

**SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I
BRODOGRADNJE**

**POSLIJEDIPLOMSKI DOKTORSKI STUDIJ
ELEKTROTEHNIKE I INFORMACIJSKE TEHNOLOGIJE**

KVALIFIKACIJSKI ISPIT

**MODELIRANJE FOTONAPONSKIH
SUSTAVA KORIŠTENJEM DIODNIH
MODELA**

Petar Marić

Split, srpanj 2025.

Sadržaj

1. UVOD	1
1.1. Fotonaponski sustavi i potrebe za modeliranjem	1
1.2. Motivacija	2
1.3. Izazovi u korištenju dvodiodnog modela.....	4
1.4. Opseg istraživanja i ciljevi.....	5
2. TEORETSKA POZADINA PRINCIPA RADA FN ČELIJA	7
2.1. Fizika fotonaponskih ćelija	7
2.2. Jednodiodni model.....	9
2.3. Dvodiodni model	12
2.4. Trodiodni model	15
2.5. Komparativna analiza jednodiodnog, dvodiodnog i trodiodnog modela	18
3. PREGLED LITERATURE: PRISTUPI U MODELIRANJU FN SUSTAVA DVODIODNIM MODELOM.....	21
3.1. Analitičke metode	21
3.2. Metaheurističke optimizacijske tehnike.....	24
3.3. Hibridni i numerički pristupi	27
3.4. Kritički osvrt na literaturu	30
4. EKSPERIMENTALNI PODACI I EVALUACIJSKE METRIKE U MODELIRANJU FN SUSTAVA	33
4.1. Zahtjevi eksperimentalnih podataka	33
4.2. Mjerila usporedbe i metrika validacije	33
5. ZAKLJUČAK.....	35
REFERENCE:.....	36
POPIS OZNAKA I KRATICA	40

1. UVOD

1.1. Fotonaponski sustavi i potrebe za modeliranjem

Brzi rast instalacije i primjene fotonaponskih (FN) sustava pokazao je koliko je bitno precizno i pouzdano modeliranje PV modula. Modeliranje FN modula ključno je za nekoliko faza projektiranja FN sustava, točno predviđanje performansi i učinkovitu dijagnostiku kvarova [1, 2]. Pouzdani FN modeli omogućuju istraživačima i inženjerima detaljnu analizu prinosa koja točno predviđa izlaznu snagu u različitim radnim uvjetima [3], što ih čini temeljnim alatima za proračun tehnoe ekonomske isplativosti projekta. Predviđanje ponašanja fotonaponskih sustava – posebno njihovih nelinearnih strujno-naponskih (I-V) karakteristika – izazovno je bez preciznih modela [4]. Stoga je korištenje pouzdanog i preciznog simulacijskog dizajna nužno prije stvarne instalacije samog FN sustava [4].

Kroz detaljne simulacije, precizno modeliranje pomaže u znatnom poboljšanju performansi FN sustava [2]. Štoviše, identifikacija parametara FN modela temeljena na izmjerenim strujno-naponskim vrijednostima ključna je za simulaciju, evaluaciju i upravljanje FN sustavima [5]. Precizna identifikacija parametara FN modula je posebno relevantna u slučajevima kada specifikacije proizvođača FN modula ne pružaju dovoljno informacija potrebnih za izradu potpunih modela baziranih na principu bijele, sive ili crne kutije. Stoga je precizan izračun ovih važnih parametara nužan za pouzdanu procjenu performansi modula i njihovo ponašanje u različitim radnim uvjetima [4]. Doista, glavni fokus mnogih istraživanja pri modeliranju FN sustava je sposobnost točnog predviđanja vrijednosti parametara FN modula ili FN ćelija [6]. Osim projektiranja i predviđanja performansi, točno modeliranje osobito je važno za dijagnostiku kvarova u FN sustavima jer pruža ključna upozorenja o mogućim katastrofalnim kvarovima, povećanim rizicima, pa čak i opasnostima od požara koje je obično teško spriječiti. Ova sofisticirana nadzorna sposobnost jamči integritet sustava i poboljšanu razinu učinkovitosti [1]. Štoviše, razumijevanje utjecaja fenomena poput djelomičnog zasjenjivanja na električni odziv i energetski prinos FN sustava uvelike ovisi o robusnim modelima. Kroz tehničku i istraživačku literaturu predlažu se brojni modeli različite složenosti, preciznosti i primjenjivosti koji doprinose istraživanju, predviđanju i ublažavanju takvih posljedica [7].

Zbog mogućnosti da prikažu nelinearno ponašanje I-V karakteristike FN modula, diodni modeli su jedan od najpraktičnijih alata za modeliranje FN ćelija i modula. Svaka od ovih konfiguracija diodnih modela – jednodiodni model, dvodiodni model i trodiodni model – nudi različite razine preciznosti i složenosti u opisivanju složenih fizikalnih pojava unutar FN ćelije [6]. Ovi modeli korisni su za usporedbu karakteristika FN ćelija i modula te za projiciranje njihovih strujno-naponskih karakteristika pri različitim intenzitetima svjetlosti te različitim vrijednostima temperature okoline [8], što im kao alatu za modeliranje daje određenu težinu.

Najčešće korišteni ekvivalentni krug FN ćelije ili modula, model s jednom diodom (SDM), poznat i kao model s pet parametara, pokazao se kao vrlo precizan i relativno jednostavan za komercijalnu primjenu [9, 10]. Iako je komercijalno uvelike korišten i dobro poznat, jednodiodni model uključuje implicitnu nelinearnu transcendentalnu jednadžbu koja se teško rješava analitički te stoga zahtijeva različite numeričke metode za ekstrakciju parametara [11]. Koristeći nove optimizacijske metode te njihove kombinacije, znanstveno-istraživačka zajednica kontinuirano pokušava pronaći što jednostavniji i što točniji način izračuna parametara jednodiodnog modela [12]. Uključivanjem druge diode kako bi se modelirali gubici rekombinacije u području osiromašenja, koje jednodiodni model obično zanemaruje, dvodiodni model (DDM) nadograđuje jednodiodni model SDM [13]. Ovaj model pruža poboljšanu točnost u modeliranju električnih karakteristika i fizikalnih efekata FN ćelija i FN modula, osobito pri niskim razinama inteziteta sunčeve dozračenosti [13,4]. Njegova sposobnost modeliranja složenijih fizikalnih pojava čini ga točnijim prikazom električnog ponašanja FN ćelije [15]. Uključivanjem treće diode, trodiodni model preciznije modelira učinke granica zrna i struje curenja u polikristaličnim FN ćelijama ili druge nedostatke [16, 17]. Ovaj model obično ima devet parametara i smatra se najtočnijim, iako je računalno najsloženiji [17,18]. Iako pokriva gotovo sve PV gubitke, izravan izračun njegovih devet parametara kompleksan je zbog nedostatka lako dostupnih podataka od proizvođača FN modula [18]. Izbor između ovih modela ovisi o željenoj ravnoteži između točnosti, računalnih troškova i specifične primjene koja može varirati ovisno o komercijalnim ili istraživačkim zahtjevima [6].

1.2. Motivacija

Jednodiodni model (SDM) ima inherentna ograničenja koja ograničavaju njegovu preciznost, posebno u određenim radnim uvjetima. Jedan od glavnih nedostataka jednodiodnog modela je zanemarivanje gubitaka rekombinacije koji se događaju u području osiromašenja p-

n spoja [13]. Ovi gubici, osobito pri niskim razinama inteziteta sunčeve dozračenosti i u određenim temperaturnim rasponima, mogu uzrokovati razlike između predviđanja modela i stvarnih performansi FN modula [15]. Koristeći se samo jednim eksponencijalnim članom, jednodiodni model pojednostavljuje vezu između struje i napona; međutim, nedovoljno modelira složenu dinamiku nosilaca, uključujući rekombinaciju nosilaca unutar područja prostornog naboja, što druga dioda može preciznije prikazati [6]. Štoviše, prikaz utjecaja temperature u jednodiodnom modelu može biti pretjerano pojednostavljen. Iako uključuje temeljne temperaturne ovisnosti za parametre poput reverzne struje zasićenja i fotostruje, on neće prikladno opisati suptilne promjene u I-V karakteristikama uzrokovane promjenama temperature, posebno one koje utječu na mehanizme rekombinacije [3]. Ovo može dovesti do manje preciznih predviđanja performansi kada FN moduli rade u uvjetima promjenjivih temperatura okoline [18]. Ograničenja modela postaju očitija u naprednim računalnim alatima kao što su praćenje točke maksimalne snage (MPPT) ili otkrivanje kvara, gdje čak i male nepreciznosti mogu uzrokovati podoptimalan rad sustava [1].

S druge strane, iako trodiodni model nudi najbolju teoretsku preciznost uključivanjem dodatne diode koja objašnjava pojave poput struja curenja ili učinaka granica zrna u polikristalnim ćelijama, njegova složenost predstavlja značajne računalne nedostatke [17]. Trodiodni model zahtijeva identifikaciju devet parametara, zbog čega je sam proces izračuna parametara znatno složeniji i računalno zahtjevniji od jednodiodnog ili dvodiodnog modela. S većim brojem nepoznatih parametara raste i težina optimizacijskog problema, što ponekad uzrokuje veće računalne troškove i duža vremena konvergencije algoritama za ekstrakciju parametara [18]. Nadalje, stvarnu upotrebu dodatno otežava činjenica da je fizički značaj svakog dodatnog parametra u trodiodnom modelu ponekad manje očit ili ga je teže empirijski provjeriti. Za mnoge praktične inženjerske primjene, marginalno poboljšanje preciznosti koje trodiodni model nudi u odnosu na dvodiodni model možda ne opravdava veliko povećanje računalnih zahtjeva i složenosti [6].

Dvodiodni model (DDM) predstavlja dobar kompromis, uravnotežujući preciznost i računalnu izvedivost. Njegova glavna prednost je poboljšana sposobnost opisivanja složenih fizikalnih pojava unutar FN ćelije koje jednodiodni model propušta [15]. Uključivanjem druge diode, on eksplicitno modelira struju rekombinacije u području osiromašenja, što je posebno važno za točan prikaz pri niskim razinama sunčeve dozračenosti gdje gubici rekombinacije postaju dominantniji [13]. To omogućuje dvodiodnom modelu da bude fizički točniji prikaz stvarnog ponašanja FN ćelije u širem rasponu radnih uvjeta [4]. Dvodiodni model (DDM)

obično uključuje sedam ili osam parametara, što ga čini prilično jednostavnim za različite metode identifikacije parametara bez velikih računalnih troškova povezanih s devetoparametarskim TDM-om [13]. Superiorna točnost u prikazu nelinearnih I-V karakteristika FN modula, posebno u području napona praznog hoda i pri niskim razinama inteziteta sunčeve dozračenosti, čini ga preferiranim izborom za aplikacije koje zahtijevaju sofisticiranije razumijevanje performansi FN sustava od onoga što jednodiodni model može pružiti [4]. Njegova sposobnost da pruži potpunu karakterizaciju ponašanja FN modula, uključujući suptilne temperaturne učinke i parazitne otpore, potiče njegovu široku primjenu u naprednoj analizi i dizajnu FN sustava [3]. Istraživačka zajednica je aktivno razvijala i usavršavala računalne metode za dvodiodni model, često integrirajući hibridna rješenja koja kombiniraju analitičke metode s optimizacijskim algoritmima kako bi postigli visoku točnost bez žrtvovanja brzine [15].

1.3. Izazovi u korištenju dvodiodnog modela

Dvodiodni model (DDM) pruža prednosti u točnijem prikazu performansi fotonaponskih modula, ali njegova primjena predstavlja značajne izazove. Ti izazovi proizlaze prvenstveno iz intrinzične nelinearnosti temeljnih jednadžbi, složenosti identifikacije parametara i povezanih računalnih troškova. I-V (struja-napon) odnos u dvodiodnom modelu definiran je visoko nelinearnim transcendentalnim jednadžbama, što izravno rješavanje za sedam ili osam nepoznatih parametara čini analitički nerješivim [13,15]. Precizna ekstrakcija ovih parametara iz proizvođačkih podatkovnih listova ili eksperimentalnih I-V krivulja zahtijeva korištenje složenih numeričkih metoda ili optimizacijskih algoritama [11]. S obzirom na implicitnu prirodu jednadžbe, izravna algebarska rješenja obično su nepraktična, zbog čega su istraživači prisiljeni koristiti iterativne metode osjetljive na početne uvjete i sklone problemima s konvergencijom [19].

Broj nepoznatih parametara, obično sedam: fotostruja, reverzne struje zasićenja diode 1 i diode 2, faktori idealnosti diode 1 i diode 2, serijski otpor i paralelni otpor—dodatno komplicira procjenu parametara za dvodiodni model. Povećani broj parametara znatno proširuje prostor pretraživanja za optimizacijske algoritme, čime se povećavaju računalni troškovi [15]. Za razliku od petoparametarskog jednodiodnog modela, mnoge tradicionalne tehnike se bore s multimodalnom prirodom ciljne funkcije, gdje brojni lokalni minimumi mogu zarobiti optimizacijske algoritme i spriječiti ih u pronalaženju globalnog optimuma [20]. Ova složenost često rezultira dužim računalnim vremenima, posebno u stvarnim aplikacijama ili

opsežnim simulacijama, što predstavlja ograničenje [11]. Nužnost za preciznim i robusnim metodama identifikacije parametara potaknula je istraživanja brojnih metaheurističkih optimizacijskih metoda i hibridnih tehnika [15].

Još jedan veliki izazov korištenja dvodiodnog modela je njegova osjetljivost na radne uvjete, posebno na intezitet sunčeve dozračenosti i temperaturu. Učinkovitost FN modula snažno ovisi o tim uvjetima; stoga precizno modeliranje zahtijeva točnu karakterizaciju utjecaja tih čimbenika na sedam nepoznatih parametara [21]. Varijacije u intezitetu sunčeve dozračenosti ne utječu samo na fotostruju nego i suptilno djeluju na karakteristike diode i parazitne otpore [22]. Slično, temperaturne varijacije utječu na energiju zabranjenog pojasa poluvodičkog materijala, što zauzvrat mijenja reverzne struje zasićenja i faktore idealnosti dioda, utječući na cjelokupnu I-V krivulju [22].

Ispravno modeliranje ovih ovisnosti i ekstrakcija parametara koji ostaju relevantni u širokom spektru radnih uvjeta predstavlja složen izazov. Standardni testni uvjeti (STC) proizvođača često su neadekvatni jer FN moduli rijetko rade pod tim idealnim uvjetima u stvarnom okruženju [4]. Stoga modeli moraju biti dovoljno robusni da upravljaju različitim temperaturama i dozračenošću, što obično zahtijeva određivanje temperaturnih koeficijenata za ključne varijable [19]. Točnost izvedenih parametara može značajno varirati pri skaliranju na različite uvjete inteziteta dozračenosti, naglašavajući potrebu za algoritmima koji dobro funkcioniraju u laboratorijskim i radnim uvjetima [8]. Ova osjetljivost zahtijeva napredne metode identifikacije parametara koje mogu uzeti u obzir ove okolišne promjene i osigurati kontinuiran i pouzdan skup parametara modela [19].

1.4. Opseg istraživanja i ciljevi

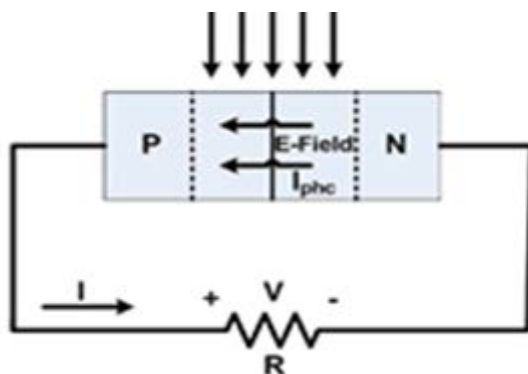
Glavni cilj ovog kvalifikacijskog rada bio je napraviti sintezu trenutnog stanja tehnika modeliranja FN modula korištenjem ekvivalentnog dvodiodnog modela, koji predstavlja robusnu ravnotežu između fizičke točnosti i računalne složenosti, rješavajući ograničenja jednostavnijih jednodiodnih modela, a izbjegavajući pretjerano računalno opterećenje trodiodnih modela. Fokus ovog istraživanja je razumijevanje brojnih tehnika korištenih za identifikaciju sedam ili osam nepoznatih parametara dvodiodnog modela – koji su ključni za predviđanje performansi FN sustava, razvoj učinkovitih sustava za pretvorbu solarne energije i dijagnostiku kvarova. Prepoznajući da izravna analitička rješenja za nelinearne jednadžbe dvodiodnog modela nisu lako dostupna, opseg istraživanja uključuje temeljit pregled i

analitičkih i numeričkih tehnika. Štoviše, pregled naglašava kako se metaheurističke optimizacijske tehnike poput genetičkih algoritama, optimizacije rojem čestica i diferencijalne evolucije koriste za prevladavanje prepreka koje predstavljaju nelinearnost dvodiodnog modela i problem identifikacije više parametara. Hibridni pristupi, koji kombiniraju prednosti analitičkih metoda s robusnošću optimizacijskih algoritama, također su kritički ispitani u pogledu njihove učinkovitosti u ubrzanju konvergencije i povećanju preciznosti. Ovaj temeljit pregled nastoji pružiti istraživačima u području korisnu referencu, otkrivajući uvid u prednosti, nedostatke, kompromise i trenutne trendove u ekstrakciji parametara dvodiodnog modela. Kombinirajući podatke iz brojnih akademskih radova, ovaj pregled ima za cilj istaknuti moguće smjerove za buduća istraživanja i razvoj u modeliranju i karakterizaciji FN sustava.

2. TEORETSKA POZADINA PRINCIPA RADA FN ČELIJA

2.1. Fizika fotonaponskih ćelija

Fotonaponske (FN) ćelije rade na temelju osnovnih koncepata fizike poluvodiča. Idealna FN ćelija prikazana je na slici 2.1. [4]. Fotonapon se uglavnom odnosi na formiranje p-n spoja i na to što se događa s nositeljima naboja kada na njih dođe sunčeva svjetlost. Općenito, FN ćelija sastoji se od dva sloja poluvodiča, najčešće silicija, koji su dopirani različitim nečistoćama kako bi jedna strana postala p-tip (pozitivna), a druga n-tip (negativna)[6]. Na mjestu gdje se ta dva sloja spajaju formira se p-n spoj, koji stvara posebno područje zvano zona osiromašenja, zona u kojoj praktički nema slobodnih nosioca naboja. Unutar te zone osiromašenja pojavljuje se unutarnje električno polje jer elektroni s n-strane prelaze na p-stranu, a šupljine s p-strane prelaze na n-stranu. Ovo kretanje stvara tzv. ugrađenu potencijalnu barijeru [6].



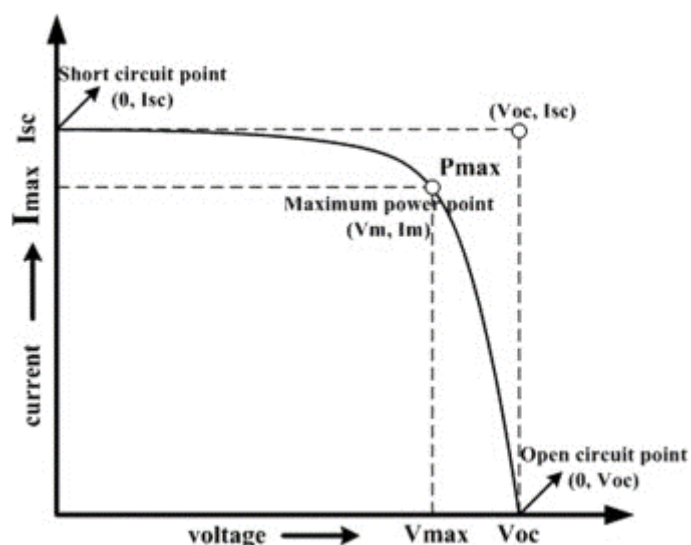
Slika 2.1. Fotonaponska ćelija

Sunčeva svjetlost sastoji se od fotona, a kada ti fotoni s dovoljno energije udare u solarnu ćeliju (FN ćeliju), događa se njihova apsorpcija. Ta apsorpcija daje elektronima dodatnu energiju, zbog čega oni prelaze iz valentnog pojasa u vodljivi pojas. Taj process možemo zamisliti kao davanje startnog potiska elektronima, stvarajući ono što nazivamo parovima elektron-šupljina [6]. Unutar FN ćelije postoji električno polje koje razdvaja te novonastale elektrone i šupljine: elektroni idu prema n-strani, a šupljine prema p-strani. Ovo razdvajanje naboja stvara napon preko p-n spoja ćelije, a taj napon proizvodi fotostruju (I_{ph}). U idealnim uvjetima, što više sunčeve svjetlosti pogodi FN ćeliju, to bi fotostruja trebala biti jača [6]. Ukoliko spojimo FN ćeliju na električni krug, ti razdvojeni naboji teku kroz električni krug, stvarajući električnu energiju koju možemo koristiti [6].

Nije svaki par elektron-šupljina koji nastane koristan za električnu struju koja izlazi iz FN ćelije. Neki od tih parova ponovno se spoje prije nego što budu prikupljeni, što smanjuje

učinkovitost ćelije. To ponovno spajanje, odnosno "rekombinacija", može se dogoditi na nekoliko načina: ponekad se pritom oslobađa svjetlost (radijativna rekombinacija), nekad se energija prenosi na drugog nositelja naboja (Augerova rekombinacija), a ponekad se događa zbog nesavršenosti ili stranih atoma unutar materijala ili na njegovoj površini (Shockley-Read-Hall ili SRH rekombinacija) [6]. Posljednje dvije vrste posebno su važne u praktičnim FN ćelijama, a modeli često koriste posebne diode u matematičkom opisu ekvivalentnog kruga kako bi ih uzeli u obzir.

Najveći utjecaj na učinkovitost fotonaponske (FN) ćelije imaju dva glavna okolišna čimbenika: intezitet sunčeve dozračenosti i temperatura. Što se tiče utjecaja sunčeve dozračenosti na izlaznu snagu FN ćelije ili FN modula, sunčeva dozračenost označava snagu po jedinici površine koja dolazi do nas od Sunca. Kada intezitet dozračenosti raste, više fotona pogada FN ćeliju, što dovodi do višeg stupnja proizvodnje parova elektron-šupljina. To izravno povećava vrijednost fotostruju (I_{ph}) koju proizvodi FN ćelija. Kao rezultat, i struja kratkog spoja (I_{sc}) i maksimalna izlazna snaga (P_{MP}) FN modula rastu proporcionalno povećanju inteziteta sunčeve dozračenosti [21]. Napon praznog hoda (V_{oc}) također raste s porastom inteziteta dozračenosti, ali je njihov odnos logaritamski. To znači da se na višim razinama sunčeve dozračenosti stabilizira i manje je osjetljiv u usporedbi sa strujom. Kao posljedica toga, u uvjetima djelomičnog zasjenjenja, I-V i P-V karakteristike FN modula ili FN ćelije postaju prilično složene zbog prisutnosti višestrukih vrhova, što zahtijeva precizno modeliranje za predviđanje performansi. Strujno-naponska krivulja (I-V krivulja) FN ćelije prikazana je na slici 2.2.

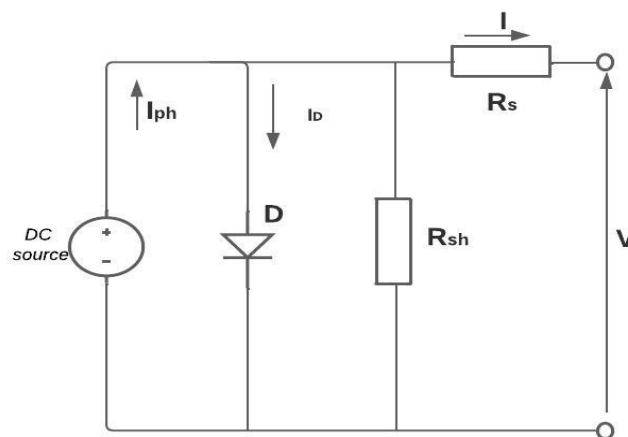


Slika 2.2. Strujno-naponska karakteristika FN ćelije ili FN modula

Utjecaj temperature na izlaznu snagu FN ćelije ili FN modula: Temperatura ima nezgodnu i uglavnom štetnu ulogu u učinkovitosti FN ćelija. Kada se FN ćelija zagrijava, događa se niz promjena. Jedna od ključnih je ta da napon praznog hoda (V_{oc}) opada linearno sa rastom temperature [22]. Taj pad uglavnom se događa zato što raste reverzna struja zasićenja diode, koja postaje značajna na višim temperaturama, a energija zabranjenog pojasa poluvodiča se blago smanjuje [22]. S druge strane, struja kratkog spoja (I_{sc}) obično raste s porastom temperature. To je zato što veće temperature općenito olakšavaju kretanje nositelja naboja i dodatno smanjuju energiju zabranjenog pojasa, pa više fotona može stvoriti parove elektron-šupljina [22]. No, u takvim slučajevima pad V_{oc} obično je veći od porasta I_{sc} , pa je rezultatni učinak taj da maksimalna izlazna snaga (P_{MP}) opada sa rastom temperature. Opadanje izlazne snage FN modula s porastom temperature [22] je izuzetno važno uzeti u obzir pri projektiranju FN sustava i procjeni proizvodnje električne energije. Zato svaki dobar model performansi FN modula mora uzeti u obzir navedene temperaturne učinke kako bi točno predvidio rad FN modula u različitim uvjetima [3].

2.2. Jednodiodni model

Jednodiodni model, često nazivan i kao pet-parametarski model FN ćelije ili FN modula je prikazan na slici 2.3.



Slika 2.3. Ekvivalentni krug jednodiodnog modela

Jednodiodni model je najčešći i najosnovniji ekvivalentni model koji se koristi za prikaz fotonaponskih (FN) ćelija i modula. Njegova česta primjena polazi od njegove jednostavnosti ali i prilično precizne aproksimacije ponašanja FN modula dovoljne za različite primjene [9,

10]. U osnovi, on olakšava razumijevanje složenog ponašanja FN ćelije pretvarajući FN ćeliju ili FN modul u jednostavan električni krug.

Jednodiodni model FN ćelije ili FN modula sastoji se od sljedećih komponenti:

1. **Izvor fotostruje (I_{ph}):** Izvor poput idealne baterije koja stvara električnu energiju kada se apsorbira svjetlost. Što je više sunčeve svjetlosti, to više električne energije proizvodi. Obično se ta energija naziva svjetlosno generiranom električnom energijom [6].
2. **Jedna dioda (D):** Dioda koja je spojena uz izvor fotostruje i predstavlja električno ponašanje unutar p-n spoja, točnije rečeno struju rekombinacije. Djeluje kao jednosmjerni ventil za električnu energiju kada je propusno polarizirana [6].
3. **Otpor shunta (R_{sh}):** Poznat i kao paralelni otpor, on je spojen paralelno s diodom i izvorom fotostruje. On uzima u obzir električna curenja unutar p-n spoja, što može nastati zbog proizvodnih grešaka ili nečistoća. Visoka vrijednost R_{sh} znači manje curenja i bolju kvalitetu ćelije [9].
4. **Serijski otpor (R_s):** Ovaj otpor spojen je u seriju s cijelom paralelnom kombinacijom, koja uključuje izvor fotostruje, diodu i otpor shunta. On uzima u obzir unutarnje ohmske gubitke unutar FN ćelije, uključujući otpor samog poluvodičkog materijala, metalnih kontakata i međuspojeva [9]. Za visoku učinkovitost, poželjna je niska vrijednost R_s .

Opisne jednadžbe i ključni parametri:

Obično se opisuje sa sljedećom implicitnom nelinearnom transcendentnom jednadžbom [9,11].

$$I(V) = I_{ph} - I_s \exp\left(\frac{V+IR_s}{a_1 V_{th}}\right) - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

Koja se sastoji od sljedećih bitnih varijabli i parametara:

- **I (izlazna struja):** Struja na izlazu iz FN ćelije ili FN modula, sa mjernom jedinicom u Amperima.
- **V (izlazni napon):** Predstavlja napon na terminalima FN ćelije ili FN modula sa mjernom jedinicom u Voltima.
- **I_{ph} (fotostruja):** Struja koja se generira unutar FN modula prilikom izloženosti sunčevoj svjetlosti [6] sa mjernom jedinicom u Amperima

- **I_s (reverzna struja zasićenja diode):** Ovaj član predstavlja rekombinacijsku struju koja se generira u neutralnim dijelovima FN ćelije [6]. Mjeri se također u Amperima
- **R_s (serijski otpor):** Predstavlja unutarnji otpor FN modula tj. gubitke unutar FN modula zbog unutarnjeg otpora [9]. Mjeri se u Ohmima.
- **R_{sh} (otpor shunta):** Ovaj otpor predstavlja strujama curenja unutar FN modula [9] te se mjeri također u Ohmima.
- **n (factor idealnosti diode):** Eksperimentalno utvrđena konstanta koja definira odstupanje karakteristika diode ekvivalentnog kruga od idealne diode. Prema literature se kreće u rasponima između 1 i 2 [9].
- **V_t (termalni napon):** Mjeri se u Voltima, a određen je jednačbom kT/q , gdje:
 - o k : Boltzmannova konstanta, čija je vrijednost 1.3806×10^{-23} J/K (Joula po Kelvinu).
 - o T : Predstavlja apsolutnu temperaturu p-n spoja te se mjeri u Kelvinima.
 - o q : predstavlja naboj elektrona, te iznosi 1.602×10^{-19} C (Kulona).

Navedenih pet parametara (I_{ph} , I_s , n , R_s i R_{sh}) neophodni su za potpuno definiranje jednodiodnog modela i za precizno predviđanje ponašanja FN modula u različitim uvjetima [3].

Pristup jednodiodnom modeliranju FN ćelija ili FN modula uključuje niz pretpostavki koje pojednostavljaju mogu pojednostavniti postupak:

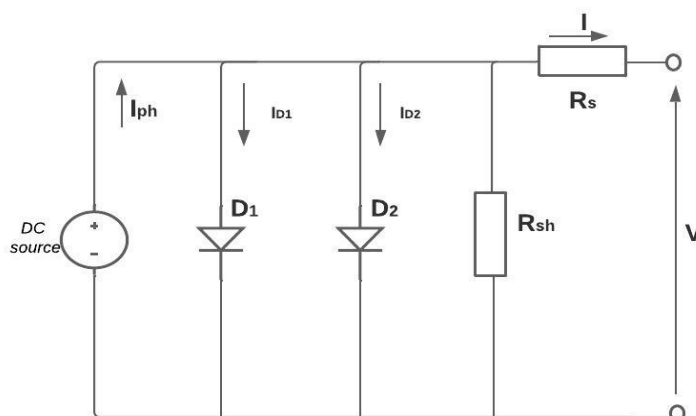
- **Jedna dioda za rekombinaciju:** Jednodiodni model koristi samo jednu diodu za predstavljanje svih načina rekombinacije elektrona i šupljina, uglavnom obuhvaćajući učinke difuzijske struje [6]. Međutim, ovaj pristup izostavlja rekombinaciju koja se događa u području osiromašenja, a ona ima važnu ulogu pri nižim intezitetima jakosti fotostruje [13].
- **Jedan fiksni faktor idealnosti:** Obično se pretpostavlja jedan, nepromjenjivi faktor idealnosti diode (n), bez obzira na radne uvjete, iako u stvarnosti ovaj faktor može varirati s promjenama napona i temperature [19].
- **Linearna povezanost fotostruje i inteziteta sunčeve dozračenosti:** Ovaj model uglavnom pretpostavlja da fotostruja I_{ph} linearno raste s intenzitetom sunčeve dozračenosti i često pretjerano pojednostavljuje njezine promjene s temperaturom [22].

- **Parazитni otpori su konstantni:** Serijski otpor R_s i otpor shunta R_{sh} pojednostavljaju se fiksnim omskim vrijednostima, bez obzira na moguće promjene s radnim uvjetima poput temperature ili struje [9].

Iako ove pretpostavke pojednostavljaju matematički postupak i identifikaciju parametara, mogu dovesti do fizikalnih netočnosti, posebno pri vrlo niskim razinama osvijetljenosti ili kada je potrebna iznimna preciznost [6]. Unatoč tim nedostacima, jednodiodni model je i dalje koristan alat za procjenu performansi i služi kao temelj za razvoj složenijih modela, postižući dobru ravnotežu između točnosti i jednostavnosti izračuna [6].

2.3. Dvodiodni model

Ekvivalentni krug dvodiodnog modela, prikazan na slici 2.5, napredniji je ekvivalentni strujni krug koji se koristi za fotonaponske (FN) ćelije i module. Razvijen je kako bi prevladao neka ograničenja jednostavnijeg jednodiodnog modela. Dvodiodni model preciznije opisuje električno ponašanje FN ćelija posebno uzimajući u obzir gubitke rekombinacije koje je jednodiodni model sklon zanemarivanju [13, 15].



Slika 2.4. Ekvivalentni krug dvodiodnog modela FN ćelije

Dvodiodni model nastavlja se na jednodiodni model uvođenjem druge diode koja je spojena paralelno s prvom diodom i izvorom fotostruje. Ovaj prošireni krug sastoji se od sljedećih komponenti:

1. **Izvor fotostruje (I_{ph}):** Kao i kod jednodiodnog modela, predstavlja električnu struju generiranu sunčevom osvjetljenošću
2. **Prva dioda (D1):** Ova dioda upravlja difuzijskom strujom unutar kvazineutralnih područja poluvodičkog materijala. Obično ima faktor idealnosti diode (n_1) blizu 1.
3. **Druga dioda (D2):** Ova dioda upravlja rekombinacijskom strujom unutar područja osiromašenja (poznatog i kao područje prostornog naboja) p-n spoja. Ovi rekombinacijski gubici postaju izraženiji pri nižim gustoćama struje i naponima. Faktor idealnosti diode (n_2) povezan s ovom diodom obično se kreće između 1 i 2, a kod silicija često je bliži vrijednosti 2 [13, 15].
4. **Otpor shunta (R_{sh}):** Paralelni otpor, on je spojen paralelno s diodama i izvorom fotostruje. On uzima u obzir električna curenja unutar p-n spoja, što može nastati zbog proizvodnih grešaka ili nečistoća.
5. **Serijski otpor (R_s):** Otpor spojen je u seriju s cijelom paralelnom kombinacijom, koja uključuje izvor fotostruje, diode i otpor shunta. On uzima u obzir unutarnje ohmske gubitke unutar FN ćelije, uključujući otpor samog poluvodičkog materijala, metalnih kontakata i međuspojeva [9].

U dvodiodnom modelu ukupna struja definirana je zbrojem pojedinačnih struja komponenti. Konačni rezultat je znatno kompleksnija, nelinearna i transcendentna jednadžba u usporedbi s onom kod jednodiodnog modela [13,4].

$$I(V) = I_{ph} - I_{s1} \exp\left(\frac{V+IR_s}{n_1 V_{th}}\right) - I_{s2} \exp\left(\frac{V+IR_s}{n_2 V_{th}}\right) - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (2)$$

gdje :

- **I:** Predstavlja električnu energiju koja teče iz FN ćelije ili FN modula a mjerei se u Amperima.
- **V:** Predstavlja napon, ili električni potencijal na terminalima FN ćelije koji se mjeri u Voltima.
- **I_{ph} :** Struja koja se generira unutar FN modula prilikom izloženosti sunčevoj svjetlosti [6] sa mjernom jedinicom u Amperima
- **I_{s1} :** Reverzna struja zasićenja prve diode, koja je povezana sa difuzijom elektrona a izražena je u Amperima
- **I_{s2} :** Reverzna struja zasićenja druge diode koja predstavlja rekombinacijsku struju u FN ćeliji, izražena također u Amperima.

- n_1 : Faktor idealnosti prve diode koji nam definira koliko blisko se dioda ponaša u odnosu na idealnu diodu.
- n_2 : Slično kao kod faktora idealnosti n_1 s tim što služi za definiranje druge diode.
- R_s : Serijski otpor, koji se može promatrati kao sila trenja koja usporava tok električne energije unutar FN modula. Mjeri se u Ohmima.
- R_{sh} : Otpor shunta, koji se može promatrati i kao tok curenja električne energije unutar FN modula. Mjeri se u Ohmima.
- V_t : Termalni napon, koji se mjeri u Voltima, a određen je jednačinom kT/q

Ovaj model obično ima sedam glavnih parametara koje treba odrediti: I_{ph} , I_{s1} , n_1 , I_{s2} , n_2 , R_s i R_{sh} [1]. Ponekad se pretpostavlja da su R_s i R_{sh} konstantni, ili se jedan od faktora idealnosti može fiksirati. Ovo mijenja broj parametara koji su stvarno 'nepoznati' i zahtijevaju identifikaciju [4].

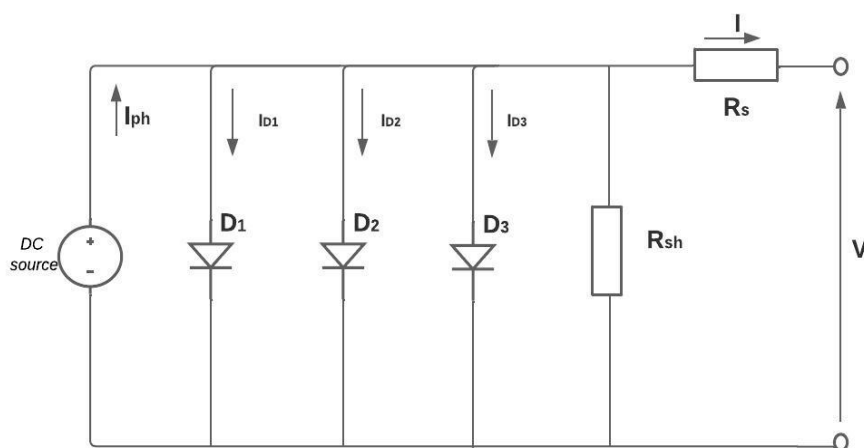
Važnost faktora idealnosti dioda (n_1 , n_2) i njihovo fizikalno značenje: Faktori idealnosti dioda igraju ključnu ulogu u oblikovanju strujno-naponske (I-V) krivulje te pružaju uvid u fizikalne procese koji se odvijaju unutar poluvodičkog uređaja.

- **n_1 (faktor idealnosti prve diode):** Ovaj faktor obično se kreće blizu vrijednosti 1. On odražava rekombinaciju nosilaca koja se događa u neutralnim područjima uređaja, prvenstveno kroz difuziju. U savršenom p-n spoju, $n_1 = 1$ ukazuje da je difuzija glavni pokretač strujnog toka [6]. Ako n_1 odstupa od 1, to ukazuje na druge procese ili nedostatke unutar volumena materijala koji utječu na struju.
- **n_2 (faktor idealnosti druge diode):** Ovaj faktor obično se kreće između vrijednosti 1 i 2, a kod silicijskih FN ćelija često je bliži 2. On predstavlja rekombinacijske događaje unutar područja prostornog naboja (poznatog i kao područje osiromašenja) p-n spoja. Ova rekombinacija prvenstveno je vođena Shockley-Read-Hall (SRH) mehanizmom, koji uključuje defekte unutar zabranjenog pojasa materijala [6]. Kada je n_2 jednak 2, to označava da je rekombinacija unutar područja osiromašenja dominantan proces koji upravlja strujom. Uključivanje ovog drugog dijela diode omogućuje dvodiodnom modelu preciznije prikazati ponašanje I-V krivulje pri niskom intenzitetu svjetlosti i naponima, gdje rekombinacija u području osiromašenja postaje značajnija [13].

Korištenjem dvije diode s različitim faktorima idealnosti, dvodiodni model može preciznije prikazati različite rekombinacijske procese unutar FN ćelije. Ovo rezultira pouzdanijim predviđanjem njezinih performansi, posebno pri nižim gustoćama struje i blizu napona otvorenog kruga [4].

2.4. Trodiodni model

Trodiodni model, prikazan na slici 2.7, predstavlja najnapredniji i najdetaljniji način simulacije fotonaponske (FN) ćelije ili modula pomoću ekvivalentnog strujnog kruga. Dizajniran je da preciznije prikaže fizikalne procese i gubitke unutar ćelija u usporedbi s jednostavnijim modelima poput jednodiodnog ili dvodiodnog. Međutim, zbog svoje složenosti, teže je odrediti njegove parametre, a zahtijeva veću računalnu snagu [17, 18].



Slika 2.5. Ekvivalentni električni krug trodiodnog modela

Trodiodni model nadograđuje dvodiodni model dodavanjem treće diode, koja je spojena paralelno s ostale dvije diode i izvorom fotostruje. Sam ekvivalentni krug trodiodnog modela sastoji se od:

1. **Izvor fotostruje (I_{ph}):** Kao kod jednodiodnog i dvodiodnog modela, predstavlja električnu struju generiranu sunčevom osvjetljenošću
2. **Prva dioda (D1):** Ova dioda predstavlja difuzijsku struju unutar kvazineutralnih područja poluvodičkog materijala. Obično ima faktor idealnosti diode (n_1) blizu 1.
3. **Druga dioda (D2):** Ova dioda predstavlja rekombinacijsku struju unutar područja osiromašenja p-n spoja.

4. **Treća dioda (D3):** Ova dodatna dioda služi za modeliranje složenijih efekata FN ćelije. Primjerice, u polikristalnim silicijskim ćelijama može predstavljati rekombinaciju na granicama zrna. Također može označavati struje curenja na rubovima ćelije, kratkospojnost uzrokovanu materijalnim nedostacima ili površinsku rekombinaciju koju prve dvije diode ne obuhvaćaju u potpunosti [18].
5. **Otpor shunta (R_{sh}):** Paralelni otpor koji predstavlja električna curenja unutar p-n spoja.
6. **Serijski otpor (R_s):** Otpor koji uzima u obzir unutarnje ohmske gubitke unutar FN ćelije.

Matematička jednadžba koja opisuje odnos struje i napona (I-V) u trodiodnom modelu prilično je zamršena. Budući da trodiodni model koristi ne jedan, ne dva, već tri eksponencijalna člana, što ga čini znatno složenijom i nelinearnom, kao što je navedeno u relevantnoj literaturi [17].

$$I(V) = I_{ph} - I_{s1} \exp\left(\frac{V+IR_s}{n_1 V_{th}}\right) - I_{s2} \exp\left(\frac{V+IR_s}{n_2 V_{th}}\right) - I_{s3} \exp\left(\frac{V+IR_s}{n_3 V_{th}}\right) - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (3)$$

U jednadžbi (3) trodiodnog modela FN ćelije :

- **I:** Predstavlja električnu energiju koja teče iz FN ćelije ili FN modula a mjeri se u Amperima.
- **V:** Predstavlja napon, ili električni potencijal na terminalima FN ćelije koji se mjeri u Voltima.
- **I_{ph} :** Struja koja se generira unutar FN modula prilikom izloženosti sunčevoj svjetlosti sa mjernom jedinicom u Amperima
- **I_{s1} :** Reverzna struja zasićenja prve diode, koja je povezana sa difuzijom elektrona a izražena je u Amperima
- **I_{s2} :** Reverzna struja zasićenja druge diode koja predstavlja rekombinacijsku struju u FN ćeliji, izražena također u Amperima.
- **I_{s3} :** Reverzna struja zasićenja treće diode koja modelira složenije efekte u FN ćeliji, izražena također u Amperima.
- **n_1, n_2, n_3 :** Faktori idealnosti prve, druge i treće diode
- **R_s :** Serijski otpor, koji se može promatrati kao sila trenja koja usporava tok električne energije unutar FN modula. Mjeri se u Ohmima.

- **R_{sh}** : Otpor shunta, koji se može promatrati i kao tok curenja električne energije unutar FN modula. Mjeri se u Ohmima.
- **V_t** : Termalni napon, koji se mjeri u Voltima, a određen je jednačinom kT/q

Ovaj model ima devet parametara: I_{ph} , I_{s1} , n_1 , I_{s2} , n_2 , I_{s3} , n_3 , R_s i R_{sh} [17] [18]. Prisutnost toliko parametara je korisna jer omogućuje modelu da preciznije oponaša stvarne eksperimentalne podatke prikupljene pod različitim radnim uvjetima. Ovo je posebno korisno kada se radi s naprednijim tehnologijama FN ćelija [18].

Uloga i značaj faktora idealnosti dioda n_1 , n_2 i n_3 :

- **n_1 (faktor idealnosti prve diode)**: Ovaj faktor obično je oko 1 i odražava difuzijsku struju u neutralnim područjima, u biti opisujući rekombinaciju u volumenu materijala. Prikazuje kako se nosioci naboja kreću kroz p-n spoj pod idealnim uvjetima [6].
- **n_2 (faktor idealnosti druge diode)**: Općenito, n_2 je blizu 2 i označava rekombinacijsku struju unutar područja osiromašenja – možemo to zamisliti kao rekombinaciju koja se događa u području prostornog naboja. Ovaj faktor postaje važan zbog nesavršenosti unutar spoja koje potiču rekombinaciju elektrona i šupljina [6].
- **n_3 (faktor idealnosti treće diode)**: Značenje n_3 je nešto složenije i može uvelike varirati. Često se pojavljuje kada se radi sa specifičnim osobitostima ili defektima u fotonaponskoj (FN) ćeliji. Može predstavljati:
 - o **Rekombinacija na granicama zrna**: U FN ćelijama izrađenim od višekristalnog materijala, granice zrna mogu postati žarišta rekombinacije. Treći član faktora idealnosti diode omogućuje modeliranje dodatnih gubitaka uzrokovanih tim granicama [18].
 - o **Struje curenja**: Pri nižim naponima mogu nastati neželjene struje curenja. One se često pojavljuju zbog nesavršenosti na rubovima ćelija ili „kratkih spojeva“ (shunt putova), a treća dioda pomaže u modeliranju tih pojava [18].
 - o **Površinska rekombinacija**: U nekim slučajevima, n_3 može također obuhvatiti učinke rekombinacije koja se događa na površini ćelije, a koju prve dvije diode možda ne mogu u potpunosti opisati.

Iako trodiodni model pruža najtočniji i najdetaljniji prikaz fizičkih svojstava te ima najbolju podudarnost s eksperimentalnim rezultatima, veliki broj parametara čini

optimizacijski proces kompliciranijim i dugotrajnijim. Često zahtijeva sofisticirane algoritme kako bi se pronašlo optimalno rješenje [17, 18]. Ovaj proces identifikacije može biti narušen šumom u mjernim podacima i zaglaviti u lokalnim minimumima, stoga je teško jamčiti da dobiveni parametri imaju stvarni fizikalni smisao [20].

2.5. Komparativna analiza jednodiodnog, dvodiodnog i trodiodnog modela

Preciznost pri idealnim testnim uvjetima:

Precizan model fotonaponskog (PV) sustava ključan je za učinkovitu provedbu simulacijskih analiza [2]. Za procjenu karakteristika PV ćelija i panela, kao i za predviđanje njihovog strujno-naponskog (I-V) ponašanja, koriste se različiti modeli fotonaponskih uređaja [8]. Iako brojne tehnike uspijevaju održati visoku točnost pri izdvajanu parametara neovisno o uvjetima sunčeve dozačenosti, standardna je praksa procijeniti performanse pod standardnim testnim uvjetima (STC) [8]. Primjerice, tehnika za procjenu parametara PV modula s jednom diodom provodi se pod standardnim testnim uvjetima, što uključuje osvjetljenje od 1000 W/m^2 i temperaturu od 25°C [28]. Komparativne studije često se usredotočuju na modele s jednom diodom koji uključuju serijski i paralelni otpor, uspoređujući različite modele s stvarnim izmjerenim I-V krivuljama i onima koje daje proizvođač [3].

Dvodiodni model poznat je po tome što objašnjava učinke koje model s jednom diodom zanemaruje, poput rekombinacije nositelja naboja u zoni osiromašenja. To ga čini preciznijim i boljom refleksijom stvarnih performansi FN modula [10]. Istraživanja su redovito pokazivala da je dvodiodni model pouzdaniji od jednodiodnog u različitim FN tehnologijama i radnim uvjetima [4]. Trodiodni model pruža još veću točnost u odnosu na modele s jednom i dvjema diodama, osobito pri niskim razinama osvjetljenja [16]. Algoritam optimizacije kitova (WOA) korišten je za procjenu parametara za modele FN modula s jednom, dvije i tri diode. Njegova učinkovitost potvrđena je usporedbom rezultata simulacije s drugim metodama optimizacije [16]. U jednoj od studija, rezultati simulacije FN modula temeljenog na WOA uspoređeni su s eksperimentalnim podacima FN modula Kyocera KC200GT, čime je dokazana njegova učinkovitost usporedbom apsolutne pogreške struje s drugim modelima FN modula [17]. Odabir odgovarajućeg modela ključan je za precizno procjenjivanje ponašanja FN sustava u različitim uvjetima [7].

Robusnost pri scenarijima različitih radnih uvjeta:

Robusnost fotonaponskih (FN) modela postaje posebno važna u različitim radnim uvjetima, poput slabog osvjetljenja, djelomičnog zasjenjenja i promjenjivih temperatura. Kada je samo dio FN sustava zasjenjen, to značajno utječe na količinu proizvedene električne energije. Često dolazi do pojave više lokalnih točaka maksimalne snage (MPPT) umjesto samo jedne, što dovodi do slabijih performansi sustava i potencijalnog stvaranja vrućih točaka [7]. Na primjer, u urbanim sredinama zgrade i druge građevine mogu neujednačeno blokirati sunčevu svjetlost, uzrokujući zasjenu. Problemi koje djelomično zasjenjenje uzrokuje na FN sustavima postali su vrlo aktualna tema u ovom području [7].

Istraživanja pokazuju da su modeli s dvodiodni modeli bolji u razumijevanju ponašanja FN modula u složenim uvjetima. Točnost parametara određenih u jednom skupu uvjeta može se znatno promijeniti kada se primjenjuju na druge uvjete [8]. Parametri dobiveni pri slabom intenzitetu dozračenosti mogu imati upitno fizičko značenje, što doprinosi netočnostima u konvencionalnim metodama skaliranja. Iako je mnogo istraživanja provedeno na metodama za tipične vanjske uvjete osvjetljenja, njihova učinkovitost u uvjetima unutarnje rasvjete još nije temeljito ispitana [8]. Dodavanjem druge diode, dvodiodni model preciznije uzima u obzir efekte rekombinacije, koji su izraženiji pri promjenama svjetla i temperature, te tako daje vjerniji prikaz ponašanja modula [10]. Trodiodni model pruža još veću točnost, osobito pri niskim razinama dozračenosti, a eksperimentalni rezultati pokazuju da su pogreške za ovaj model ispod 0,5% [16, 17]. Ova povećana preciznost u različitim radnim uvjetima čini ove složenije modele ključnima za pouzdan dizajn i rad FN sustava.

Računalna složenost:

Identifikacija parametara za FN modele vrlo je zahtjevno i dobro istraženo područje, s mnoštvom različitih pristupa koji se razlikuju po preciznosti, složenosti i korisnosti [9]. Vrijeme i resursi potrebni za određivanje tih parametara mogu se znatno razlikovati ovisno o korištenoj metodi. Numeričke ili iterativne metode, iako su općenito vrlo točne, imaju i svoje nedostatke, poput poteškoća s inicijalizacijom i konvergencijom prema pravom rješenju, visokih računalnih troškova i ponekad vrlo složenih rješenja [6]. S druge strane, neiterativne metode za FN model s jednom diodom jednostavnije su i lakše za primjenu. One uključuju izravne korake izračuna bez potrebe za iteracijama, iako im je točnost obično samo umjerena [9].

Što FN model ima više parametara, to je s njim teže raditi [22]. Složenost različitih metoda za određivanje tih parametara može se procijeniti prema vremenu izračuna. Pokazalo se da ne postoji jedan savršen algoritam koji je najbolji u svemu, što znači da najbolji izbor ovisi o tome što je korisniku najvažnije [11]. Svaki pristup modeliranju PV sustava uključuje različitu ravnotežu između brzine, točnosti i jednostavnosti korištenja [6]. U stvarnim primjenama, osobito onima u stvarnom vremenu, poput praćenja točke maksimalne snage (MPPT), brzina je izuzetno važna. Optimizacijske metode, poput algoritma optimizacije kitova (WOA), vrlo su točne, ali mogu zahtijevati puno računalne snage za izvođenje [9]. Ipak, WOA je uspješno korišten za određivanje parametara FN modela s jednom, dvije i tri diode, a njegova učinkovitost dokazana je simulacijama i eksperimentima u različitim uvjetima okoline [16]. Sve to naglašava važnost pronalaženja dobre ravnoteže između točnih, složenih modela i onoga što je realno moguće izračunati u stvarnom vremenu.

Tablica 1. Usporedba karakteristika jednodiodnog, dvodiodnog i trodiodnog modela

	Jednodiodni model	Dvodiodni model	Trodiodni model
Komponente	Jedna dioda, serijski otpor (R_s), otpor shunta (R_{sh})	Dvije diode, serijski otpor (R_s), otpor shunta (R_{sh})	Tri diode, serijski otpor (R_s), otpor shunta (R_{sh})
Područje modeliranja	Modelira difuzijsku struju u kvazineutralnim područjima	Prva dioda: struja nastala difuzijom. Svrha druge diode je rekombinacijska struja u području osiromašenja.	Prva dioda: struja nastala difuzijom. Druga diode: rekombinacijska struja u području osiromašenja. Treća diode: rekombinacija na granicama zrna i defektnim zonama.
Nepoznati parametri	I_{ph} , I_{s1} , n_1 , R_s i R_{sh}	I_{ph} , I_{s1} , n_1 , I_{s2} , n_2 , R_s i R_{sh}	I_{ph} , I_{s1} , n_1 , I_{s2} , n_2 , I_{s3} , n_3 , R_s i R_{sh}
Rezultati modeliranja	Solidni rezultati za uobičajene radne uvjete (visoka ozračenja). Manje precizno pri niskom ozračenju i kod djelomičnog zasjenjivanja.	Preciznije od jednodiodnog modela, posebno pri niskim razinama ozračenja te za simulaciju gubitaka rekombinacije u području osiromašenja i u uvjetima djelomičnog zasjenjivanja.	Najprecizniji model sposoban obuhvatiti širi spektar fizikalnih pojava i gubitaka, uključujući one povezane s nedostacima i granicama zrna.
Razina kompleksnosti	Najniža razina kompleksnosti, manje potrebnih matematičkih formulacija	Srednja razina kompleksnosti; kompliciraniji od jednodiodnog modela.	Najsofisticiraniji model, najkompleksnije jednadžbe.
Vrijeme simulacije i izračuna	Najkraće vrijeme simulacije i izračuna parametara.	Srednje vrijeme izračuna, duže nego kod jednodiodnog modela.	Najduže vrijeme izračuna, znatno duže od jednodiodnog i dvodiodnog modela.

3. PREGLED LITERATURE: PRISTUPI U MODELIRANJU FN SUSTAVA DVODIODNIM MODELOM

Dvodiodni model popularan je izbor za ekvivalentne krugove fotonaponskih (FN) modula jer je točniji od modela s jednom diodom u prikazivanju složenih fizikalnih procesa, posebno gubitaka zbog rekombinacije u području osiromašenja [13]. Međutim, jednadžbe koje definiraju dvodiodni model su nelinearne i implicitne, što otežava izravno određivanje njegovih sedam ili osam parametara [15]. Kao rezultat toga, razvijene su brojne različite metode za identifikaciju parametara, uključujući analitičke metode, metaheurističke optimizacijske tehnike te hibridne i numeričke pristupe. Svaka od ovih metoda ima svoje prednosti i nedostatke u pogledu točnosti, brzine konvergencije i računalne učinkovitosti.

3.1. Analitičke metode

Analitičke metode pokušavaju odrediti parametre dvodiodnog modela nudeći jasna ili donekle jasna rješenja, ponekad izbjegavajući potrebu za ponavljajućom optimizacijom. Iako je pronalaženje potpuno jednostavnog i točnog analitičkog rješenja za sve parametre dvodiodnog modela iz tipičnih podataka s tehničkog lista proizvođača obično teško zbog složene matematike modela, nekoliko strategija se približava tom cilju ili pojednostavljuje postupak kako bi se nepoznati parametri mogli izravnije dobiti.

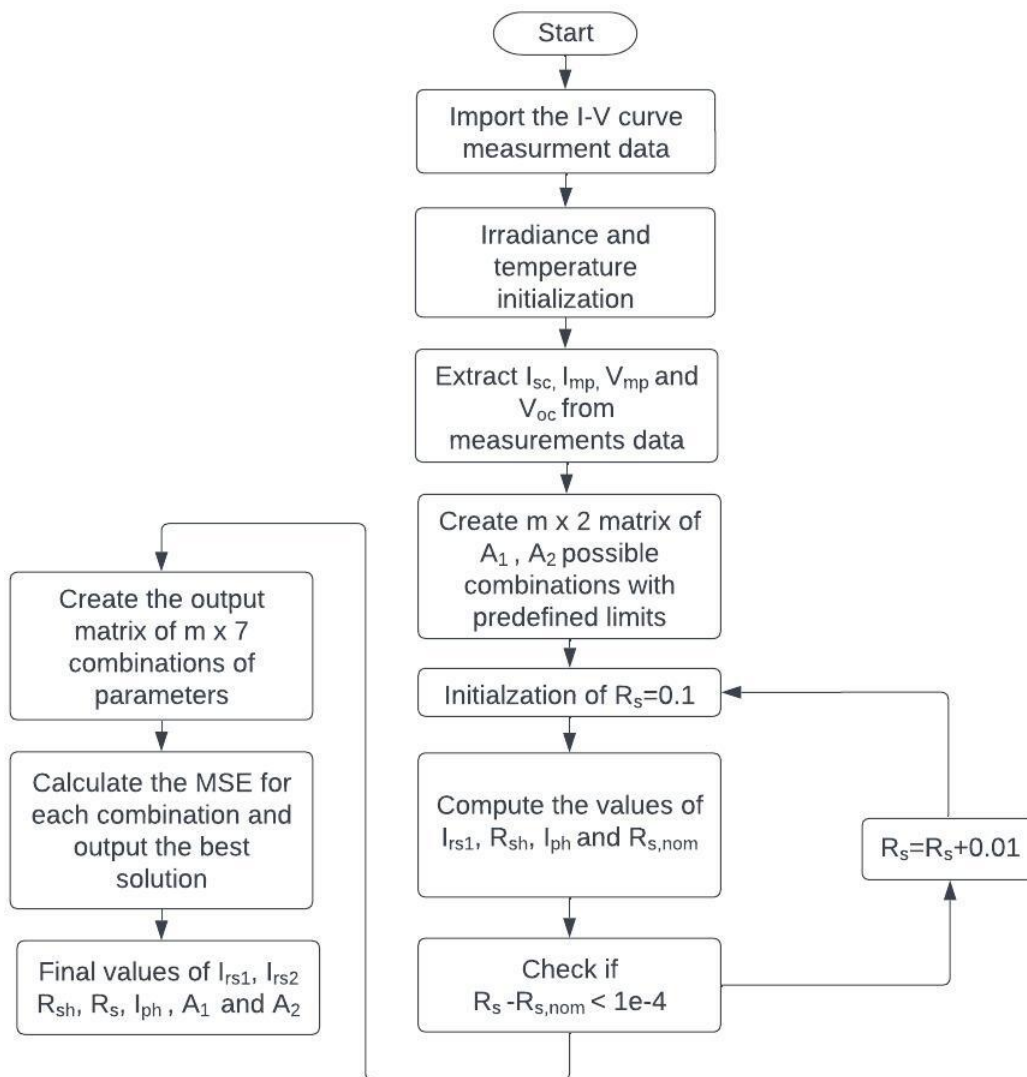
Posebno zanimljiv analitički pristup je metoda koja koristi Lambertovu W-funkciju, koja se ponekad naziva i produktni logaritam. Ova funkcija nudi precizno analitičko rješenje za određene vrste transcendentálnih jednadžbi [19]. Kada je riječ o modelu s jednom diodom, Lambertova W-funkcija može izravno izračunati struju (I) za bilo koji određeni napon (V), pod uvjetom da je poznato svih pet parametara. Njena primjena izravno na potpuni sedmeroparametarski model s dvi diode je složenija, ali pojednostavljene verzije ili posebni slučajevi dopuštaju njezinu upotrebu u određenim aspektima ekstrakcije parametara dvodiodnog modela [18]. Na primjer, neke tehnike razvijaju formule za paralelni otpor ili idealnost diode koristeći odnose koji uključuju temperaturne koeficijente. Zatim koriste Lambertovu W-funkciju za određivanje drugih parametara pod specifičnim uvjetima, poput otvorenog kruga ili kratkog spoja [19]. Prednost korištenja Lambertove W-funkcije je u tome što su ove metode robusne i brze, izbjegavajući iterativno pretraživanje koje je tipično za optimizacijske metode. Međutim, one se ne mogu lako primijeniti na cijeli dvodiodni model

bez pojednostavljenja. Osim toga, još uvijek mogu ovisiti o određenim pretpostavkama ili zahtijevati numeričko pronalaženje korijena za neke dijelove rješenja [9].

Metode prilagodbe krivulje, posebno iterativna metoda najmanjih kvadrata, često su korišteni analitički i numerički pristupi za ekstrakciju parametara iz dvodiodnog modela. Ove metode funkcioniraju tako da minimiziraju razliku između stvarnih, izmjerenih I-V podataka (ili podataka koje daje proizvođač) i I-V krivulje koju generira dvodiodni model. Proces identifikacije obično započinje s početnim procjenama za sedam parametara unutar dvodiodnog modela. Nakon toga, koristi se iterativni algoritam koji poboljšava te parametre kako bi smanjio unaprijed definiranu ciljnu funkciju. Ta ciljna funkcija najčešće predstavlja zbroj kvadrata razlika između izmjerenih i modeliranih struja ili napona [23]. Algoritmi koji se često koriste u ovom kontekstu uključuju Levenberg-Marquardt algoritam, Newton-Raphsonovu metodu i različite metode gradijentnog spusta [24].

Levenberg-Marquardt algoritam [30] je često korišten zbog svoje sposobnosti da kombinira stabilnost gradijentnog spusta s brzinom konvergencije koju nudi Gauss-Newtonova metoda [24]. On radi tako da iterativno prilagođava vrijednosti parametara kako bi minimizirao funkciju pogreške. Iako ove iterativne metode mogu postići visoku točnost kada uspješno konvergiraju prema globalnom minimumu, poznato je da su vrlo osjetljive na početne procjene parametara. Ako su početne vrijednosti netočne, algoritam se može zaglaviti u lokalnom minimumu ili čak potpuno zakazati u konvergenciji [11]. Ta osjetljivost predstavlja značajnu prepreku, osobito za složeni dvodiodni model koji uključuje brojne parametre. Osim toga, ove metode mogu biti računalno zahtjevne, osobito ako je potrebno mnogo iteracija za postizanje konvergencije ili ako je I-V skup podataka posebno velik [11].

Neke druge polu-analitičke metode pojednostavljaju stvari radeći s jednostavnim verzijama jednadžbi dvodiodnog modela. Na primjer, određene tehnike sužavaju problem na pronalaženje samo tri nepoznata parametra umjesto sedam, dok se preostala četiri parametra određuju izravnim izračunom [13]. Ovi takozvani "reducirani oblici" nastoje pojednostaviti numeričko izdvajanje, zahtijevajući samo jednu iteraciju kako bi se istovremeno odredile vrijednosti ta tri nepoznata parametra. To može potencijalno učiniti cijeli proces izdvajanja bržim i jednostavnijim [13] [14].



Slika 3.1. *Primjer reduciranog oblika analitičke metode ekstrakcije parametara dvodiodnog modela [14]*

Iako analitičke metode i tehnike prilagodbe krivulje za izdvajanje dvodiodnih parametara pružaju sustavan način rada, njihova korisnost može biti ograničena zbog inherentno složene, nelinearne prirode problema i mogućnosti zapinjanja tijekom izračuna. Ove metode često zahtijevaju pažljiv odabir početnih vrijednosti te mogu uključivati pojednostavljene pretpostavke ili posebne numeričke tehnike za rješavanje zahtjevnih transcendentálnih jednačbi.

3.2. Metaheurističke optimizacijske tehnike

Funkcija cilja dvodiodnih modela za ekstrakciju parametara prirodno je nelinearna i ima više ekstremnih točaka, što tradicionalnim analitičkim ili iterativnim metodama predstavlja pravu glavobolju. Te klasične metode često imaju poteškoća u pronalaženju apsolutno najboljeg rješenja i mogu biti vrlo osjetljive na početne uvjete. Tu na scenu stupaju metaheurističke optimizacijske tehnike kao popularna alternativa. Ovi algoritmi inspirirani su prirodom ili ponašanjem skupina, a osmišljeni su tako da traže dovoljno dobra rješenja za zahtjevne probleme pretražujući širok raspon mogućnosti, bez potrebe za informacijama o gradijentu.

Genetički algoritmi (GA) su vrsta evolucijskih algoritama koji crpe inspiraciju iz prirodnog svijeta, posebno iz načina na koji se različite vrste razvijaju kroz prirodnu selekciju i genetiku [25]. Kada se koriste za identifikaciju parametara u dvodiodnog modelu, genetski algoritmi počinju sa stvaranjem populacije mogućih rješenja, pri čemu je svako rješenje predstavljeno različitim skupom mogućih parametara [31]. Svako od tih rješenja zatim se procjenjuje pomoću funkcije prilagodbe (fitness funkcije). Ta funkcija zapravo ocjenjuje koliko se I-V krivulja generirana tim određenim skupom parametara podudara sa stvarnim, izmjerenim podacima ili specifikacijama navedenim u tehničkom listu [23]. Kako algoritam napreduje kroz generacije, oponaša evolucijske procese poput selekcije, križanja (crossover) i mutacije kako bi poboljšao populaciju rješenja. Rješenja koja bolje odgovaraju, odnosno imaju veću prilagodbu, dobivaju prednost u sljedećoj generaciji, čime se osigurava da se najperspektivniji skupovi parametara prenose dalje. Križanje radi tako da miješa i kombinira komponente iz dvaju roditeljskih rješenja, dok mutacija uvodi male, nasumične promjene kako bi se održala raznolikost i izbjeglo prerano zapinjanje u podoptimalnom rješenju. Genetski algoritmi su cijenjeni zbog svoje sposobnosti učinkovitog pretraživanja velikog prostora rješenja i rješavanja složenih funkcija koje možda nisu glatke ili kontinuirane [23]. To ih čini posebno pogodnima za snalaženje u složenim karakteristikama pogrešaka svojstvenim DDM-u [23].

Optimizacija rojem čestica, ili PSO (Particle Swarm Optimization) [31], pametna je tehnika rješavanja problema koja crpi inspiraciju iz kolektivnog kretanja ptica u jatu ili riba u plovu [25]. U ovoj metodi, svaki mogući odgovor (što u ovom slučaju znači određeni skup DDM parametara) zamišlja se kao “čestica” koja se kreće kroz složeno, višeslojno područje pretraživanja [12]. Te čestice su “pametne” i stalno prilagođavaju svoj put na temelju vlastitih najboljih otkrića (tzv. “pbest”) i najboljeg rezultata cijelog roja čestica (tzv. “gbest”)[12].

Brzina i položaj svake čestice neprestano se usavršavaju s vremenom. PSO se ističe jer je relativno jednostavan za razumijevanje, može brzo doći do rješenja i izvrstan je za optimizacijske probleme koji uključuju kontinuirane varijable [12]. Ova metoda se uspješno koristi za ekstrakciju parametara dvodiodnog modela, pokazujući visoku točnost u određivanju idealnih parametara koji minimiziraju razliku između stvarnih eksperimentalnih rezultata i onih dobivenih simulacijama I-V karakteristika [32] [20].

Diferencijalna evolucija (DE) je široko korišten optimizacijski algoritam, sličan genetskim algoritmima (GA), koji se temelji na populacijskom pristupu. Međutim, razlikuje se po tome što koristi diferencijalne operacije za generiranje novih mogućih rješenja [15]. Proces se sastoji od tri ključne faze: mutacije, križanja i selekcije [33,34,35]. Tijekom mutacije, novi vektor nastaje tako da se ponderirana razlika između dva postojeća vektora populacije doda trećem vektoru. Tako stvoren, mutirani vektor zatim se spaja s ciljnim vektorom pomoću križanja, čime nastaje ispitni (trial) vektor. Na kraju, ispitni vektor se uspoređuje s ciljnim vektorom, a bolji od njih odabire se za sljedeću generaciju [15]. DE je poznat po svojoj robusnosti, sposobnosti rješavanja složenih, nediferencijabilnih funkcija čija te impresivnoj konvergenciji u globalnim optimizacijskim scenarijima [15]. Pokazao se učinkovitim u određivanju DDM parametara, često postižući veću točnost i dosljednost u odnosu na druge metaheurističke metode [15,34,35].

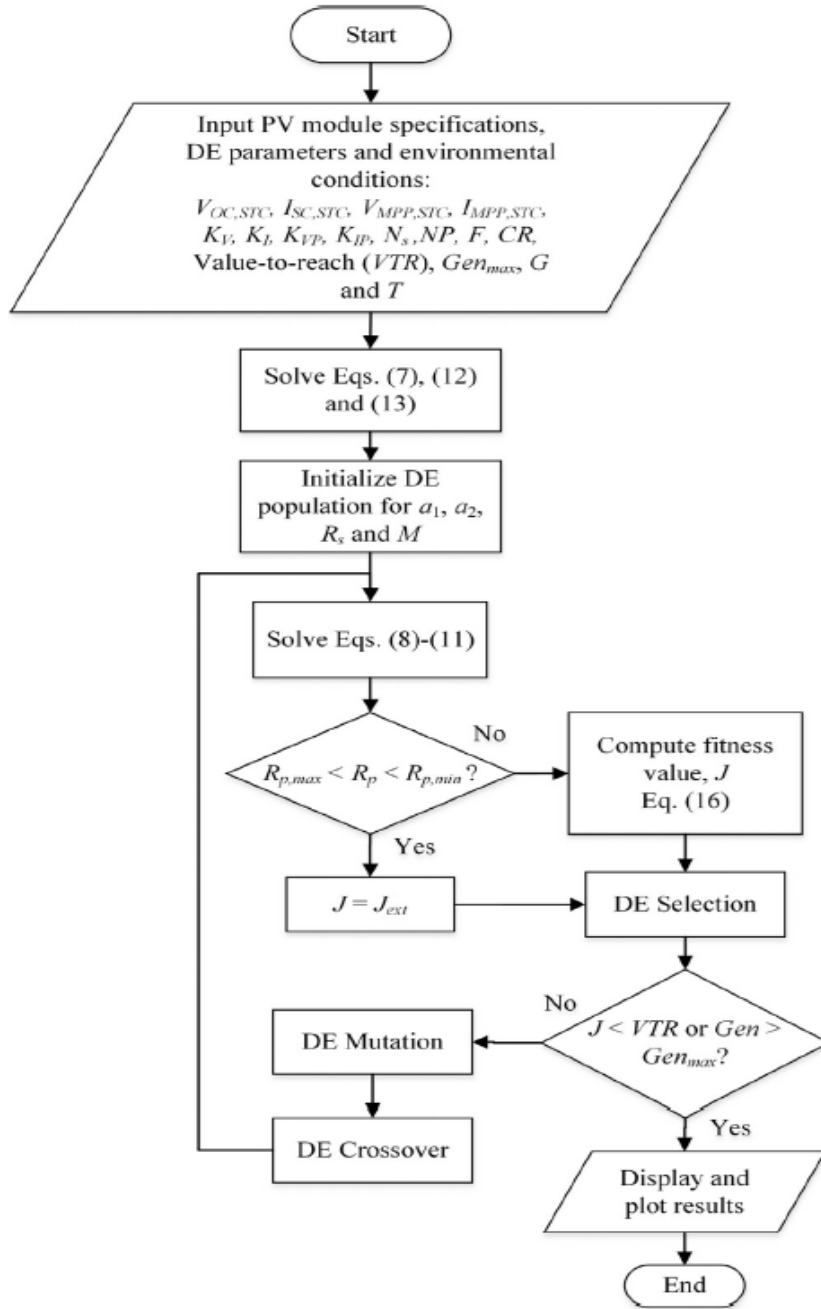
Brojna istraživanja temeljito su usporedila ove metaheurističke algoritme upravo za ekstrakciju parametara dvodiodnog modela. Iako ti algoritmi obično nadmašuju tradicionalne iterativne metode u pogledu robusnosti i sposobnosti pronalaženja globalnog optimuma, njihova učinkovitost nije jednaka u svim slučajevima.

- **Preciznost:** Metaheuristički algoritmi obično bolje i preciznije hvataju I-V karakteristike u usporedbi s jednostavnijim analitičkim metodama. To je zato što mogu učinkovitije upravljati složenom, nelinearnom prirodom problema [15]. Konkretno, diferencijalna evolucija (DE) i naprednije varijante PSO-a često su hvaljene zbog postizanja vrlo točnih skupova parametara [20].
- **Brzina konvergencije:** Optimizacija rojem čestica (PSO) je obično prepoznata po brzom konvergenciji, osobito u početnim fazama optimizacije [12]. Međutim, ponekad se može zaglaviti u lokalnim optimumima, posebno kod problema s mnogo varijabli. Genetički algoritmi (GA), iako su robusni, mogu trebati više vremena za konvergenciju u odnosu na PSO ili DE. Diferencijalna evolucija (DE) općenito postiže dobar balans

između istraživanja prostora rješenja i iskorištavanja dobrih rješenja, što često dovodi do pouzdane konvergencije prema globalnom optimumu unutar praktičnog broja iteracija [15].

- **Robusnost:** Genetički algoritmi (GA) su vrlo dobri u izbjegavanju zapinjanja u lokalnim minimumima zahvaljujući snažnim sposobnostima istraživanja kroz mutaciju i križanje. Diferencijalna evolucija (DE) također je poznata po svojoj robusnosti. Optimizacija rojem čestica (PSO), iako brza, ponekad se može zaglaviti u lokalnim optimumima ako nije pravilno podešena. Najbolji algoritam za korištenje često ovisi o specifičnim detaljima FN modula, kvaliteti eksperimentalnih podataka i dostupnoj računalnoj snazi [20].

Metaheurističke optimizacijske metode potpuno su promijenile način na koji vršimo identifikaciju parametara dvodiodnog modela. One nam pružaju snažne alate za rješavanje složenih problema s više parametara, što rezultira preciznijim i pouzdanijim modelima FN modula za različite primjene.



Slika 3.2. Primjer implementacije algoritma diferencijalne evolucije u traženju parametara dvodiodnog modela [15]

3.3. Hibridni i numerički pristupi

Široka istraživačka zajednica je pored postojećih metoda identifikacije osmislila vrlo pametne hibridne i numeričke metode kako bi ekstrakcija parametara za dvodiodni modela bila točnija, brža i pouzdanija. Ove metode su učinkovite jer često kombiniraju najbolje dijelove

različitih tehnika. Na primjer, mogu spojiti analitičke jednadžbe sa stohastičkim optimizacijskim algoritmima ili čak koristiti napredne alate poput strojnog učenja.

Jedan od popularnih pristupa je kombinacija analitičkih i metaheurističkih metoda. Ove hibridne metode pametno kombiniraju analitička rješenja ili pojednostavljenja u okvire metaheurističke optimizacije. Glavna ideja je smanjiti broj nepoznatih parametara koje je potrebno optimizirati metaheurističkim metodama. Time se prostor pretraživanja za metaheuristički algoritam pojednostavljuje i poboljšava njegova konvergencija. Na primjer, neke hibridne metode mogu analitički odrediti nekoliko parametara (poput fotostruje, serijskog otpora ili paralelnog otpora) koristeći određene točke na I-V krivulji (kao što su kratki spoj, otvoreni krug ili točka maksimalne snage) ili pojednostavljene jednadžbe [13]. Preostali, složeniji parametri (poput faktora idealnosti dioda i reverznih struja zasićenosti) zatim se fino podešavaju pomoću metaheurističkog algoritma kao što su optimizacija rojem čestica (PSO), diferencijalna evolucija (DE) ili genetički algoritmi (GA) [15].

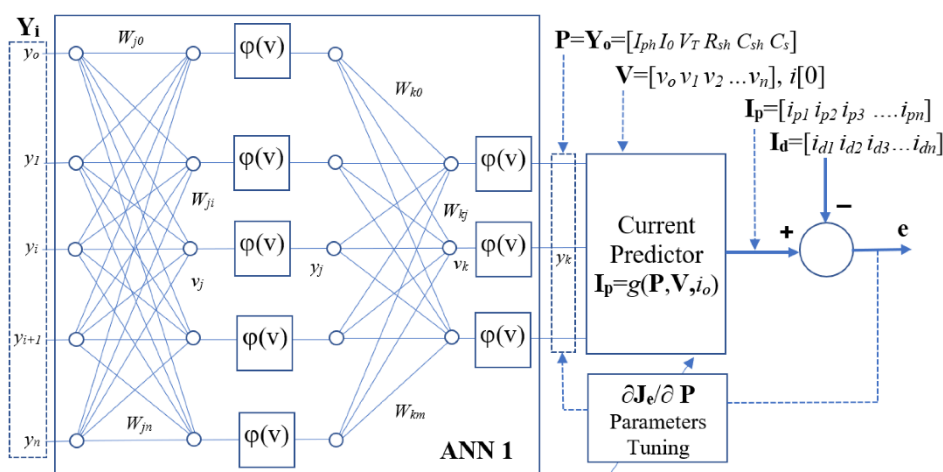
Jedna od popularnih hibridnih metoda je kombiniracija optimizacije rojem čestica (PSO) s metodičkim numeričkim rješavačem, poput Newton-Raphsonove metode, ili jednostavnom analitičkom formulom za određene parametre. Na primjer, neke tehnike mogu analitički izračunati jednadžbe za fotostruju, reverznu struju zasićenosti prve diode i paralelni otpor. Nakon toga, preostale parametre, poput faktora idealnosti i reverzne struje zasićenosti druge diode, fino podešavaju pomoću metaheurističkog algoritma [15]. Ovakav pristup često rezultira preciznijim i bržim izdvajanjem parametara jer analitički proračuni unaprijed daju dobre početne točke ili ograničenja, što pomaže metaheurističkom algoritmu da učinkovitije pronađe apsolutno najbolje rješenje [15]. Ove kombinirane metode osmišljene su kako bi izvukle maksimum iz oba pristupa: pouzdanu točnost analitičkih metoda i široke mogućnosti pretraživanja metaheuristike.

Napredak u strojnom učenju otvorio je nove mogućnosti za identifikaciju parametara iz dvodiodnog modela, osobito pri radu sa složenim i velikim skupovima podataka. Kada su modeli strojnog učenja jednom istrenirani, mogu predvidjeti parametre dvodiodnog modela mnogo brže od konvencionalnih iterativnih ili metaheurističkih metoda. To ih čini vrlo pogodnima za primjene u stvarnom vremenu ili za kontinuirano online praćenje

- **Neuronske mreže:** Umjetne neuronske mreže (ANN) mogu se naučiti razumjeti složen, nelinearan odnos između ponašanja FN modula (poput promjena struje i napona pri različitim razinama osvjetljenja i temperaturama) i parametara korištenih u

dvodiodnom modelu) [36]. Kada se neuronska mreža pravilno istrenira, može brzo procijeniti te parametre za nove podatke, bez potrebe za ponovnim prolaskom kroz cijeli spor i računalno zahtjevan proces optimizacije [36]. U osnovi, korištenje neuronske mreže pretvara ekstrakciju parametara u problem predviđanja, pri čemu neuronska mreža djeluje kao vrlo pametan i brz referentni vodič. Međutim, treniranje ovih neuronskih mreža zahtijeva veliku, raznoliku i točnu zbirku I-V krivulja zajedno s pripadajućim parametrima. Prikupljanje svih tih podataka za treniranje može na početku biti računalno zahtjevno [36] [37] [38].

- **Surogatni modeli:** Surogatni modeli, koji se još nazivaju metamodeli ili modeli odzivne površine, mogu se zamisliti kao pojednostavljene matematičke verzije koje vjerno oponašaju složenije simulacije ili sustava. U kontekstu identifikacije parametara dvodiodnog modela, surogatni model može se izraditi kako bi povezivao ulazne parametre s izlazom ciljane funkcije, primjerice s razlikom između izmjerenih i modeliranih I-V krivulja. Umjesto da se izravno rješava složena jednačba, optimizator može raditi s učinkovitijim surogatnim modelom [26]. Ovakav pametan pristup značajno smanjuje računalne troškove povezane s ponovljenim izračunima komplicirane jednačbe dvodiodnog modela tijekom procesa optimizacije. Za izradu ovih surogatnih modela mogu se koristiti razne tehnike, uključujući Gaussove procese, regresiju potpunih vektora ili polinomsku regresiju. Kada surogatni model postane pouzdan, konvencionalni optimizacijski algoritmi mogu pomoću njega brzo pronaći optimalne parametre, što je znatno brže za procjenu.



Slika 3.3. Primjer implementacije neuronskih mreža za procjenu parametara diodnog modela FN modula [36]

Ove sofisticirane numeričke i hibridne metode rješavaju nedostatke pojedinačnih tehnika uravnotežujući početno računalno ulaganje potrebno za treniranje modela strojnog učenja ili uspostavu hibridnih okvira s dugoročnom računalnom učinkovitošću, otpornošću i preciznošću u identifikaciji parametara dvodiodnog modela.

3.4. Kritički osvrt na literaturu

Detaljna analiza istraživanja o modeliranju s dvodiodnim modelom upućuje na korištenje širokog raspona metoda, od kojih svaka ima svoje prednosti i nedostatke. Kada se bira metoda za identifikaciju parametara iz dvodiodnog modela, potrebno je pažljivo odvagati pokazatelje poput točnosti, brzine izračuna, mogućnosti primjene na veće skupove podataka te ukupne pouzdanosti.

Prednosti postojećih metoda:

- **Analitičke metode (Lambertova funkcija, iterativni najmanji kvadrati):** Ove metode, posebno one koje koriste intenzivnu računalnu obradu za pronalaženje korijena ili iterativne tehnike prilagodbe krivulja poput Levenberg-Marquardt algoritma, mogu biti izuzetno precizne kada se približe točnom odgovoru [19, 24]. Temelje se na čvrstoj matematici i mogu biti vrlo brze ako su početne pretpostavke blizu najboljeg mogućeg rješenja, što ih čini odličnima kada je preciznost ključna na manjim skupovima podataka. Pojednostavljivanje problema unutar analitičkih pristupa korištenjem "reduciranih oblika" također može značajno ubrzati cijeli proces [13].
- **Metaheurističke optimizacijske tehnike (like GA, PSO, and DE):** Ove su metode izvrsne jer su robusne i mogu izbjeći zamke lokalnih minimuma, čime povećavaju šanse za pronalazak stvarno najboljeg rješenja za problem nelinearne ekstrakcije parametara dvodiodnog modela [20,31,32,33]. Ne zahtijevaju informacije o gradijentu, pa dobro funkcioniraju čak i s kompliciranim ciljnim funkcijama. Posebno su korisne kada imate ogroman prostor pretrage ili nemate dobre početne točke. Diferencijalna evolucija često se hvali zbog svoje sposobnosti temeljitog istraživanja i iskorištavanja prostora pretrage [15,34,35].
- **Hibridni i numerički pristupi (npr. kombinacija PSO sa Newton-Raphson metodom, ili korištenje strojnog učenja):** Ove metode pokušavaju spojiti najbolje od oba pristupa. Hibridni pristupi kombiniraju brzu lokalnu konvergenciju analitičkih ili numeričkih rješavača s širokim mogućnostima pretrage metaheurističkih metoda. To obično rezultira boljom preciznošću i bržom konvergencijom nego kada se koriste samo

metaheurističke metode [15]. Kada su metode potpomognute strojnim učenjem jednom istrenirane, izuzetno su brze za procjenu parametara u stvarnom vremenu ili online, praktički pretvarajući složen problem optimizacije u brzu predikciju [36] [37] [38].

Nedostatci postojećih metoda:

- **Analitičke metode:** Ove su metode prilično osjetljive na početne pretpostavke i sklone su zaglaviti u lokalnim minimumima, osobito kada se radi o složenom dvodiodnom modelu [11]. Obično zahtijevaju dobru početnu procjenu, što može biti teško odrediti bez određenog predznanja. Osim toga, neka analitička rješenja mogu se oslanjati na pojednostavljene pretpostavke, što ih može učiniti manje preciznima ili manje primjenjivima u svim radnim uvjetima [19].
- **Metaheurističke optimizacijske tehnike:** Iako su ove metode dobre u pronalaženju globalnih optimuma, mogu biti računalno zahtjevne jer zahtijevaju velik broj evaluacija funkcije, što znači da im je potrebno više vremena za izvođenje, osobito kod problema visoke dimenzionalnosti ili velikih skupova podataka [11]. Specifični parametri algoritma (poput veličine populacije, broja iteracija, stopa mutacije i križanja) mogu značajno utjecati na performanse i potrebno ih je pažljivo prilagoditi. Neki jednostavniji algoritmi, poput osnovnog PSO-a, također se mogu prerano zaglaviti [12].
- **Hibridni i numerički pristupi:** Hibridne metode su vrlo moćne, ali mogu biti zahtjevne za implementaciju jer kombiniraju različite algoritme. Pristupi temeljeni na strojnome učenju zahtijevaju veliku količinu visokokvalitetnih podataka za treniranje, čije prikupljanje traži vrijeme i resurse. Točnost ML modela uvelike ovisi o kvaliteti i reprezentativnosti podataka za treniranje, a možda neće biti pouzdani pri ekstrapolaciji izvan raspona tih podataka.

Kompromisi: točnost nasuprot računalnoj učinkovitosti, skalabilnosti i robusnosti: Ovo istraživanje daje pregled ključnih kompromisa potrebnih za pouzdan način identifikacije parametara dvodiodnog modela:

- **Točnost na račun brzine:** Tehnike koje pružaju izvrsnu točnost, poput određenih metaheurističkih metoda a ili vrlo preciznih numeričkih rješavača, obično zahtijevaju veću računalnu snagu. S druge strane, brže i jednostavnije analitičke metode možda neće biti toliko precizne [6]. Pronalaženje idealne ravnoteže ovisi o primjeni; upravljanje u stvarnom vremenu zahtijeva brzinu, dok će se u detaljnim istraživanjima možda dati prednost točnosti

- **Skalabilnost s rastom podataka:** Važno je uzeti u obzir koliko se dobro neka metoda nosi s sve većim skupovima podataka ili složenijim fotonaponskim (FN) sustavima. Neke iterativne metode mogu se znatno usporiti kada je u pitanju velika količina I-V krivulja [11]. Modeli strojnog učenja (ML) nakon treniranja izvrsno skaliraju proces za buduća predviđanja, ali sam proces treniranja može biti računalno zahtjevan
- **Dosljedne performanse (robusnost):** Odnosi se na to koliko metoda može kontinuirano davati pouzdane rezultate, čak i kada se početni uvjeti razlikuju, podaci su šumoviti ili svojstva FN modula variraju. Metaheuristički algoritmi općenito su robusniji od determinističkih analitičkih metoda, koje mogu biti snažno pod utjecajem početnih pretpostavki [20]. Ipak, i metaheurističke metode zahtijevaju pažljivo podešavanje kako bi zadržale svoju robusnost

Istraživačka zajednica se trenutačno usredotočuje na razvoj hibridnih algoritama koji pružaju robusnost uz preciznost. Ti algoritmi kombiniraju analitičke metode sa širokim mogućnostima pretrage najnovijih metaheurističkih metoda [15]. Također, sve je veći interes za korištenje strojnog učenja i umjetne inteligencije kako bi se ubrzala i automatizirala identifikacija parametara. To je posebno važno za primjene poput praćenja u stvarnom vremenu i detekcije kvarova, gdje su brza i stalna ažuriranja parametara FN modela ključna [36] [37] [38]. Gledajući unaprijed, naglasak je na razvoju algoritama koji se mogu prilagoditi i sami podešavati prema promjenjivim radnim uvjetima i kvaliteti podataka. To će dodatno poboljšati ravnotežu između točnosti, učinkovitosti i robusnosti pri identifikaciji parametara dvodiodnog modela.

4. EKSPERIMENTALNI PODACI I EVALUACIJSKE METRIKE U MODELIRANJU FN SUSTAVA

4.1. Zahtjevi eksperimentalnih podataka

Preciznost FN modela ovisi o ravnoteži između jednostavnosti i preciznosti, a sve se temelji na podacima iz realnih mjerenja [22]. Kada je riječ o određivanju parametara pomoću numeričkih metoda, uobičajeni pristup je izrada sustava jednadžbi primjenom FN modela na specifične scenarije, poput uvjeta kratkog spoja (SC), otvorenog kruga (OC) ili maksimalne točke snage (MPPT) [2]. Za jednodiodne modele često se koriste tehnički listovi proizvođača FN modula kao referenca [11]. Međutim, ti tehnički listovi često nemaju dovoljno detalja i podataka za izradu preciznih Simulink modela za FN module s jednom ili dvije diode, zbog čega je identifikacija ključnih parametara nužna [4].

Učinkovitost bilo kojeg fotonaponskog (FN) modela snažno je određena kvalitetom podataka i preciznošću odabranih parametara, što naglašava važnost pažljivog odabira parametara i ograničenja podataka [22]. Modeli koji uključuju eksperimentalne podatke obično pokazuju bolje performanse u usporedbi s onima koji koriste isti broj parametara, ali nemaju mjerenja iz stvarnog svijeta [22]. Kako bi se osigurala pouzdanost, eksperimentalni rezultati za model s tri diode testirani su na različitim komercijalnim FN panelima [2]. Značaj standardiziranih uvjeta testiranja (STC) vidljiv je u primjeni predloženih metoda na polikristalne silicijske fotonaponske module MSX60 pod STC i pri 1000 W/m^2 [28]. Opsežna studija procijenila je sedamnaest neiterativnih metoda za modele s jednom diodom, koristeći skup podataka koji sadrži više od milijun izmjerenih I-V krivulja iz šest različitih FN tehnologija koje je osigurao Nacionalni laboratorij za obnovljivu energiju (NREL), čime su prikazane prednosti korištenja opsežnih i raznolikih I-V krivulja izmjerenih na terenu za temeljitu validaciju [9].

4.2. Mjerila usporedbe i metrika validacije

Uobičajena je praksa procjenjivati učinkovitost metoda ekstrakciju parametara na temelju mjerenja pogrešaka [13]. Popularan izbor za to je srednja kvadratna pogreška (RMSE), koja nam pomaže razumjeti koliko simulirana krivulja odstupa od mjerenih eksperimentalnih podataka [9, 29]. Još jedna široko korištena metrika za provjeru točnosti tehnika izdvajanja parametara je normirana srednja kvadratna pogreška (NRMSE) [9]. Kada se procjenjuje trodiodni fotonaponski (FN) model, istraživači se često oslanjaju na apsolutnu pogrešku struje (ACE) . Jedno istraživanje čak je istaknulo veću učinkovitost svog modela pokazujući da je

imao najmanje pogreške prilikom testiranja na tri vrste FN panela, nadmašivši druge numeričke metode [13]. Zapravo, razlike između stvarnih mjerenja i predviđanja trodiodnog modela mogu se zadržati ispod 0,5% [17].

Uz metrike pogreške, pri usporedbi algoritama u obzir se uzimaju i faktori kao što su preciznost (koliko su rezultati blizu stvarnim eksperimentalnim podacima), količina potrebne računalne memorije, brzina izvođenja izračuna, robusnost metode te jednostavnost implementacije algoritma [11, 9]. Za neiterativne metode, njihova se robusnost procjenjuje na temelju učestalosti nepravilnosti u izdvojenim parametrima i stope neuspjeha u generiranju prihvatljive I-V krivulje, kao što je prikazano u Tablici 4.3.1. [9]. Prilikom uspoređivanja, uzima se u obzir kombinacija točnosti (mjereno pomoću RMSE), robusnosti (procijenjene prema nepravilnostima i neuspjesima) i složenosti (mjereno vremenom izvođenja). Točnost predloženih modela provjerava se prema različitim kriterijima evaluacije i uspoređuje s već postojećim modelima [22]. Sva mjerila koriste se za usporedbu trenutnih rezultata s prethodno objavljenim rezultatima, čime se osigurava sveobuhvatan proces validacije [22].

Method	Accuracy (RMSE)				Robustness		Complexity	
	Absolute (A)		Normalized (%)		Irregularities	Failures	Execution Time (s)	
	Mean	Max	Mean	Max			Total	Core
Phang	0.016	4.210	0.38	69.4	387,440	9952	13.1	1.3
* Sera	0.026	2.471	0.74	49.6	794,670	52	1.3	1.3
Saleem	0.018	2.255	0.47	45.3	22,810	24	10.7	2.1
* Saloux	0.029	1.271	0.79	25.5	2	0	1.2	1.2
* Accarino	0.034	0.880	1.09	17.7	2804	25	1.5	1.5
Khan	0.043	4.201	1.19	69.3	511,210	8242	13.2	1.4
Cubas1	0.011	2.445	0.36	49.1	529,530	2445	8.2	1.1
* Cubas2	0.026	2.433	0.64	48.8	626,150	53	1.3	1.3
* Cubas3	0.024	0.430	0.83	13.0	1878	224	2.0	2.0
* Bai	0.032	2.544	0.93	51.1	6390	37	1.7	1.7
* Aldwane	0.021	1.032	0.59	20.7	416,650	29	1.3	1.3
* Cannizzaro	0.013	0.431	0.39	11.3	100	28	2.1	2.1
Toledo	0.007	1.119	0.20	97.7	451,220	392	14.0	2.5
Louzazni	0.122	1.449	3.43	27.0	64,194	30,612	12.5	1.1
* Batzelis	0.028	0.932	0.87	18.7	412	0	1.5	1.5
* Hejri	0.231	6.761	7.21	129.4	794,670	14,057	5.4	5.4
* Senturk	0.034	1.285	1.09	25.8	27,847	0	1.2	1.2

Slika 4.1. Primjer usporedbe metrike neke od predloženih metoda nasuprot postojećih metoda

5. ZAKLJUČAK

Točnost modela FN modula izuzetno je važna kada je riječ o simulaciji i dinamičkoj analizi FN sustava, s obzirom na sve veću količinu fotonaponskih sustava povezanih na elektroenergetsku mrežu [1, 2]. Bez obzira govorimo li o modelima s jednom, dvije ili čak tri diode, matematički opisi tih FN modula su složeni i nelinearni, a neki ključni detalji često nedostaju u tehničkim listovima proizvođača FN modula [16].

Ključna saznanja vezana uz modeliranje pomoću dvodiodnog modela i tehnike identifikacije ističu da model s dvije diode precizno prikazuje ponašanje FN modula uz umjerene zahtjeve za računalnom složenošću [13]. Njegova prednost u odnosu na jednodiodni model je mogućnost uzimanja u obzir pojava poput rekombinacije nosilaca naboja u zoni osiromašenja, što dovodi do realističnijeg prikaza ponašanja FN modula [10]. Trodiodni model dodatno povećava tu točnost, osobito u neidealnim uvjetima kao što su niska razina intenziteta sunčeve dozračenosti [16]. Točnost FN modela prvenstveno ovisi o korištenom skupu podataka i preciznosti odabranih parametara [22]. Općenito, eksperimentalni podaci omogućuju bolju prilagodbu modela nego isključivo teorijski pristupi [22].

To ima velike posljedice za projektiranje i optimizaciju FN sustava. Razvoj FN modela zahtijeva istovremeno razmatranje njegove točnosti i složenosti [22]. Odabir odgovarajuće metode identifikacije parametara ključno je za istraživače i inženjere, ovisno o kriterijima kao što su željena točnost, stabilnost, računalni zahtjevi i primjenjivost na različite fotonaponske sustave [1,9]. Osnovno za projektiranje i predviđanje performansi [21], modeliranje FN modula ključno je za određivanje karakteristika FN sustava u različitim okolišnim uvjetima. Preciznost, brzina i robusnost modeliranja FN sustava kontinuirano se poboljšavaju zahvaljujući stalnim istraživanjima u procjeni parametara korištenjem metaheurističkih optimizacijskih algoritama i algoritama ravnotežnih optimizatora [2,5,13]. Ovi stalni napreci doprinose stvaranju učinkovitijeg i pouzdanijeg projektiranja, optimizacije i općeg rada FN sustava u stvarnim primjenama.

REFERENCE:

- 1: Prasanna R. et al. "Comprehensive review on modelling, estimation, and types of faults in solar photovoltaic system." *International Journal of Photoenergy* 2022.1 (2022): 3053317.
- 2: Soliman Mahmoud A., Ahmed Al-Durra and Hany M. Hasanien. "Electrical parameters identification of three-diode photovoltaic model based on equilibrium optimizer algorithm." *IEEE Access* 9 (2021): 41891-41901.
- 3: Shongwe Samkeliso and Moin Hanif. "Comparative analysis of different single-diode PV modeling methods." *IEEE Journal of photovoltaics* 5.3 (2015): 938-946.
- 4: Bana Sangram and R. P. Saini. "A mathematical modeling framework to evaluate the performance of single diode and double diode based SPV systems." *Energy Reports* 2 (2016): 171-187.
- 5: Yu Kunjie et al. "Parameters identification of photovoltaic models using an improved JAYA optimization algorithm." *Energy Conversion and Management* 150 (2017): 742-753.
- 6: Chin Yun Jack, Zainal Salam and Kashif Ishaque. "Cell modelling and model parameters estimation techniques for photovoltaic simulator application: A review." *Applied energy* 154 (2015): 500-519.
- 7: Batzelis Efstratios I., Pavlos S. Georgilakis and Stavros A. Papathanassiou. "Energy models for photovoltaic systems under partial shading conditions: a comprehensive review." *IET Renewable Power Generation* 9.4 (2015): 340-349.
- 8: Bader Sebastian, Xinyu Ma and Bengt Oelmann. "One-diode photovoltaic model parameters at indoor illumination levels–A comparison." *Solar energy* 180 (2019): 707-716.
- 9: Batzelis Efstratios. "Non-iterative methods for the extraction of the single-diode model parameters of photovoltaic modules: A review and comparative assessment." *Energies* 12.3 (2019): 358.
- 10: Senthilkumar S., V. Mohan and G. Krithiga. "Brief review on solar photovoltaic parameter estimation of single and double diode model using evolutionary algorithms." *International Journal of Engineering Technologies and Management Research* 10.1 (2023): 64-78.

- 11:** Ayodele T. R., A. S. O. Ogunjuyigbe and E. E. Ekoh. "Evaluation of numerical algorithms used in extracting the parameters of a single-diode photovoltaic model." *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 13 (2016): 51-59.
- 12:** Bana Sangram and R. P. Saini. "Identification of unknown parameters of a single diode photovoltaic model using particle swarm optimization with binary constraints." *Renewable Energy* 101 (2017): 1299-1310.
- 13:** Tifidat Kawtar et al. "An accurate approach for modeling IV characteristics of photovoltaic generators based on the two-diode model." *Energy Conversion and Management: X* 14 (2022): 100205.
- 14:** Marić P., Marasović, I., Kuzmanić Skelin A. and Bevanda I. „Adaptive Double-Diode Modeling for Comparative Analysis of Healthy and Microcracked PV Modules“. *Electronics* 2025, 14, 1559.
- 15:** Chin Yun Jack, Zainal Salam and Kashif Ishaque. "An accurate modelling of the two-diode model of PV module using a hybrid solution based on differential evolution." *Energy conversion and management* 124 (2016): 42-50.
- 16:** Elazab Omnia S. et al. "Parameters estimation of single-and multiple-diode photovoltaic model using whale optimisation algorithm." *IET Renewable Power Generation* 12.15 (2018): 1755-1761.
- 17:** Qais Mohammed H., Hany M. Hasanien and Saad Alghuwainem. "Identification of electrical parameters for three-diode photovoltaic model using analytical and sunflower optimization algorithm." *Applied Energy* 250 (2019): 109-117.
- 18:** Soliman Mahmoud A., Hany M. Hasanien and Abdulaziz Alkuhayli. "Marine predators algorithm for parameters identification of triple-diode photovoltaic models." *IEEE Access* 8 (2020): 155832-155842.
- 19:** Batzelis Efstratios I. and Stavros A. Papathanassiou. "A method for the analytical extraction of the single-diode PV model parameters." *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 7.2 (2015): 504-512.
- 20:** Maniraj B., and A. Peer Fathima. "Parameter extraction of solar photovoltaic modules using various optimization techniques: A review." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1716. No. 1. IOP Publishing, 2020.

- 21:** Humada Ali M. et al. "Modeling and characterization of a grid-connected photovoltaic system under tropical climate conditions." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82 (2018): 2094-2105.
- 22:** Humada Ali M. et al. "Modeling of PV system and parameter extraction based on experimental data: Review and investigation." *Solar Energy* 199 (2020): 742-760.
- 23:** Bastidas-Rodriguez, Juan David et al. "A genetic algorithm for identifying the single diode model parameters of a photovoltaic panel." *Mathematics and Computers in Simulation* 131 (2017): 38-54.
- 24:** Ebead Rabiaa, Belal Abo-Zalam, and Essam Nabil. "System identification of photovoltaic system based on fractional-order model." *Journal of Computational Electronics* 22.1 (2023): 471-484.
- 25:** Pranith Sai, and T. S. Bhatti. "Modeling and parameter extraction methods of PV modules." *2015 International Conference on Recent Developments in Control, Automation and Power Engineering (RDCAPE)*. IEEE, 2015.
- 26:** Lim Li Hong Idris et al. "A linear identification of diode models from single I – V characteristics of PV panels." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 62.7 (2015): 4181-4193.
- 27.** Khanna Vandana et al. "A three diode model for industrial solar cells and estimation of solar cell parameters using PSO algorithm." *Renewable Energy* 78 (2015): 105-113.
- 28.** Rhouma Mohamed BH et al. "A simple method for extracting the parameters of the PV cell single-diode model." *Renewable Energy* 113 (2017): 885-894.
- 29.** Ayang Albert et al. "Maximum likelihood parameters estimation of single-diode model of photovoltaic generator." *Renewable energy* 130 (2019): 111-121.
- 30.** Blaifi Sid-ali et al. "An enhanced dynamic modeling of PV module using Levenberg-Marquardt algorithm." *Renewable Energy* 135 (2019): 745-760.
- 31.** Rai Nawal et al. "Biogeography-based teaching learning-based optimization algorithm for identifying one-diode, two-diode and three-diode models of photovoltaic cell and module." *Mathematics* 11.8 (2023): 1861.

32. Ghoto Muhammad Imran et al. "Parameters extraction of photovoltaic cells using swarm intelligence-based optimization technique: research on single diode model and double diode model." *Mehran University Research Journal Of Engineering & Technology* 42.2 (2023): 158-168.
33. Muhsen Dhiaa Halboot et al. "Parameters extraction of double diode photovoltaic module's model based on hybrid evolutionary algorithm." *Energy Conversion and Management* 105 (2015): 552-561.
34. Askarzadeh Alireza and Leandro dos Santos Coelho. "Determination of photovoltaic modules parameters at different operating conditions using a novel bird mating optimizer approach." *Energy Conversion and Management* 89 (2015): 608-614.
35. Hasan Md Asif, and Sambit K. Parida. "An overview of solar photovoltaic panel modeling based on analytical and experimental viewpoint." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60 (2016): 75-83.
36. Lo W.L., Chung H.S.H., Hsung R.T.C.; Fu H.; Shen T.W. „PV Panel Model Parameter Estimation by Using Neural Network“. *Sensors* **2023**, 23, 3657.
37. Antonino Laudani, Gabriele Maria Lozito, Martina Radicioni, Francesco Riganti Fulginei, and Alessandro Salvini. „Model Identification for Photovoltaic Panels Using Neural Networks“. In *Proceedings of the International Joint Conference on Computational Intelligence -Volume 3 (IJCCI 2014)*. SCITEPRESS - Science and Technology Publications, Lda, Setubal, PRT, 130–137.
38. Bo Yang, Ruyi Zheng, Yucun Qian, Boxiao Liang, Jingbo Wang, „Efficient identification of photovoltaic cell parameters via Bayesian neural network-artificial ecosystem optimization algorithm“, *Global Energy Interconnection*, Volume 8, Issue 2, 2025, Pages 316-337, ISSN 2096-5117

POPIS OZNAKA I KRATICA

<i>FN</i>	fotonaponski
I-V	strujno-naponski
SDM	jednodiodni model
<i>DDM</i>	dvodiodni model
TDM	trodiodni model
MPPT	točka maksimalne snage
<i>STC</i>	standardni testni uvjeti
<i>I_{ph}</i>	fotostruja
<i>I_s</i>	reverzna struja zasićenja
<i>n</i>	faktor idealnosti diode
<i>R_s</i>	<i>serijski otpor</i>
<i>R_{sh}</i>	<i>otpor shunta- paralelni otpor</i>
WOA	algoritam optimizacije kitova
PSO	optimizacija rojem čestica
GA	genetički algoritam
DE	algoritam diferencijalne evolucije
ANN	umjetna neuronska mreža
ML	strojno učenje
SC	kratak spoj
OC	otvoren krug
NREL	nacionalni laboratorij za obnovljivu energiju
RMSE	srednja kvadratna pogreška
NRMSE	normirana srednja kvadratna pogreška
ACE	apsolutna pogreška struje