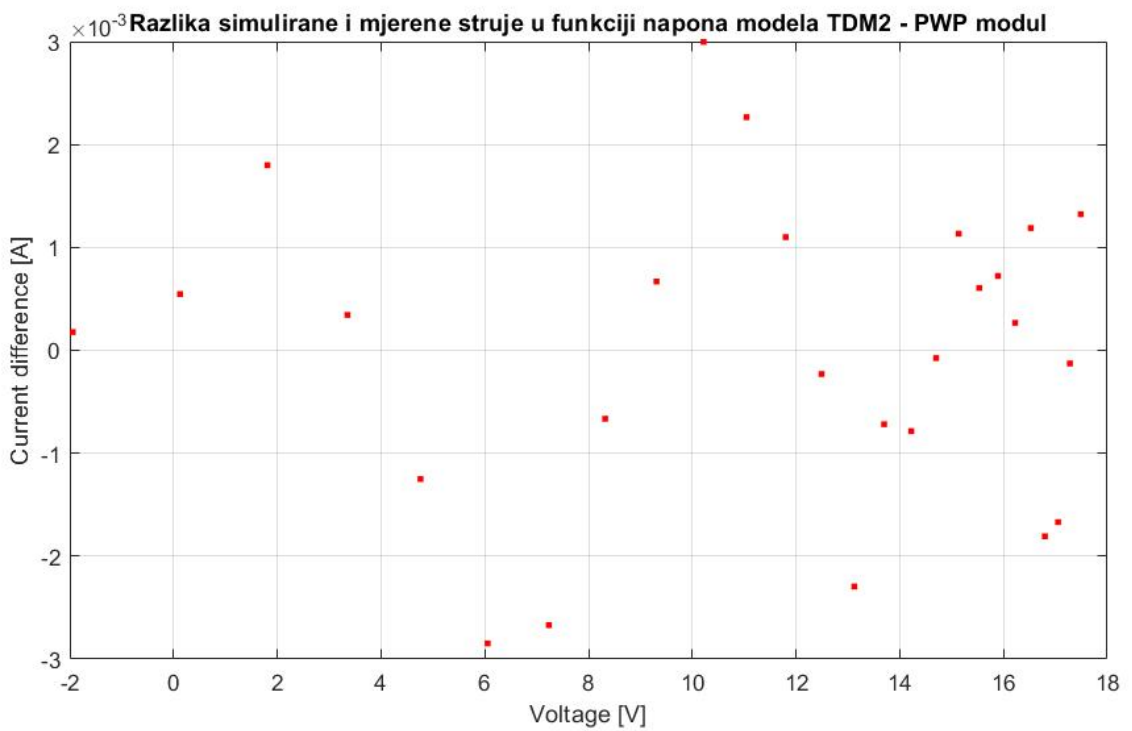
Slika 7.7 Razlika simulirane i mjerene struje u funkciji napona za model FDM1 – RTC France cell



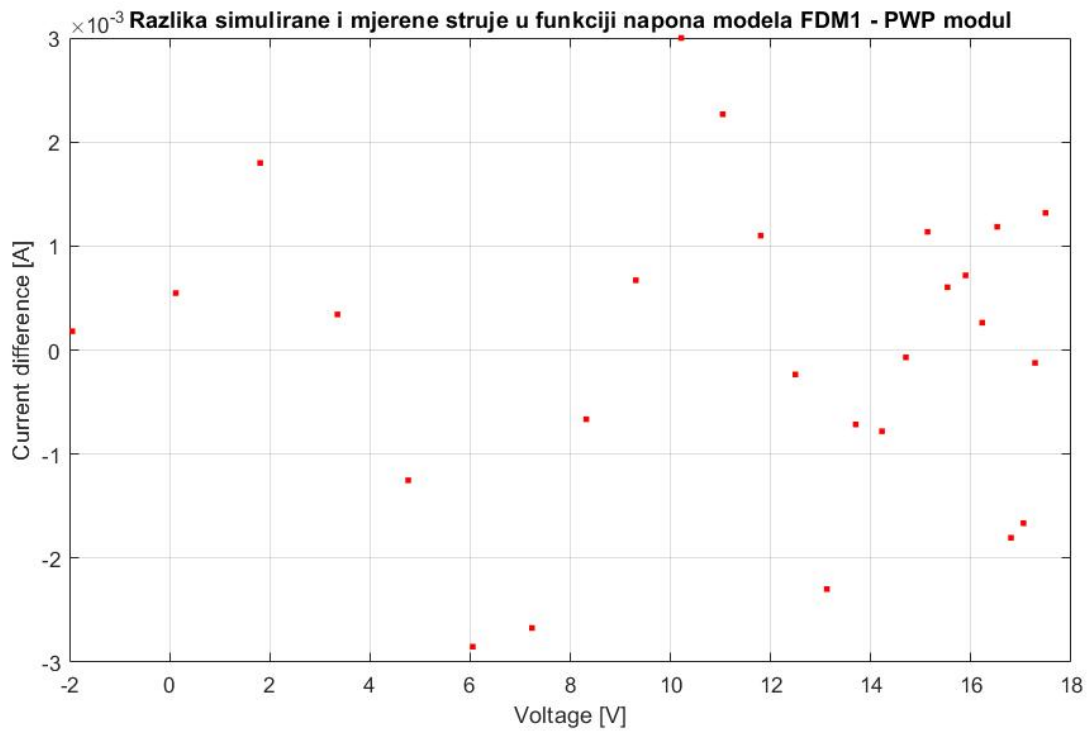
Slika 7.8 Razlika simulirane i mjerene struje u funkciji napona za model FDM2 – RTC France cell



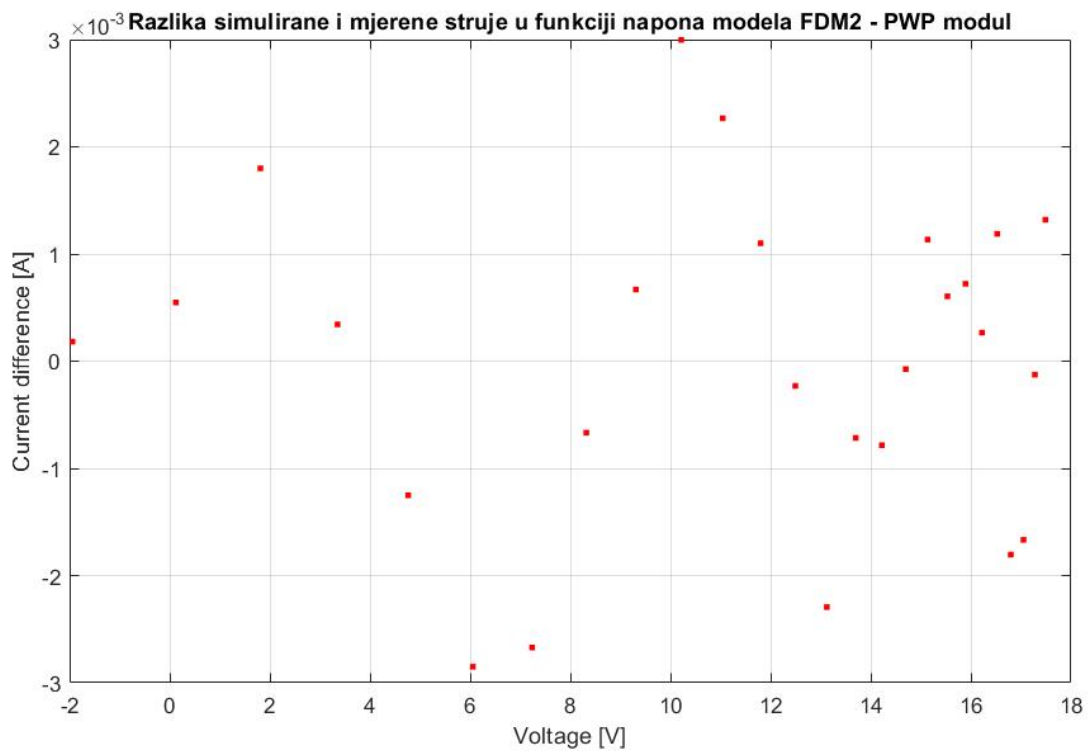
Slika 7.9 Razlika simulirane i mjerene struje u funkciji napona za model TDM1 – PWP modul



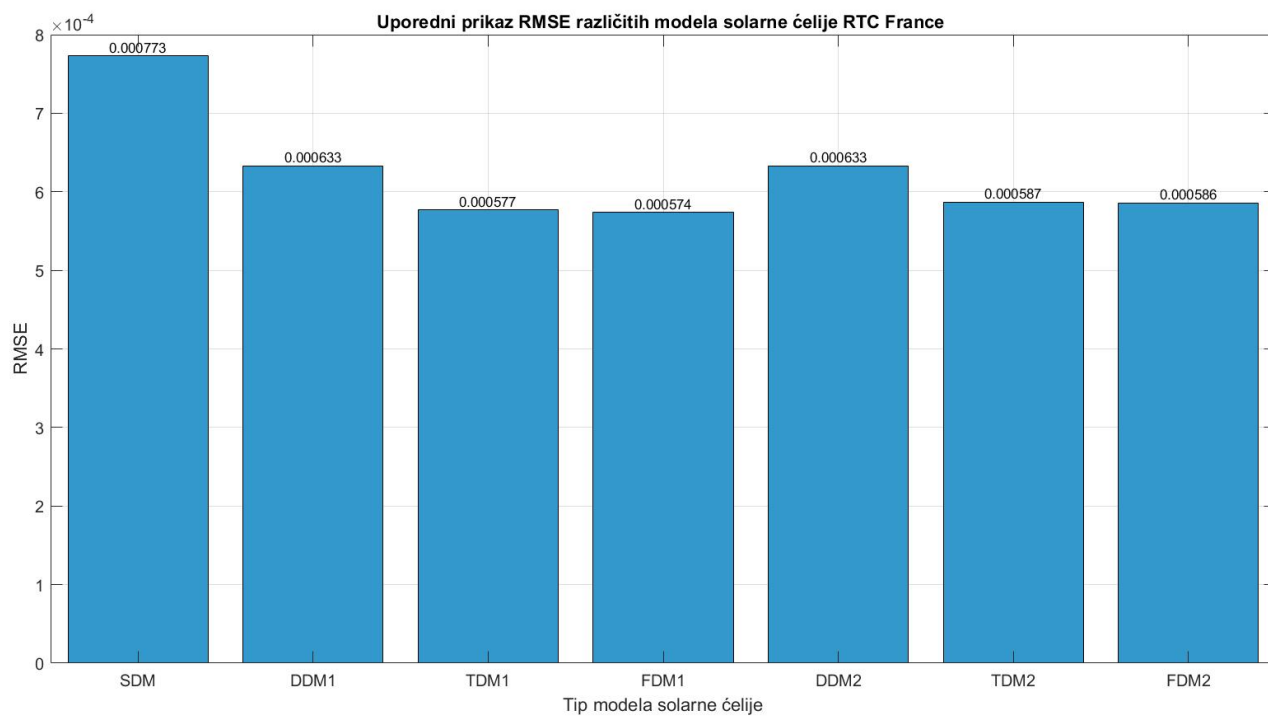
Slika 7.10 Razlika simulirane i mjerene struje u funkciji napona za model TDM2 – PWP modul



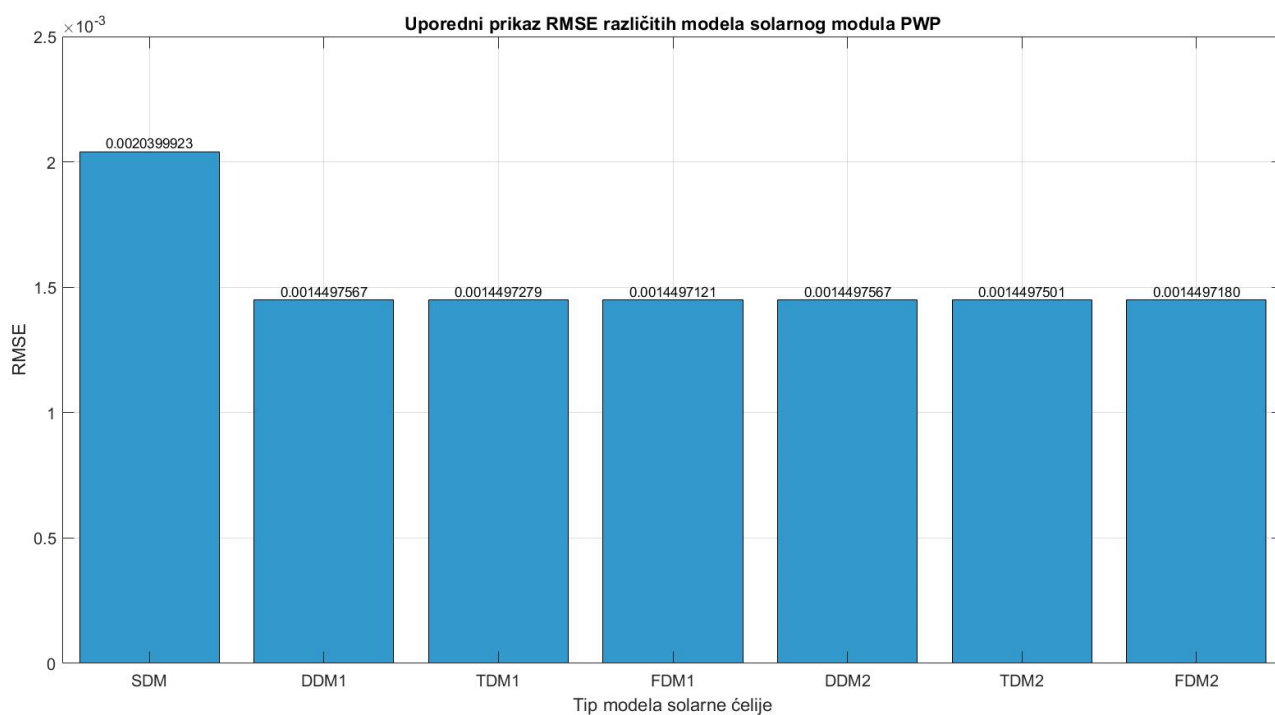
Slika 7.11 Razlika simulirane i mjerene struje u funkciji napona za model FDM1 – PWP modul



Slika 7.12 Razlika simulirane i mjerene struje u funkciji napona za model FDM2 – PWP modul



Slika 7.13 Uporedni prikaz RMSE različitih modela solarne ćelije RTC France



Slika 7.14 Uporedni prikaz RMSE različitih modela solarnog modula PWP

Tabela II - Procijenjena vrijednost parametara literaturno poznatih i predloženih aproksimativnih kola solarne ćelije - RTC France

model ćelije	I_{pv} (A)	I_{o1} (A)	n_1	I_{o2} (A)	n_2	I_{o3} (A)	n_3	I_{o4} (A)	n_4	R_p (Ω)	R_s (Ω)	RMSE
SDM	0.759738366	3.11E-07	1.47727							52.96286	0.036547	7.73E-04
DDM1	0.760353015	1.38E-07	1.33664	1.00E-05	2.2964596					58.10396	0.052321	6.33E-04
TDM1	0.760474316	8.48E-08	1.29555	1.00E-05	2.2810146	9.99E-05	4.434196			72.19509	0.055629	5.77E-04
FDM1	0.760465947	7.52E-08	1.28417	1.00E-13	1	3.22E-05	2.613212	2.71E-12	1	69.56473	0.054804	5.74E-04
DDM2	0.760353054	4.45E-08	1.33621	1.00E-05	2.2958116					58.10072	0.052381	6.33E-04
TDM2	0.760446122	3.71E-08	1.32184	1.00E-05	2.3109866	9.99E-05	4.682988			70.32854	0.052335	5.87E-04
FDM2	0.760493007	4.95E-09	1.20387	1.00E-05	2.4392236	1.33E-05	2.347002	0.0001	10	73.76228	0.067799	5.86E-04

Tabela III - Procijenjena vrijednost parametara literaturno poznatih i predloženih aproksimativnih kola solarnog modula – PWP

model	I_{pv} (A)	I_{o1} (A)	n_1	I_{o2} (A)	n_2	I_{o3} (A)	n_3	I_{o4} (A)	n_4	R_p (Ω)	R_s (Ω)	RMSE
SDM	1.028948863	2.50E-06	47.3988							7.51E+02	1.24E+00	0.0020399923
DDM1	1.031157485	2.53E-06	43.4644	7.75E-07	53					6.14E+02	1.648231	0.0014497567
TDM1	1.031149639	2.49E-06	43.4172	1.00E-13	53	1.00E-06	54			6.15E+02	1.656909	0.0014497279
FDM1	1.031156164	2.48E-06	43.3961	1.00E-16	53	1.01E-06	54	1.00E-16	52	6.15E+02	1.658742	0.0014497121
DDM2	1.031159384	6.08E-07	43.4645	7.75E-07	53					6.14E+02	1.64822	0.0014497567
TDM2	1.031159173	6.06E-07	43.4559	6.74E-07	53	1.30E-07	54			6.14E+02	1.649536	0.0014497501
FDM2	1.031157441	6.00E-07	43.4386	1.00E-16	25	8.70E-07	53.44286	1.00E-16	52	6.15E+02	1.652453	0.0014497180

ZAKLJUČAK:

U ovom master radu sprovedeno je sveobuhvatno istraživanje električnog modelovanja solarnih ćelija, sa fokusom na analizu standardnih i aproksimativnih višediodnih modela poznatih u relevantnoj literaturi. Analizirani su standardni jednodiodni model (SDM), literaturno poznati aproksimativni modeli DDM-1 i DDM-2, kao i predloženi trodiodni i četvorodiodni modeli koji predstavljaju novi pristup u preciznijem opisivanju radnih karakteristika solarnih ćelija.

Cilj rada bio je da se, kroz minimizaciju srednje kvadratne greške (RMSE), procijeni tačnost modela u simulaciji strujno-naponskih (I-U) i snaga-naponskih (P-U) karakteristika solarne ćelije i modula. Parametri su procjenjivani pomoću metaheurističkog algoritma Evaporation Rate Water Cycle Algorithm (ER-WCA), a svi proračuni su izvršeni u softverskom paketu MATLAB R2021a. Poseban značaj daje se činjenici da su svi modeli formulisani korišćenjem Lambert W funkcije, čime su omogućene matematički precizne relacije između napona i struje, bez dodatnih aproksimacija.

Dobijeni rezultati pokazuju da predloženi trodiodni i četvorodiodni modeli ostvaruju niže RMSE vrijednosti od dosadašnjih najboljih modela iz literature – DDM-1 i DDM-2 – koji su do sada važili za najpreciznije u smislu slaganja sa eksperimentalnim podacima. Poređenje je vršeno upravo u odnosu na te modele, a ne na standardne SDM ili DDM strukture, čime su predloženi modeli pokazali superiornost u preciznosti simulacije.

Rad takođe ukazuje na važnost pravilnog modelovanja gubitaka putem serijskih i paralelnih otpornika, jer oni imaju veliki uticaj na tačnost modela. Strukturne razlike kod aproksimativnih modela su se pokazale kao korisne u unapređenju podudarnosti sa eksperimentalnim karakteristikama. Ovi nalazi potvrđuju da standardni modeli često nisu dovoljni da adekvatno obuhvate kompleksnost fizičkih procesa unutar solarne ćelije, što opravdava uvođenje složenijih višediodnih struktura.

Ovo istraživanje daje važan doprinos savremenoj literaturi iz oblasti modelovanja solarnih ćelija. Razvijeni modeli ne samo da poboljšavaju tačnost simulacije, već otvaraju vrata za širu primjenu naprednih optimizacionih algoritama i analitičkih metoda u fotonaponskim tehnologijama. Posebno je značajan korak u pravcu razumijevanja kako broj dioda i njihova topologija u električnom modelu utiču na sposobnost modela da vjerno reprodukuje stvarne gubitke i rekombinacione mehanizme unutar ćelije.

U kontekstu praktične primjene, bolji modeli omogućavaju precizniju analizu performansi solarnih modula, što je ključno za optimizaciju rada fotonaponskih sistema, povećanje efikasnosti i smanjenje troškova u realnim uslovima.

Na osnovu postignutih rezultata, logičan pravac daljeg istraživanja jeste razvoj n-diodnih modela solarnih ćelija. Cilj bi bio da se ispita kako dalji porast broja dioda utiče na tačnost modela i smanjenje RMSE. Neophodno je razviti sistematsku metodologiju za modelovanje n-diodnih kola i evaluaciju njihove efikasnosti kroz matematički precizne relacije, uz zadržavanje analitičke obradivosti. Poseban izazov predstavlja pronalazak optimalne tačke kompleksnosti modela – kada dodavanje nove diode više ne donosi značajna poboljšanja u tačnosti. Pored toga, budući rad može uključivati:

- Evaluaciju novih modela na različitim tipovima solarnih ćelija i modula,
- Prilagođavanje modela za rad u dinamičkim (promjenjivim) uslovima osvjetljenja i temperature.

LITERATURA:

- [1] Ma J, Hong D, Wang K, Bi Z, Zhu X, Zhang J. Analytical modeling and parameter estimation of photovoltaic, strings under partial shading conditions. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 2022; 235: 111494.
- [2] Zhang Y, Gao S, Gu T. Prediction of I-V characteristics for a PV panel by combining single diode model and explicit analytical model. *Sol Energy*. 2017; 144: 349–355.
- [3] Louzazni M, Aroudam EH. An analytical mathematical modeling to extract the parameters of solar cell from implicit equation to explicit form. *Appl Sol Energy (English Transl Geliotekhnika)*. 2015; 51: 165–171.
- [4] Easwarakhanthan T, Bottin J, Bouhouch I, Boutrit C. Nonlinear Minimization Algorithm for Determining the Solar Cell Parameters with Microcomputers. *Int J Sol Energy*. 1986; 4: 1–12.
- [5] Chan DSH, Phillips JR, Phang JCH. A comparative study of extraction methods for solar cell model parameters. *Solid State Electron*. 1986; 29: 329–337.
- [6] Oliva D, Abd Elaziz M, Elsheikh A.H, Ewees AA. A review on meta-heuristics method for estimating parameters of solar cells. *Elsevier B.V*. 2019; 0378-7753/©.
- [7] Rawa M, Abusorrah A, Al-Turki Y, Calasan M, Micev M, Ali ZM, et al. Estimation of Parameters of Different Equivalent Circuit Models of Solar Cells and Various Photovoltaic Modules Using Hybrid Variants of Honey Badger Algorithm and Artificial Gorilla Troops Optimizer. *Mathematics*. 2022; 10: 1057.
- [8] Zhou W, Wang P, Heidari A.A, Zhao X, Turabieh H, Chen H. Random learning gradient based optimization for efficient design of photovoltaic models. *Energy Convers Manag*. 2021; 230: 113751.
- [9] Long W, Wu T, Xu M, Tang M, Cai S. Parameters identification of photovoltaic models by using an enhanced adaptive butterfly optimization algorithm. *Energy*. 2021; 229: 120750.
- [10] Liu Y, Heidari A.A, Ye X, Chi C, Zhao X, Ma C, et al. Evolutionary shuffled frog leaping with memory pool for parameter optimization. *Energy Reports*. 2021; 7: 584–606.
- [11] Naeijian M, Rahimnejad A, Ebrahimi S.M, Pourmousa N, Gadsden S.A. Parameter estimation of PV solar cells and modules using Whippy Harris Hawks Optimization Algorithm. *Energy Reports*. 2021; 7:4047–4063.
- [12] Saadaoui D, Elyaqouti M, Assalaou K, Ben hmamou D, Lidaighbi S. Parameters optimization of solar PV cell/module using genetic algorithm based on non-uniform mutation. *Energy Convers Manag X*. 2021; 12: 100129

- [13] Liu Y, Heidari AA, Ye X, Liang G, Chen H, He C. Boosting slime mould algorithm for parameter identification of photovoltaic models. *Energy*. 2021; 234: 121164.
- [14] Čalasan M, Shady H.E. Abdel A, F. Zobaa A. A new approach for parameters estimation of double and triple diode models of photovoltaic cells based on iterative Lambert W function. *International Solar Energy Society*. 2021; 218: 02.038: 392-412.
- [15] Almodfer R, Mudhsh M, Alshathri S, Yousri D, Abualigah L, Hassan OF, Abd Elaziz M. Chaotic honey badger algorithm for single and double photovoltaic cell/module. *Solar Energy*. 2022; 1011887.
- [16] Tariq Kiani A, Faisal Nadeem M, Ali Ahmed, Ali Sajjad I, Sohaib Haris M, Martiano L. Optimal Parameter Estimation of Solar Cell using Simulated Annealing Inertia Weight Particle Swarm Optimization (SAIW-PSO). *EEEIC/I&CPS Europe*. 2020; 9160531.
- [17] Zaid M. Ali, Čalasan M, Mostafa H.M, Shady H. E, Aleem A. Analytical modeling of novel equivalent circuits of double diode solar cell circuits using a special transcendental function approach. *PLoS ONE*, 2024; 19(11) ; 0313713.
- [18] Ž. Đurišić, J. Mikulović, “Solarna energetika”, Akademska misao, Beograd, 2019.
- [19] I. M. Babić, “Modelovanje uticaja vremenskog profila solarnog zračenja na efekte rada fotonaponskih sistema u elektroenergetskom sistemu”, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, 2016.
- [20] D. Mikičić, A. Kunosić, Ž. Đurišić, “Atlas – Energetski potencijal Sunca”, Elektrotehnički fakultet, jun 2006
- [21] D. Gajić, “Fizika Sunca”, Prosveta, Niš, 2005, ISBN 86-83481-29-8
- [22] R. Messenger, J. Ventre, “Photovoltaic systems engineering, CRC Press”, Taylor & Francis Group, USA, 2010.
- [23] D. Chiras, R. Aram, K. Nelson, “Power from the sun-achieving energy independence”, New society publishers, Canada, 2009.
- [24] G. Master, “Renewable and Efficient Electric Power Systems”, Stanford University, John Wiley & Sons, New Jersey, 2004 ISBN 0-471-28060-7.
- [25] V. Durković, “Razvoj novih tehničkih rešenja matematičkih modela za analizu proizvodnje fotonaponskih elektrana velike snage”, Elektrotehnički fakuleta, Univerzitet u beogradu, 2021.
- [26] Č. Zeljković, Obnovljivi izvori energije, “Solarna energetika. Univerzitet u Banja Luci – Beograd”, 2018.

- [27] J. Mikulović, Ž. Đurišić, R. Kostić, “Određivanje optimalnih nagibnih uglova fotonaponskih panela”, XII simpozijum Infoteh-Jahorina 2013, Ref ENS-3-7, Bosna i Hercegovina, mart 2013
- [28] M. Kacira, M. Simsek, Y. Babur, S. Demirkol, “Determining optimum tilt angles and orientation of photovoltaic panels in Sanliurf, Turkey”, *Renewable Energy* 29 (2004),1265-1275.
- [29] H. Yang, L. Lu, “ The optimum tilt angles and orientation of PV Claddings for Building-Integrated Photovoltaics (BIPV) Applications”, *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 129, May 2007, pp. 253-255.
- [30] E. Calabro, “Determining optimum tilt angles and orientation of photovoltaic panels at typical north-tropical latitudes”, *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 1, 033104, May 2009.
- [31] T. P. Chang, “The Sun’s apparent position and the optimal tilt angle of solar collector in northern hemisphere”, *Solar Energy*, Volume 83, Issue 8, August 2009, pp 1274-1284
- [32] M. Hiržin, “Analiza izgradnje i rada autonomne fotonaponske elektrane”, Završni rad br. 491/EL/2021
- [33] A. Đorđević, “Mrežni fotonaponski sistemi”, Završni rad, modul Elektroenergetika, Niš, oktobar 2019. godine.
- [34] U. Eicker, “Solar Technologies for Buildings”, John Wiley & sons Ltd. 2011.
- [35] V. Quaschnig “Understanding renewable energy systems”, Earthscan UK and USA 2005. ISBN 1-84407-128-6 paperback, 1-84407-136-7 hardback.
- [36] Ž. Đurišić, D. Kotur, N. Šijaković, A. Sretenović, “Hibridni solarno-električni sistemi za unapređenje energetske efikasnosti u pripremi I korišćenju sanitarne tople vode u domaćinstvima”, Infoteh-Jahorina 2018, Mart 2018.
- [37] M. Milanković, D. Perić, I.V. Naumovska, “Osnovi elektroenergetike”, Visoka škola elektrotehnike i računarstva strukovnih studija, Beograd 2016.
- [38] Solanki, C.S. “Solar Photovoltaics: Fundamentals, Technologies and applications”, 3rd ed. New Delhi: McGraw Hill Education.
- [39] J. Nelson, “The physics of solar cells”, London, Imperial Collage press, 2003.
- [40] Luque A. Hegedus S. “Handbook of photovoltaic science and engineering”, 2nd ed. Chichester: Wiley, 2011.
- [41] Neamen D.A. “Semiconductor physic and devices, basic principles”, McGraw Hill Education, New York, 2012.

- [42] Sze, S.M. & Ng, K.K., 2007. "Physics of Semiconductor Devices" 3rd ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- [43] Green, M.A. "Solar cells: Operating principles, technology, and system applications", Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall 1982.
- [44] J. Nelson, "Solar cells: materials, manufacture and operation" 2nd ed. Oxford: Elsevier. 2020.
- [45] Dupré O. Physics of the thermal behavior of photovoltaic devices. 2015.
- [46] Dupré O, Vaillon R, Green MA. "A full thermal model for photovoltaic devices. Solar Energy." 2016;140:73-82.
- [47] Kaushika N, Rai A. "An investigation of mismatch losses in solar photovoltaic cell networks." Energy.2007;32(5):755-9.
- [48] Dupré O, Vaillon R, Green M. "Thermal Behavior of Photovoltaic Devices." Springer International Publishing, 2017.
- [49] Shang A, Li X. Photovoltaic Devices: "Opto-Electro-Thermal Physics and Modeling. Advanced materials." 2017; 29(8).
- [50] Wang A, Xuan Y. A detailed study on loss processes in solar cells. Energy. 2018; 144: 490–500.
- [51] Liu SH, Simburger EJ, Matsumoto J, Iii AG, Ross J, Nocerino J. "Evaluation of thin-film solar cell temperature coefficients for space applications. Progress in Photovoltaics Research & Applications." 2005;13(2):149–56.
- [52] Pavanello D, Virtuani A, Friesen G. "Overview of Temperature Coefficients of Different Thin Film Photovoltaic Technologies." Proc. 25th EU PVSEC. 2010;4248-4.
- [53] Koehl M, Heck M, Wiesmeier S, Wirth J. "Modeling of the nominal operating cell temperature based on outdoor weathering. Solar Energy Materials & Solar Cells." 2011;95(7):1638-46.
- [54] Kim N, Kim D, Kang H, Park Y-G. "Improved heat dissipation in a crystalline silicon PV module for better performance by using a highly thermal conducting backsheets. Energy." 2016;113:515-20.
- [55] Noro M, Lazzarin RM. "Solar cooling between thermal and photovoltaic: An energy and economic comparative study in the Mediterranean conditions. Energy." 2014;73:453-64.
- [56] Lun S xian, Wang S, Yang G hong, Guo T ting. "A new explicit double-diode modeling method based on Lambert W-function for photovoltaic arrays." Sol Energy. 2015; 116: 69–82

- [57] Muhsen DH, Ghazali AB, Khatib T, Abed IA. "Parameters extraction of double diode photovoltaic module's model based on hybrid evolutionary algorithm." *Energy Convers Manag* 2015; 105:552e61.
- [58] Elbaset AA, Ali H, Abd-El Sattar M. "Novel seven-parameter model for photovoltaic modules." *Sol Energy Mater Sol Cells* 2014; 130:442e55.
- [59] Yujie C, Yize S, Zhuo M. "An improved explicit double-diode model of solar cells: Fitness verification and parameter extraction." Elsevier Ltd, 2018;05:035.
- [60] Čalasan M, M.Ali Z, Mostafa H.M, Shady H.E, Aleem A. "Analytical modeling of novel equivalent circuits of double diode solar cell circuits using a special transcendental function approach." *PLoS ONE* 19(11): e0313713. 2024.
- [61] Tossa AK, Soro YM, Azoumah Y, Yamegueu D. "A new approach to estimate the performance and energy productivity of photovoltaic modules in real operating conditions." *Sol Energy* 2014; 110:543e60.
- [62] F_ebba DM, Bortoni EC, Oliveira AF, Rubinger RM. "The effects of noises on metaheuristic algorithms applied to the PV parameter extraction problem." *Sol Energy* 2020; 201:420e36.
- [63] Čalasan M, Abdel Aleem SHE, Zobaa AF. "On the root mean square error (RMSE) calculation for parameter estimation of photovoltaic models: a novel exact analytical solution based on Lambert W function." *Energy Convers Manag* 2020; 210:112716.
- [64] Chen Y, Sun Y, Meng Z. "An improved explicit double-diode model of solar cells: fitness verification and parameter extraction." *Energy Convers Manag* 2018; 169:345e58
- [65] Ridha H.M, Hizam H, Gomes C, Heidari A.A, Chen H, Ahmadipour M, Muhsen D.H, Alghairi M. "Parameters extraction of three diode photovoltaic models using boosted LSHADE algorithm and Newton Raphson method." 2021. Elsevier Ltd; 120136;
- [66] A. Savić, D. Šošić, G. Dobrić, M. Žarković, „Metode optimizacije: primena u elektroenergetici” Akademska misao, Beograd, 2018.
- [67] E. G. Talbi, „Metaheuristics: from design to implementation” Wiley, New Jersey, 2009.
- [68] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 6, no. 2, pp. 182–197, 2002, doi: 10.1109/4235.996017.
- [69] S. Das and P. N. Suganthan, "Differential evolution: A survey of the state-of-the-art," *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 15, no. 1, pp. 4–31, 2011, doi: 10.1109/TEVC.2010.2059031.
- [70] B. Wang, "A novel artificial bee colony algorithm based on modified search strategy and generalized opposition-based learning," *J. Intell. Fuzzy Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 1023–1037, 2015, doi: 10.3233/IFS-141386.

- [71] Y. del Valle, G. K. Venayagamoorthy, S. Mohagheghi, J.-C. Hernandez, and R. G. Harley, "Particle Swarm Optimization: Basic Concepts, Variants and Applications in Power Systems," *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 12, no. 2, pp. 171–195, 2008.
- [72] C. H. Yang, C. J. Hsiao, and L. Y. Chuang, "Linearly decreasing weight particle swarm optimization with accelerated strategy for data clustering," *IAENG Int. J. Comput. Sci.*, vol. 37, no. 3, 2010. 69
- [73] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis, "Grey Wolf Optimizer," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 69, pp. 46–61, 2014, doi: 10.1016/j.advengsoft.2013.12.007.
- [74] Q. Tu, X. Chen, and X. Liu, "Hierarchy Strengthened Grey Wolf Optimizer for Numerical Optimization and Feature Selection," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 78012–78028, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2921793.
- [75] M. Dorigo, V. Maniezzo, and A. Coloni, "Ant system: Optimization by a colony of cooperating agents," *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Part B Cybern.*, vol. 26, no. 1, pp. 29–41, 1996, doi: 10.1109/3477.484436.
- [76] P. W. Tsai and V. Istanda, "Review on cat swarm optimization algorithms," *2013 3rd Int. Conf. Consum. Electron. Commun. Networks, CECNet 2013 - Proc.*, pp. 564–567, 2013, doi: 10.1109/CECNet.2013.6703394.
- [77] X. Yang, S. Deb, and A. C. B. Behaviour, "Cuckoo Search via Levy Flights," *Ieee*, pp. 210–214, 2009
- [78] A. Sadollah, H. Eskandar, A. Bahreininejad, J. H. Kim, Water cycle algorithm with evaporation rate for solving constrained and unconstrained optimization problems, *Applied Soft Computing Journal* (2015), 2015.01.050.
- [79] A. Sadollah, J. H. Kim, H. Eskandar, H. M. Lee, Water cycle algorithm: A detailed standard code; Elsevier B.V. 2352-7110/c 2016

Izjava o istovjetnosti štampaue i elektronske verzije master rada

Ime i prezime autora Milena Bošković
Broj indeksa/upisa 10/21
Studijski program Elektroenergetski sistemi
Naslov rada Aproksimativna višediodna
ekvivalentna kola solarnih ćelija –
modelovanje i estimacija parametara
Mentor Prof. dr Martin Čalasan

Potpisani/a Milena Bošković

Izjavljujem

da je štampana verzija mog master rada istovjetna elektronskoj verziji koju sam predao/la za objavljivanje u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore.

Istovremeno izjavljujem da dozvoljavam objavljivanje mojih ličnih podataka u vezi sa dobijanjem akademskog naziva master nauka, kao što su ime i prezime, godina i mjesto rođenja, naslov master rada i datum odbrane rada.

U Podgorici, 22.09.2025. godine

Potpis magistranda

Milena Bošković

IZJAVA O KORIŠĆENJU

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku da u Digitalnom arhivu Univerziteta Crne Gore pohrani moj master rad pod nazivom:

" Aproksimativna višediodna ekvivalentna kola solarnih ćelija – modelovanje i estimacija parametara "

koji je moje autorsko djelo.

Master rad sa svim priložima predao/la sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moj master rad pohranjen u Digitalnom arhivu Univerziteta Crne Gore mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (*Creative Commons*) za koju sam se odlučio/la.

1. Autorstvo
2. Autorstvo – nekomercijalno
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade
4. Autorstvo – nekomercijalno – dijeliti pod istim uslovima
5. Autorstvo – bez prerade
6. Autorstvo – dijeliti pod istim uslovima

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci, kratak opis licenci dat je na poleđini lista).

U Podgorici, 22.09.2025. godine

Potpis magistranda



1. Autorstvo - Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.
2. Autorstvo - nekomercijalno. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu djela.
3. Autorstvo - nekomercijalno - bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, bez promjena, preoblikovanja ili upotrebe djela u svom djelu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu djela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja djela.
4. Autorstvo - nekomercijalno - dijeliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu djela i prerade.
5. Autorstvo - bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, bez promjena, preoblikovanja ili upotrebe djela u svom djelu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu djela.

Autorstvo - dijeliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu djela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda