



UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

SARA VUKOTIĆ

SINERGIJA ANALITIČKIH METODA ZA ODREĐIVANJE
PARAMETARA SOLARNIH ČELIJA

-MASTER RAD-

Podgorica, 2024. godine

PODACI I INFORMACIJE O KANDIDATU

Ime i prezime: Sara Vukotić

Datum i mjesto rođenja: 01.06.1998. godine, Cetinje, Crna Gora

Naziv završenog osnovnog studijskog programa i godina završetka studija:
Energetika i automatika, 2020. godine

INFORMACIJE O MASTER RADU

Naziv master studija: Studijski program Elektroenergetski sistemi

Naslov master rada: Sinergija analitičkih metoda za određivanje parametara solarnih ćelija

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

UDK, OCJENA I ODBRANA MASTER RADA

Datum prijave master rada: 11.04.2024.

Datum sjednice Vijeća na kojoj je prihvaćena tema: 16.05.2024.

Mentor: Prof. dr Martin Čalasan

Komisija za ocjenu/ odbranu master rada:

1. Prof. dr Vesna Rubežić, ETF Podgorica, predsjednik,
2. Prof. dr Martin Čalasan, ETF Podgorica, mentor,
3. Prof. dr Snežana Vujošević, član.

Datum odbrane:

Datum promocije:

Ime i prezime autora: Sara Vukotić

ETIČKA IZJAVA

U skladu sa članom 22 Zakona o akademskom integritetu i članom 18 Pravila strudiranja na master studijama, pod krivičnom i materijalnom odgovornošću, izjavljujem da je master rad pod naslovom

„Sinergija analitičkih metoda za određivanje parametara solarnih ćelija“

moje originalno djelo.

Podnosilac izjave,

Sara Vukotić

U Podgorici, 24.09.2024.god.

REZIME

Usljed povećanja zahtjeva za električnom energijom, usvajanja različitih globalnih konvencija o smanjenju uticaja štetnih supstanci nastalih kao posljedica korišćenja konvencionalnih izvora energije, smanjenja rezervi neobnovljivih izvora energije, kao i podsticanja održivog razvoja došlo je do okretanja ka obnovljivim izvorima energije. U tranzicionom procesu kroz koji prolazi energetika modernog doba, solarna energija igra ključnu ulogu među svim obnovljivim izvorima energije.

Fotonaponski sistemi za proizvodnju električne energije iz sunčeve svjetlosti poznati su široj javnosti još od 70 – ih godina prošlog vijeka. Od tada su sprovedene brojne analize i proračuni efikasnosti, kao i istraživanja na polju dizajna i korišćenog materijala koja su umnogome pomogla procesu optimizacije i povećanja iskoristivosti fotonaponskih sistema. Danas je tehnologija toliko napredovala da su ovi sistemi postali ekonomski opravdani. Zahvaljujući ovakvom tehno – ekonomskom napretku fotonaponski sistemi se koriste u domaćinstvima, industrijama, saobraćaju, pa i u velikim elektroenergetskim sistemima.

U cilju povećanja integracije fotonaponskih sistema potrebno je konstantno raditi na povećanju efikasnosti korišćenja solarne energije, optimizaciji performansi i poboljšanju upravljanja u glavnim elektroenergetskim sistemima. Zbog toga je neophodno detaljno poznavanje principa rada i vrijednosti osnovnih parametara fotonaponskih ćelija ili ti osnovnih jedinica građe fotonaponskih sistema.

Jedan dio parametara koji opisuju solarne ćelije obezbjeđuju proizvođači. Međutim, ovi parametri ne stvaraju potpunu sliku o karakteristikama solarnih ćelija. Zbog toga je potrebno sprovesti detaljnije analize na poznatim matematičkim modelima solarnih ćelija koji vrše korelaciju između fizičkih procesa i matematičkog modelovanja parametara. Estimacija parametara solarnih ćelija podrazumijeva određivanje parametara iz poznatih ulaznih podataka kao i određivanje strujno-naponskih karakteristika, a sve uz pomoć različitih analitičkih, metaheurističkih i hibridnih metoda.

U ovom radu je predstavljena estimacija parametara jednodiodnog modela solarne ćelije/modula korišćenjem različitih analitičkih metoda. Komparativna analiza vrijednosti dobijenih parametara primjenom analitičkih metoda nastoji da pruži sveobuhvatan pregled, prednosti, ograničenja i potencijalna unapređenja svake od metoda. Poređenjem procijenjenih vrijednosti nepoznatih parametara stvara se uvid u efikasnost pojedinačnih metoda. Sinergijom analitičkih metoda, ovaj rad ima za cilj da podstakne dublje razumijevanje kompleksne problematike estimacije parametara na primjeru jednodiodnog modela fotonaponske ćelije.

IZVOD RADA

Predmet istraživanja ovog rada je primjena i sinergija analitičkih metoda za estimaciju parametara jednodiodnog modela solarne ćelije i solarnog modula, kao i uporedna analiza dobijenih vrijednosti parametara i izlazne strujno-naponske karakteristike.

Za estimaciju parametara korišćene su različite analitičke metode koje se zasnivaju na primjeni analitičkih relacija i iterativnih postupaka u cilju minimizacije razlike između mjerenih i proračunatih vrijednosti nepoznatih parametara. Analizom i detaljnim prikazom rezultata svake od metoda predstavljene su njihove prednosti i nedostaci, kao i opravdanost primjene ovih metoda na primjeru jednodiodnog modela solarne ćelije.

Cilj uporedne analize je pronalaženje metoda koja na najbolji način određuju vrijednost svakog parametra pojedinačno, zatim metode koja daje najbolje poklapanje strujno-naponske karakteristike i tačke maksimalne snage. Komparativnom analizom dobija se uvid u validnost primijenjenih analitičkih metoda, grešku koja se javlja prilikom izvršavanja proračuna i mogućnost i brzinu konvergencije svakog od ovih metoda.

Komparativna analiza daje detaljnije razumijevanje principa rada solarnih ćelija i preporuku za izbor najpogodnije analitičke metode za estimaciju parametara istih. Ovo istraživanje može poslužiti kao dobra osnova za razvijanje nove analitičke metode koja će kombinovati postojeće analitičke metode u cilju dobijanja preciznijih vrijednosti parametara.

Analitičke metode su vrlo jednostavan i koristan alat za određivanje parametara solarnih ćelija. Zbog kombinacije preciznosti, jednostavnosti matematičkih relacija, brze konvergencije algoritma i povezivanja sa stvarnim uslovima sredine ove metode su koristan alat za određivanje baze podataka u realnom vremenu. Poznavanjem ograničenja i prednosti, metode se mogu koristiti za prognozu efikasnosti rada solarnih ćelija u različitim uslovima sredine, kao i u sistemima upravljanja za praćenje tačke maksimalne snage.

Ključne riječi: analitičke metode, jednodiodni model, solarna ćelija.

Abstract

The subject of this paper is application and synergy of analytical methods for parameter estimation in the case of single – diode model of solar cell and module, along with comparative analysis of obtained parameter values and the output voltage – current characteristics.

Various analytical methods were employed for parameter estimation, which rely on the application of analytical equations and iterative procedures to minimize the difference between measured and calculated values of unknown parameters. Through analysis and detailed presentation of the results for each method, their advantages and disadvantages are presented, as well as the justification for applying these methods to the single-diode model of a photovoltaic cell.

The aim of the comparative analysis is to identify the method that best determine the value of each parameter individually, as well as the method that provides the best match for the current-voltage characteristics and the maximum power point. This comparative analysis offers insight into the validity of the applied analytical methods, the errors that occur during calculations, and the convergence potential and speed of each method.

The comparative analysis provides a deeper understanding of the operational principles of photovoltaic cells and recommends the most suitable analytical method for parameter estimation of photovoltaic cells. This research can be used as a good foundation for developing a new analytical method that combines existing methods to obtain more accurate parameter values.

Analytical methods are a simple and useful tool for determining the parameters of solar cells. Due to the combination of precision, simplicity of mathematical relations, fast algorithm convergence, and connection with real environmental conditions, these methods are a valuable tool for real-time database determination. Understanding the limitations and advantages, these methods can be used for predicting the efficiency of photovoltaic cells under various environmental conditions, as well as in management systems for tracking the maximum power point.

Key words: analytical methods, single-diode model, solar cell.

Lista skraćenica

STC – Standardni test uslovi (eng. *Standard Test Conditions*)

SDM – Jednodiodni model (eng. *Single Diode Model*)

DDM – Dvodiodni model (eng. *Double Diode Model*)

TDM – Trodiodni model (eng. *Triple Diode Model*)

HISA – (eng. *Hybridized Interior Search Algorithm*)

RMSE – srednja kvadratna greška (eng. *Root Mean Square Error*)

I-V – strujno - naponska karakteristika

P-V – snaga - napon karakteristika

PERC (eng. *Passivated Emitter and Rear Cell*)

TOPCon (eng. *Tunnel Oxide Passivated Contact*)

IBC (eng. *Interdigitated Back Contact*).

CaTe – kadijum – telurid (CaTe)

CIGS – bakar – indijum – galijum selenid

I⁻ - jodid

Br⁻ - bromid

Cl⁻ - hlorid

Si – silicijum

R.T.C. - La Radiotechnique – Compelec

KS – kratak spoj

PH – prazan hod

MPP – tačka maksimalne snage (eng. *Maximum Power Point*)

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. SOLARNA ENERGIJA	4
2.1 Solarne tehnologije.....	5
3. SOLARNE ĆELIJE	8
3.1 Fotonaponski efekat.....	9
3.2 Jednodiodni model solarne ćelije	11
3.3 Estimacija parametara jednodiodnog modela solarnih ćelija	13
4. ANALITIČKE METODE	15
4.1 Teorijska osnova analitičkih metoda	16
4.2 Analitička metoda 1 – Vilalva	18
4.3 Analitička metoda 2 – Celik.....	21
4.4 Analitička metoda 3 - De Blas.....	22
4.5 Analitička metoda 4 – Orioli	25
4.6 Analitička metoda 5 – Chatterjee	27
4.7 Metoda 6 – Chatterjee i Sera	30
4.8 Metoda 7 – Lineykin.....	32
5. NUMERIČKI REZULTATI	35
5.1. Estimacija parametara R.T.C. France solarne ćelije	35
5.1.1 Estimacija parametara R.T.C. France – Metoda 1	36
5.1.2 Estimacija parametara R.T.C. France – Metoda 2	37
5.1.3 Estimacija parametara R.T.C. France – Metoda 3	39
5.1.4 Estimacija parametara R. T. C. France – Metoda 4	40
5.1.5 Estimacija parametara R.T.C. France – Metoda 5	42
5.1.8 Uporedna analiza estimacije parametara solarne ćelije R.T.C. France	48
5.2. Estimacija parametara Solarex MSX – 60.....	51
5.2.1 Estimacija parametara Solarex MSX – 60 solarnog modula – Metoda 1	52

5.2.2 Estimacija parametara Solarex MSX – 60 solarnog modula – Metoda 2.....	54
5.2.3 Estimacija parametara Solarex MSX – 60 solarnog modula – Metoda 3.....	55
5.2.4 Estimacija parametara Solarex MSX – 60 solarnog modula – Metoda 4.....	57
5.2.5 Estimacija parametara Solarex MSX – 60 solarnog modula– Metoda 5.....	58
5.2.6 Estimacija parametara Solarex MSX – 60 solarnog modula – Metoda 6.....	61
5.2.7 Estimacija parametara Solarex MSX – 60 solarnog modula – Metoda 7.....	63
5.2.8 Uporedna analiza estimacije parametara solarnog modula Solarex MSX - 60.....	65
5.3 Sinergija analitičkih metoda	68
ZAKLJUČAK.....	71
LITERATURA.....	73

LISTA SLIKA

Slika 2.1 Fotonaponski sistem	6
Slika 3.1 Poprečni presjek solarne ćelije	8
Slika 3.2 Šematski prikaz principa rada solarne ćelije	10
Slika 3.3 Ekvivalentna šema jednodiodnog modela solarne ćelija.....	12
Slika 4.1 Strujno – naponska karakteristika solarne ćelije	16
Slika 4.2 Blok dijagram Metode 1.....	20
Slika 4.3 Blok dijagram Metode 2.....	22
Slika 4.4 Blok dijagram Metode 3.....	24
Slika 4.5 Blok dijagram Metode 4.....	26
Slika 4.6 Blok dijagram Metode 5.....	30
Slika 4.7 Blok dijagram Metode 6.....	31
Slika 4.8 Blok dijagram Metode 7.....	34
Slika 5.1 I-V karakteristika R.T.C. France dobijena primjenom Metode 1.....	36
Slika 5.2 P-V karakteristika R.T.C. France dobijena primjenom Metode 1	37
Slika 5.3 I-V karakteristika R.T.C. France dobijena primjenom Metode 2.....	38
Slika 5.4 P-V karakteristika R.T.C. France dobijena primjenom Metode 2.....	38
Slika 5.5 I-V karakteristika R.T.C. France dobijena primjenom Metode 3.....	39
Slika 5.6 P-V karakteristika R.T.C. France dobijena primjenom Metode 3.....	40
Slika 5.7 I-V karakteristika R.T.C. France dobijena primjenom Metode 4.....	41
Slika 5.8 P-V karakteristika R.T.C. France dobijena primjenom Metode 4.....	41
Slika 5.9 I-V karakteristika R.T.C. France dobijena primjenom Metode 5.....	43
Slika 5.10 P-V karakteristika R.T.C. France dobijena primjenom Metode 5.....	44
Slika 5.11 I-V karakteristika R.T.C. France dobijena primjenom Metode 6.....	45
Slika 5.12 P-V karakteristika R.T.C. France dobijena primjenom Metode 6.....	46
Slika 5.13 I-V karakteristika R.T.C. France dobijena primjenom Metode 7.....	47
Slika 5.14 P-V karakteristika R.T.C. France dobijena primjenom Metode 7.....	47
Slika 5.15 Poređenje I-V karakteristika R.T.C. France	50

Slika 5.16 Poređenje P-V karakteristika R.T.C. France.....	51
Slika 5.17 I-V karakteristika Solarex MSX – 60 dobijena primjenom Metode 1	53
Slika 5.18 P-V karakteristika Solarex MSX – 60 dobijena primjenom Metode 1	53
Slika 5.19 I-V karakteristika Solarex MSX – 60 dobijena primjenom Metode 2	54
Slika 5.20 P-V karakteristika Solarex MSX – 60 dobijena primjenom Metode 2	55
Slika 5.21 I-V karakteristika Solarex MSX – 60 dobijena primjenom Metode 3	56
Slika 5.22 P-V karakteristika Solarex MSX – 60 dobijena primjenom Metode 3	56
Slika 5.23 I-V karakteristika Solarex MSX – 60 dobijena primjenom Metode 4	57
Slika 5.24 P-V karakteristika Solarex MSX – 60 dobijena primjenom Metode 4	58
Slika 5.25 I-V karakteristika Solarex MSX – 60 dobijena primjenom Metode 5	60
Slika 5.26 P-V karakteristika Solarex MSX – 60 dobijena primjenom Metode 5	60
Slika 5.27 I-V karakteristika Solarex MSX – 60 dobijena primjenom Metode 6	62
Slika 5.28 P-V karakteristika Solarex MSX – 60 dobijena primjenom Metode 6	62
Slika 5.29 I-V karakteristika Solarex MSX – 60 dobijena primjenom Metode 7	64
Slika 5.30 P-V karakteristika Solarex MSX – 60 dobijena primjenom Metode 7	64
Slika 5.31 Poređenje I-V karakteristika Solarex MSX – 60.....	66
Slika 5.32 Poređenje P-V karakteristika Solarex MSX – 60.....	67

LISTA TABELA

Tabela 5.1 – Podaci sa natpisne pločice R.T.C. France solarne ćelije.....	35
Tabela 5.2 – Rezultati estimacije parametara R.T.C. France Metodom 1	36
Tabela 5.3 – Rezultati estimacije parametara R.T.C. France Metodom 2	37
Tabela 5.4 – Rezultati estimacije parametara R.T.C. France Metodom 3	39
Tabela 5.5 – Rezultati estimacije parametara R.T.C. France Metodom 4	40
Tabela 5.6 – Estimacija vrijednosti nepoznatih parametara R_s , R_p i a solarne ćelije R.T.C. France Metodom 5 za različite početne vrijednosti R_{p0} i R_{s0}	42
Tabela 5.7 – Rezultati estimacije parametara R.T.C. France Metodom 5	43
Tabela 5.8 – Estimacija vrijednosti nepoznatih parametara R_s , R_p i a solarne ćelije R.T.C. France Metodom 6 za različite početne vrijednosti R_{p0} i R_{s0}	44
Tabela 5.9– Rezultati estimacije parametara R.T.C. France Metodom 6	45
Tabela 5.10 – Rezultati estimacije parametara R.T.C. France Metodom 7	46
Tabela 5.11 – Rezultati estimacije parametara svih sedam metoda i HISA na primjeru solarne ćelije R.T.C. France.....	48
Tabela 5.12 – Podaci sa natpisne pločice solarnog modula Solarex MSX – 60.....	52
Tabela 5.13 – Rezultati estimacije parametara Solarex MSX – 60 Metodom 1.....	52
Tabela 5.14 – Rezultati estimacije parametara Solarex MSX – 60 Metodom 2.....	54
Tabela 5.15 – Rezultati estimacije parametara Solarex MSX – 60 Metodom 3.....	55
Tabela 5.16 – Rezultati estimacije parametara Solarex MSX – 60 Metodom 4.....	57
Tabela 5.17 – Estimacija vrijednosti nepoznatih parametara R_s , R_p i a solarnog modula Solarex MSX - 60 Metodom 5 za različite početne vrijednosti R_{p0} i R_{s0}	59
Tabela 5.18 – Estimacija vrijednosti nepoznatih parametara solarnog modula Solarex MSX – 60 R_s , R_p i a Metodom 6 za različite početne vrijednosti R_{p0} i R_{s0}	61
Tabela 5.19 – Rezultati estimacije parametara modula Solarex MSX - 60 Metodom 7	63
Tabela 5.20 – Rezultati estimacije parametara svih sedam metoda na primjeru solarnog modula Solarex MSX – 60	65
Tabela 5.21 – Sinergija rezultata estimacije parametara primjenom sedam analitičkih metoda na primjeru solarne ćelije R.T.C. France i solarnog modula MSX- 60.....	69

Tabela 5.22 – Sinergija I-V i P-V karakteristika dobijenih primjenom sedam analitičkih metoda na primjeru solarne ćelije R.T.C. France i solarnog modula MSX- 60.....	70
---	----

1. UVOD

U savremenom dobu primijećen je rastući trend potrebe za energijom. Proces industrijalizacije, povećanje populacije, pojava novih tehnologije i uvođenja električne energije u gotovo sve sfere života su neke od aktualnih tema u svijetu energetike [1]. Zbog ubrzanog porasta zahtjeva za električnom energijom, a uvažavajući zahtjeve vezane za očuvanje životne sredine i održivog razvoja, globalna politika se sve više okreće obnovljivim izvorima energije [2] – [3]. Velike energetske krize 21. – og vijeka koje su prouzrokovane zdravstvenim krizama poput Covid-19 virusa i ratovima koji se vode širom svijeta [4] – [5], su još neki od razloga okretanja obnovljivim izvorima energije. Obnovljivi izvori predstavljaju siguran način za podmirivanje potreba stanovništva za električnom energijom. Tranzicioni procesi, u kojem se proizvodnja električne energije iz konvencionalnih izvora pokušava zamijeniti proizvodnjom iz obnovljivih izvora, predstavljaju jedino rješenje za očuvanje integriteta sistema, obezbjeđenje dovoljne količine energije, održivi razvoj i očuvanje životne sredine [6].

Fotonaponski sistemi [7] – [8] koji za proizvodnju električne energije koriste sunčevo zračenje imaju vodeću ulogu u tranzicionom procesu ka održivom energetskom razvoju zahvaljujući gotovo neiscrpnom potencijalu Sunčeve energije. Sunce je najveći izvor energije na Zemlji i esencijalni obnovljivi izvor. Sunce emituje oko $3.8 \cdot 10^{14}$ kWh solarne energije od čega Zemlja presrijeće oko $1.8 \cdot 10^{14}$ kWh godišnje [9]. Ova količina energije bi uspješno pokrila sve potrebe za električnom energijom na Zemlji u toku godine. Međutim, potencijal koji je moguće iskoristiti je značajno manji zbog različitih uticajnih faktora poput vremenskih varijacija, geografske pozicije, oblačnosti i slično. Naučna istraživanja u oblasti solarne energije okrenuta su ka optimizaciji rada, povećanja efikasnosti i iskoristivosti sunčevog zračenja. Zahvaljujući inovacijama i uvođenju novih tehnologija, smatra se da će solarna energija u bliskoj budućnosti pokrivati najveći dio potreba za električnom energijom [10].

Pravilno modelovanje i dimenzionisanje solarnih ćelija/modula kao osnovnih jedinica svakog fotonaponskog sistema, igra osnovnu ulogu u optimizaciji, povećanju efikasnosti i iskoristivosti ovih sistema. Zahvaljujući dobrom uvidu u kvalitet izrade i osnovne karakteristike solarnih ćelija, minimizuju se gubici, optimizuje se kompatibilnost i sistemaska integracija. Obezbeđivanjem većeg broja podataka moguće je praviti prognoze proizvodnje, procjene životnog vijeka, predviđanje zahtjeva održavanja i optimalan dizajn solarnih sistema [11] – [12].

Za prikazivanje fizičkih procesa koji se odvijaju unutar solarne ćelije pri konverziji solarne u električnu energiju postoje tri ustaljena modela solarnih ćelija [13] – [14], a to su jednodiodni

model (eng. Single Diode Model – SDM), dvodioidni model (eng. Double Diode Model – DDM) i trodiodni model (eng. Triple Diode Model – TDM). Ovi modeli predstavljaju ekvivalentne šeme električnih kola solarne ćelije na osnovu kojih se vrši estimacija nepoznatih parametara. U laboratorijskim uslovima, prilikom izrade solarnih ćelija proizvođači vrše njihova ispitivanja. Pri standardnim test uslovima (eng. Standard Test Conditions - STC), najčešće nominalnoj temperaturi $T_n = 25^\circ$ i iradijaciji $G_n = 1000 \text{ W/m}^2$ dobijaju se podaci o struji kratkog spoja, naponu praznog hoda, struji i naponu tačke maksimalne snage, maksimalnoj snazi, temperaturnim strujnim i naponskim koeficijentima i strujno – naponskim (I-V) karakteristikama [15]. Ovi podaci nijesu dovoljni za kompletan uvid u rad i efikasnost solarne ćelije, zato je potrebno naći način za predstavljanje ćelije u svim uslovima sredine i pri svim situacijama koje se mogu javiti.

Estimacija parametara na primjeru SDM, DDM i TDM vrši se uz pomoć različitih metoda. SDM predstavlja najjednostavniji prikaz solarne ćelije koji ima 5 nepoznatih parametara [16]. DDM koristi dvije diode za predstavljanje fizičkih procesa unutar solarne ćelije, dajući precizan uvid u njeno ponašanje pri nižim temperaturama [17]. Ovaj model ima 7 nepoznatih parametara. TDM je unaprijeđeni model koji prikaz fizičkih procesa vrši uz pomoć još jedne dodatne diode dajući opsežno razumijevanje solarnih ćelija [18].

SDM daje pojednostavljen prikaz složenih fizičkih procesa unutar solarne ćelije korišćenjem jedne diode. Iako najjednostavniji od svih prikaza, ovaj model sa velikom tačnošću pruža uvid u dizajn, rad i efikasnost solarne ćelije. Isti se sastoji od pet nepoznatih parametara, koji su ključni za uvid u stanje solarne ćelije. Ovaj model je pogodan za vršenje estimacije parametara uz pomoć različitih metoda.

Do sada razvijene metode za estimaciju parametara mogu se podijeliti u tri grupe:

- analitičke,
- metaheurističke i
- hibridne metode [19].

Analitičke metode su najpogodnije za estimaciju parametara i baziraju se na kreiranju seta analitičkih relacije na osnovu poznatih ulaznih parametara koji se dobijaju, dominantno, od proizvođača [20]. Ove dodatne relacije, izvedene iz osnovne strujno-naponske jednačine, na brz i efikasan način vrše estimaciju parametra solarne ćelije. SDM i analitičke metode predstavljaju idealnu kombinaciju za preciznu, a jednostavnu procjenu parametara solarne ćelije. Analitičke metode za estimaciju parametara na primjeru SDM modela solarne ćelije nijesu najpreciznije od svih ostalih metoda. Razlog je primjena određenih aproksimacija za brže i jednostavnije izvršenje algoritama. Međutim, svaka od poznatih analitičkih metoda daje procjenu nekog od pet nepoznatih

parametara sa različitom preciznošću. Zbog toga je ključno odrediti koliko precizno se vrši procjena svakog parametra primjenom ovih metoda.

U ovom radu biće izvršena komparativna analiza vrijednosti nepoznatih parametara, strujno-naponskih i napon-snaga karakteristika dobijenih primjenom različitih analitičkih metoda pri STC na primjerima literaturno poznate solarne ćelije R.T.C. France i solarnog modula Solarex MSX – 60. Komparativnom analizom utvrdiće se koja od analitičkih metoda daje rezultate sa najvećom preciznošću, a koja od metoda je najbolje primjenjiva u sistemima upravljanja koji zahtijevaju precizno određivanje tačke maksimalne snage.

U drugom poglavlju ovog rada biće riječi o solarnoj energiji i njenom značaju. Takođe, ukratko će biti opisane fotonaponske tehnologije, počevši od materijala za izradu, djelova koji se koriste u fotonaponskim sistemima, pa sve do opisa postojećih solarnih elektrana.

U trećem poglavlju rada su predstavljene solarne ćelije. Objašnjen je njihov princip rada i fizički procesi koji se dešavaju unutar njih, tj. način na koji se vrši konverzija solarne energije u električnu i komponente od kojih ta konverzija zavisi. Pored realnih procesa unutar ćelije, prikazana je ekvivalentna šema jednodiodnog modela solarne ćelije uz pomoć kojeg se prikazuju fizički procesi i vrši matematičko modelovanje za potrebe analiza i estimacije parametara, kao i prikaza struja-napon i snaga – napon (P - V) karakteristika solarne ćelije. Ova šema je model na kojem se bazira rad i biće detaljno objašnjena sa aspekta nepoznatih parametara koje je potrebno procijeniti.

U četvrtom poglavlju rada dat je pregled literaturno dostupnih analitičkih metoda za estimaciju parametara solarne ćelije/modula. Svaki od metoda je detaljno opisan što podrazumijeva opis inicijalnih uslova, pretpostavki, analitičkih jednačina, i njihovih aproksimacija.

Peto poglavlje je posvećeno rezultatima dobijenim primjenom sedam različitih analitičkih metoda na primjeru literaturno poznate solarne ćelije R.T.C. France i literaturno poznatog solarnog panela Solarex MSX – 60. Rezultati se odnose na vrijednosti pet nepoznatih parametara, izgledu I - V i P - V karakteristika, kao i po pitanju odstupanja tačke maksimalne snage (eng. Maximum Power Point, MPP). Na osnovu dobijenih rezultata, u ovom poglavlju je izvršena komparativna analiza i sinergija analitičkih metoda za estimaciju parametara.

U zaključku je dat osvrt na rezultate dobijene istraživanjem; predstavljen je značaj i mogućnost primjene rezultata dobijenih komparativnom analizom, i date su smjernice za neka buduća istraživanja.

2. SOLARNA ENERGIJA

Energija predstavlja jednu od trenutno najvećih potreba čovječanstva. Najveću ulogu u životu savremenog čovjeka igra električna energija koja se može smatrati jednim od osnovnih potreba i bez koje je razvoj društva nezamisliv. Potreba za električnom energijom stalno raste. Sa druge strane dolazi do smanjenja količine neobnovljivih izvora energije, koji su trenutno konvencionalni izvori električne energije, okretanja ka očuvanju životne sredine i održivom razvoju zemalja. Zbog svega navedenog, postoji težnja da se u bliskoj budućnosti neobnovljivi izvori zamijene obnovljivim izvorima za proizvodnju električne energije.

Najpoznatiji i najviše prihvaćeni obnovljivi izvor energije je solarna energija. Solarna energija, sunčevo zračenje i toplota Sunca, poznata je ljudima nekoliko milenijuma i iskorišćavana je upotrebom različitih tehnologija. Ovaj vid energije je obnovljiv, neiscrpan i održiv.

Sunce je najveći izvor energije na Zemlji. Neke od najbitnijih karakteristika Sunca su [21]:

- Masa Sunca mjerena je korišćenjem Keplerovog zakona i orbitalnih parametara planeta. Smatra se da je 333 000 puta veća od mase Zemlje.
- Temperatura na površini Sunca varira od 5600 do 6000 K.
- Sunce se dominantno sastoji od vodonika (71%), helijuma (27.1%), kiseonika (0.97%).

Količina solarne radijacije koja dopijeva do gornjih slojeva Zemljine atmosfere približno je jednaka 1.361 kW/m^2 [22]. Kako ova energija putuje kroz atmosferu, jedan dio se gubi rasijanjem, refleksijom i apsorpcijom od strane oblaka zbog čega je iradijacija na površini Zemlje u prosjeku oko 1000 kW/m^2 .

Solarna energija ima mnogobrojne prednosti u odnosu na ostale vidove energije [23]. U posljednje vrijeme dolazi do ekspanzije korišćenja solarne energije, a neki od benefita navedeni su u nastavku:

- Gledano sa ekološkog aspekta konverzijom solarne energije u električnu ili toplotnu energiju dolazi do smanjenja štetnih gasova koji se ispuštaju u atmosferu. Solarni paneli, koji su najčešće upotrebljavana tehnologija, ne utiču na stvaranje efekta staklene bašte.
- Sunčeva energija je neiscrpan izvor energije.
- Solarne tehnologije su veoma jednostavne za instalaciju i održavanje. Životni vijek solarnih panela je čak i više od 25 godina i za ovaj vremenski period gotovo da nije potrebno ulagati u prethodno instalirane panele.
- Zahvaljujući tehnološkom napretku, inovacijama i povećanju efikasnosti proizvodnje, solarne tehnologije postaju sve pristupačnije i češće korišćeno rješenje.

- Fotonaponski sistemi našli su mogućnost primjene u različitim sferama, počevši od elektronike, domaćinstva, preko industrije, pa sve do svemirskih tehnologija i velikih solarnih elektrana.

Pored ovih opšte poznatih prednosti, neophodno je navesti prednosti koje solarne tehnologije imaju na postojeće elektro-energetske sisteme [24] – [25]:

- Zahvaljujući modularnosti fotonaponskih sistema moguće ih je prilagođavati potrebama za električnom energijom.
- Potencijal solarne energije se može iskoristiti za proizvodnju električne energije u ruralnim oblastima i mjestima udaljenim od tradicionalne elektro-energetske infrastrukture.
- U kombinaciji sa rješenjima za skladištenje energije, solarna energija pruža pouzdan pristup električnoj energiji.
- Solarni sistemi mogu pokriti dobar dio potrošnje domaćinstava i industrije. Na taj način se doprinosi rasterećenju elektro-energetske mreže i smanjenju zagušenja u ovoj mreži.
- Kako se radi o distribuiranim izvorima energije, moguće ih je postaviti na mjesta gdje je opterećenje veliko. To doprinosi smanjenju opterećenja i povećanju stabilnosti elektro-energetske mreže.

Pored nabrojanih prednosti potrebno je uvažiti i izazove solarnih tehnologija, a to su:

- Promjenljivost proizvodnje u zavisnosti od doba dana, vremenskih uslova, oblačnosti i geografske pozicije.
- Promjenljivost proizvodnje negativno utiče na stabilnost elektro-energetskog sistema u kojem su integrisani, zbog čega postoji potreba za regulacijom napona.
- Efikasnost najčešće korišćenih tehnologija, solarnih panela, još uvijek je relativno niska u poređenju sa drugim izvorima energije.
- Kako bi se proizvele veće količine električne energije, potrebno je obezbijediti velike površine.
- Reciklaža starih solarnih panela predstavlja veliki izazov zbog korišćenja toksičnih materijala za njihovu proizvodnju, kao i same količine utrošenog materijala.

2.1 Solarne tehnologije

Prva solarna tehnologija koja je pokazala veći potencijal za proizvodnju električne energije zasnivala se na upotrebi solarne termalne energije. Solarni termalni sistemi [26] ne vrše direktnu konverziju solarne u električnu energiju. Naime, ovi sistemi rade na principu proizvodnje pare koja služi za pokretanje turbina, a zatim se mehanička energija turbina pretvara u električnu energiju.

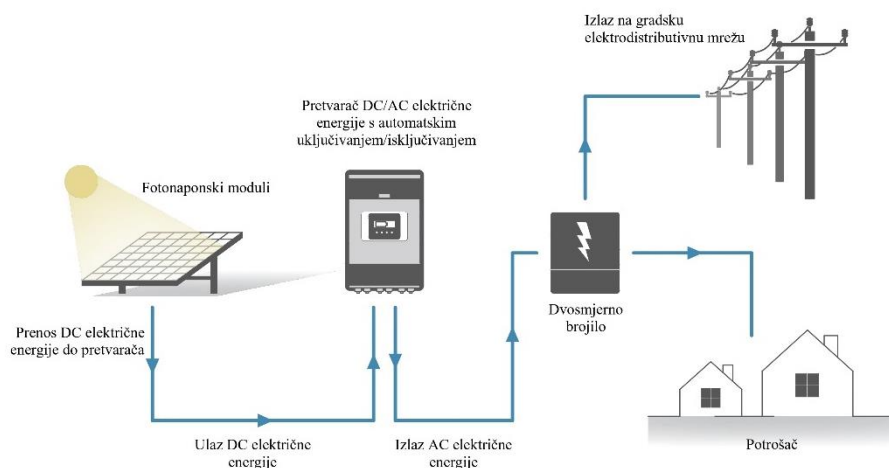
Ovi sistemi se vrlo često koriste za grijanje, zagrijavanje vode ili generisanje toplote za potrebe industrijskih procesa. Pored navedenog koriste se i za proizvodnju električne energije.

Pored korišćenja solarne termalne energije tu su i niskotemperaturni solarni termalni sistemi [27]. Najčešća primjena ovih sistema je za proizvodnju tople vode u bazenima i uspostavljanje sistema grijanja u zgradama. Pored toga, u kombinaciji sa uređajima za fokusiranje sunčevog zračenja i proizvodnju veće količine toplote, ova energija se koristi za pokretanje konvencionalnih parnih motora.

Najčešće korišćeni i za sada najisplativiji vid tehnologija koje koriste sunčevo zračenje predstavljaju fotonaponske tehnologije [28] – [29]. Za izradu fotonaponskih uređaja koriste se poluprovodnički materijali koji pod uticajem sunčeve svjetlosti omogućavaju generisanje slobodnih nosilaca naelektrisanja, elektrona, i njihovo kretanje. Na ovaj način nastaje električna energija.

Osnovna jedinica fotonaponskih sistema je solarna ćelija [30] – [31] čija efikasnost za proizvodnju električne energije varira u zavisnosti od materijala i tehnologije izrade. Kako bi se količina električne energije povećala, solarne ćelije se povezuju serijski i paralelno i formiraju solarne module. Dakle, moduli proizvode više električne energije i imaju veće napone na svojim priključnim krajevima. Solarni paneli [32] sastavljeni su od skupa solarnih modula koji su međusobno povezani.

Fotonaponski sistemi [33] se sastoje od većeg broja solarnih panela za proizvodnju električne energije i elektronskih uređaja za kontrolu i regulaciju (Slika 2.1). Ove tehnologije našle su primjenu u različitim društvenim sferama počevši od domaćinstva, industrije, pa do elektroenergetskih sistema.



Slika 2.1 Fotonaponski sistem

Veliki dio fotonaponskih sistema postavljen je na krovovima stambenih i poslovnih objekata [34]. Ovi sistemi sastoje se od više solarnih panela i služe za direktnu konverziju sunčeve energije u toku dana, a u kombinaciji sa akumulacionim baterijama višak energije se može koristiti i tokom noći. Na ovaj način dolazi do rasterećenja elektro-energetskog sistema. Trajnost fotonaponskih sistema varira u zavisnosti od uslova sredine, pravilnog održavanja i opterećenja. Proizvodnja iz solarnih panela varira u zavisnosti od godišnjeg doba, doba dana, oblačnosti, osjenčenosti i geografske lokacije na kojoj je postavljen.

Pored prethodno opisanih fotonaponskih sistema, posljednjih godina dolazi do ekspanzije solarnih elektrana [35]. Ove elektrane služe za konverziju solarne u električnu energiju u većim razmjerama. Razlikuju se po veličini i konfiguraciji. Najveće solarne elektrane pokrivaju nekoliko stotina hektara u oblastima sa dovoljno sunčeve svjetlosti. Velike solarne elektrane obično su dimenzionisane za maksimalnu snagu od više stotina do nekoliko hiljada MW. Obično su povezane na prijenosnu infrastrukturu. Druga kategorija su solarne elektrane srednje snage, koje mogu proizvesti do 100 MW i povezane su na distributivne mreže.

Fotonaponski sistemi nalaze veliku primjenu u mikromrežama [36]. Zahvaljujući kombinaciji sistema za proizvodnju, skladištenje i pametno upravljanje ovi sistemi pružaju odličan izvor energije i za ruralna područja udaljena od elektro-energetskih infrastruktura, za male zajednice u okviru gradova, poput stambenih blokova, ostrvske sisteme i slično.

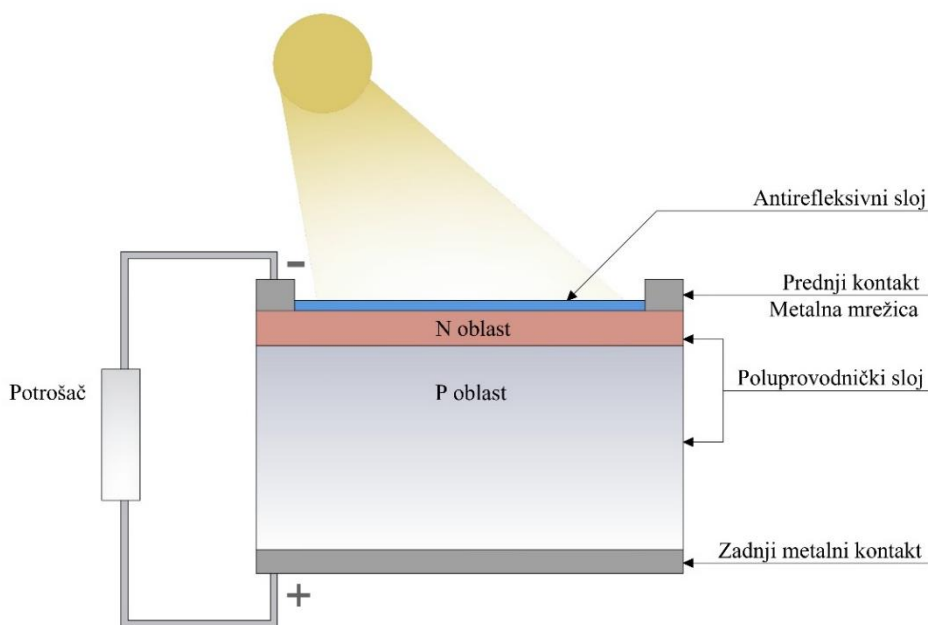
Posljednjih godina pojavili su se pilot projekti koji su još u fazi razvoja, a odnose se na fotonaponske sisteme postavljene na plutajućim platformama na površini vode [37]. Ovi sistemi koriste fotonaponske module kao i konvencionalni kopneni sistemi i postavljaju se na teritorijalnim vodama u blizini kopna. Velika prednost je u iskorišćenju površine vode u osunčanim regijama koja se u normalnim uslovima ne bi koristila ni za koju drugu namjenu. Iako su još uvijek u fazi razvoja, ovi sistemi predstavljaju potencijal za proizvodnju električne energije.

3. SOLARNE ČELIJE

Solarna energija predstavlja jednu od najpristupačnijih i najpraktičnijih vidova energije. U prethodnom poglavlju opisane su tehnologije koje se koriste za eksploataciju solarne energije tj. njeno pretvaranje u električnu i toplotnu energiju. Fotonaponski sistemi ipak predstavljaju najbolji i najoptimalniji način korišćenja solarne energije za proizvodnju električne energije. Kao što je već naglašeno, fotonaponski uređaji su uređaji napravljeni na bazi poluprovodnika koji vrše direktnu konverziju sunčevog zračenja u solarnu energiju.

Osnovna jedinica fotonaponskih sistema je solarna ćelija. Solarna ćelija može se predstaviti kao poluprovodnička dioda koja je dizajnirana da generiše električnu energiju iz sunčevog zračenja [38]. Za izradu se koristi poluprovodnički materijal poput silicijuma čija je jedna strana dopirana petovalentnim primjesama i formira n – tip poluprovodnika, a druga strana je dopirana trovalentnim primjesama formirajući p – tip poluprovodnika [39].

Jednostavna struktura solarne ćelije [40] prikazana je na slici 3.1. Sastoji se od metalne mrežice koja predstavlja električni kontakt diode. Ispod metalne mrežice nalazi se antirefleksivni sloj koji povećava količinu apsorbirane svjetlosti. Poluprovodni sloj ili dioda sastavljen je od p i n tipa međusobno spojenih poluprovodnika. Na zadnjoj strani solarne ćelije nalazi se drugi električni kontakt pravljen od metala.



Slika 3.1 Poprečni presjek solarne ćelije

Za izradu solarnih ćelija koriste se različite tehnologije i različiti materijali [41] – [42]. Dizajn i materijal igraju veoma važnu ulogu u efikasnosti, optimizaciji rada kao i robusnosti solarnih ćelija. Najčešće korišćeni i najekonomičniji materijal za izradu solarnih ćelija je silicijum (Si). Silicijumske ćelije pripadaju prvoj generaciji solarnih ćelija. Dije se na monokristalne, polikristalne i amorfne solarne ćelije. Monokristalne silicijumske solarne ćelije nastaju putem Czochralski procesa [43]. Radi se o veoma skupom procesu koji se zasniva na sječenju velikih poluga silicijuma na male kristale. Monokristalne Si solarne ćelije imaju efikasnost i preko 18% [44]. Polikristalne silicijumske solarne ćelije dobijaju se mješavinom različitih kristala hlađenih u grafitnim kalupima. Ovaj proces je mnogo ekonomičniji, ali daje ćelije maksimalne efikasnosti 14% [45].

Praktična primjena sprovedenih istraživanja dovela je do razvoja visokoeffikasnih kristalno – silicijumskih solarnih ćelija [46]. Pojavile su se brojne napredne tehnologije poput PERC (eng. Passivated Emitter and Rear Cell), TOPCon (eng. Tunnel Oxide Passivated Contact), i IBC (eng. Interdigitated Back Contact). Ove tehnologije dovele su do povećanja efikasnosti i do 25 % zahvaljujući smanjenu gubitaka i rekombinacije unutar ćelija.

Drugu generaciju solarnih ćelija čine tankoslojne solarne ćelije [47]. Obično se izrađuju od amornog silicijuma, kadijum – telurida (CdTe) i Bakar – indijum – galijum selenida (CIGS). Kao što im i samo ime kaže izrađuju se uz pomoć tankoslojne tehnologije. Efikasnost ovih ćelija može dostići i preko 19% [48]. Ćelije od amornog silicijuma koje se dobijaju primjenom tankoslojne tehnologije imaju znatno nižu efikasnost od ostalih ćelija pravljenih ovom tehnologijom.

Treća generacija solarnih ćelija uključuje tehnologije koje su u fazi istraživanja i unapređenja, a to su nanokristalne, polimerne i koncentrisane solarne tehnologije.

U posljednje vrijeme, pažnja naučne javnosti usmjerena je na Petrovskite solarne ćelije [49]. Ove ćelije mogu se opisati formulom ABX₃ gdje je X halogeni jon kao što je jodid (I⁻), bromid (Br⁻) i hlorid (Cl⁻), dok su A i B katjoni različitih veličina. Ovo je tehnologija koja pokazuje veliki potencijal i efikasnost čak do 31%. Međutim, stabilnost i životni vijek ovih ćelija je veoma mali. Ovo predstavlja veoma veliki izazov za Petrovski tehnologiju.

Prethodno navedene tehnologije su najčešće primjenjivane tehnologije za izradu solarnih ćelija. Tehnologije izrade koje se koriste zavise od željenih rezultata, performansi i troškova proizvodnje.

3.1 Fotonaponski efekat

Osnovno razumijevanje strukture atoma je od velike pomoći za razumijevanje ponašanja poluprovodnika i njihove upotrebe kod fotonaponskih uređaja. Atom se sastoji od jezgra u kojem

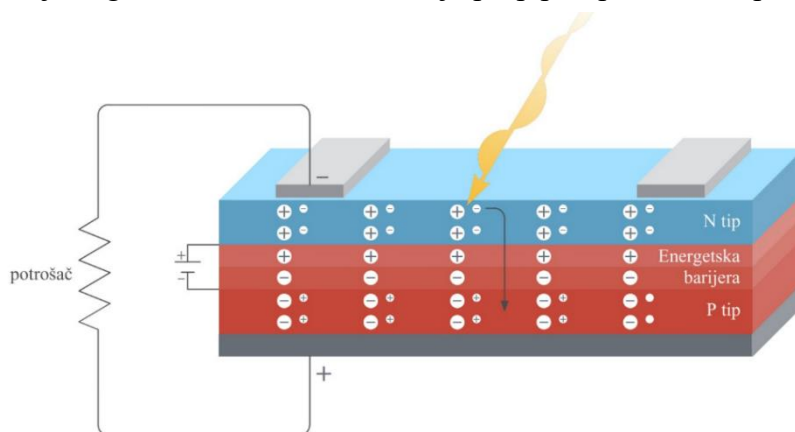
se nalaze pozitivno naelektrisane čestice protoni i neutralne čestice neutroni i od elektronskog omotača sastavljenog od negativno naelektrisanih čestica, elektrona. Svaki elektron u elektronskom omotaču ima svoj energetski nivo. U normalnim okolnostima, kada atom nije pobuđen, elektron zauzima svoj energetski nivo. Kada se atomu dovede kvant energije, dolazi do kretanja elektrona od nižeg ka višem energetskom nivou. Elektroni iz posljednjeg energetskog nivoa nazivaju se valentni elektroni i njima je potrebna najmanja količina energije da bi napustili atom i prešli u provodni sloj materijala koji se nalazi izvan atoma.

Poluprovodnički materijali poput silicijuma sastoje se od kristalne rešetke. Naime, svaki atom silicijuma je četvorovalentan i on sa susjednim atomom gradi kovalentnu vezu, tj. dijeleći elektrone popunjava valentne energetske nivoe.

Fotonaponski efekat [50] zasniva se na sposobnosti poluprovodničkih materijala da energiju apsorbovanu iz svjetlosti pretvore u električnu energiju. Osnovni nosioci energije sunčevog zračenja su fotoni. Kada foton udara u atom poluprovodnika, on mu prenosi određenu energiju. Ukoliko je energija fotona veća od energije kojom je valentni elektron vezan za atom, elektron prelazi u provodnu zonu ostavljajući za sobom šupljinu i praveći pozitivno naelektrisan jon. Elektron je sada slobodan nosilac naelektisanja koji se kreće kroz provodnu zonu poluprovodničkog materijala.

Materijali koji imaju djelimično popunjeni valentni pojas nazivaju se poluprovodnici. Kako bi se praktično objasnio fotonaponski efekat, u nastavku će biti prikazan na primjeru silicijuma kao najčešće korišćenog poluprovodničkog materijala.

Poluprovodnički materijali se dopiraju različitim elementima kako bi se stvorili p i n tip poluprovodnika [51] – [52]. P tip poluprovodnika nastaje kada se čistom silicijumu doda element sa tri valentna elektrona. To u valentnom pojasu stvara višak šupljina. N tip poluprovodnika nastaje dopiranjem čistog silicijuma petovalentnim elektronima, što stvara višak elektrona. Dakle, n tip poluprovodnika je negativno naelektrisan, dok je p tip poluprovodnika pozitivno naelektrisan.



Slika 3.2 Šematski prikaz principa rada solarne ćelije

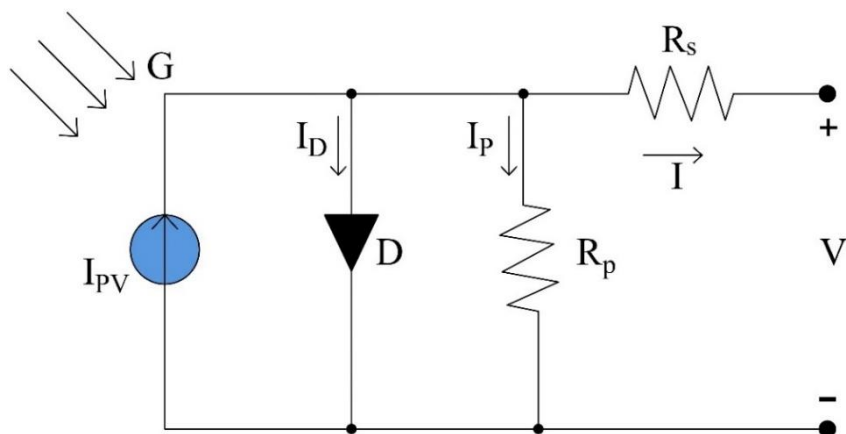
Fotoni dopiru na površinu poluprovodničkog materijala i predaju svoju energiju slobodnim nosiocima naelektrisanja, što dovodi do njihovog kretanja. Jedan dio nosilaca naelektrisanja se rekombinuje stvarajući stabilne parove elektron šupljine na granici između p i n tipa poluprovodnika. Ovako stvoren pojas naziva se energetska barijera [53] koja ima svoje polje koje se suprostavlja kretanju slobodnih nosilaca naelektrisanja. Ostatak elektrona iz n tipa kreće se ka pozitivno naelektrisanjoj elektrodi, dok se šupljine kreću ka negativno naelektrisanjoj elektrodi. Ukoliko je predata energija fotona veća od energije kojom se energetska barijera suprostavlja kretanju slobodnih nosilaca naelektrisanja, oni će prevazići energetska barijeru i doći će do pojave električne struje. Prethodno opisani fenomen prikazan je na slici 3.1 i naziva se fotonaponski efekat.

Metalna mrežica zadužena je za sakupljanje elektrona, dok je donji kontakt zadužen za skupljanje šupljina. Metalni kontakti povezani su spoljašnjim električnim krugom sa opterećenjem. Između spojenih kontakata kreira se razlika potencijala što dovodi do pojave električne struje. Princip rada solarne ćelije se može porediti sa principom rada diode. Zahvaljujući postojanju energetske barijere, količina električne energije koja se proizvede direktno je proporcionalna sa količinom energije dobijene iz sunčevog zračenja.

3.2 Jednodiodni model solarne ćelije

Ponašanje solarnih ćelija i prethodno navedeni fizički procesi koji se događaju unutar ovih ćelija mogu se prikazati uz pomoć ekvivalentnih šema električnog kola [54]. Ovi modeli omogućavaju analizu, projektovanje i praćenje rada solarnih ćelija. Za sad se najčešće koriste modeli sa jednom diodom SDM, model sa dvije diode DDM i model sa tri diode TDM. SDM je najjednostavniji model solarne ćelije. Uprkos svojoj jednostavnosti najčešće se koristi za predstavljanje rada solarnih ćelija. DDM se koristi za preciznije analize rada solarne ćelije u uslovima koji se razlikuju od idealnih. TDM je koristan za analizu kompleksnih solarnih ćelija koji imaju vrlo neujednačene uslove rada poput onih ugrađenih u koncentrovanim fotonaponskim sistemima.

Jednodiodni model solarne ćelije [55] – [56] je najjednostavniji i najčešće korišćeni model za analizu rada fotonaponskog sistema. Ekvivalentna šema jednodiodnog modela prikazana je na slici 3.3. Kao što se vidi sa slike 3.3, ovaj model se sastoji od izvora struje, diode, jedne paralelne i serijske otpornosti.



Slika 3.3 Ekvivalentna šema jednodiodnog modela solarne ćelije

Primjenom Kirhofovih i Omovog zakona na ekvivalentno kolo jednodiodnog modela solarne ćelije dobijaju se sljedeće relacije:

$$I_{pv} - I_D - I_P - I = 0 \quad (3.1)$$

$$V_D - V - IR_s = 0 \quad (3.2)$$

$$I_P = \frac{V_D}{R_p} \quad (3.3)$$

gdje je:

I – struja na izlazu solarne ćelije,

I_{pv} – fotostruja,

I_D – struja diode,

I_P – struja kroz granu sa paralelnom otpornošću,

V_D – napon diode,

R_s – serijska otpornost i

R_p – paralelna otpornost.

Struja diode se predstavlja kao:

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{q(IR_s + V)}{aNKT}} - 1 \right) \quad (3.4)$$

gdje je:

I_0 – inverzna struja zasićenja diode,

a – faktor idealnosti diode,

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

$K = 1.3805405 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$ – Bolcmanova konstanta,

T – ambijentalna temperatura i

N – broj ćelija povezanih u jedan moduo ($N = 1$ za solarnu ćeliju).

Kombinovanjem i sređivanjem relacija (3.1) – (3.4) dobija se osnovna relacija koja opisuje ekvivalentno kolo SDM solarne ćelije:

$$I = I_{pv} - I_0 \left(e^{\frac{(IR_s + V)}{aV_t}} - 1 \right) - \frac{IR_s + V}{R_p} \quad (3.5)$$

gdje je $V_t = NKT/q$ termički napon diode.

Jednačina (3.5) je transcendentna nelinearna jednačina koja ima pet nepoznatih parametara, a to su I_{pv} , I_0 , R_s , R_p i a . Svi nepoznati parametri koje je potrebno odrediti imaju svoj značaj, tj. predstavljaju određene fizičke karakteristike solarne ćelije [57] – [60]:

1. Fotostruja I_{pv} objašnjava mogućnost konverzije solarne energije u električnu. Ova struja nastaje kao posljedica kretanja slobodnih nosilaca naelektrisanja unutar solarne ćelije podsredstvom sunčevog zračenja. Vrijednost struje I_{pv} zavisi najviše od količine zračenja koju solarna ćelija apsorbira, ali i od iradijacije i temperature.
2. Inverzna struja zasićenja diode I_0 predstavlja struju koja se javlja pri smanjenoj količini svjetlosti unutar solarne ćelije. Na osnovu I_0 dobija se uvid u procese koji se u solarnoj ćeliji javljaju pri manjim količinama apsorbovane svjetlosti i njenoj sposobnosti da provodi električnu energiju pod ovim uslovima.
3. Faktor idealnosti diode a opisuje kvalitet izrade solarne ćelije. Ovaj faktor pokazuje koliko je realna solarna ćelija bliska idealnoj diodi.
4. Serijska otpornost R_s i paralelna otpornost R_p direktno se povezuju sa kvalitetom izrade solarne ćelije i njenim dizajnom. Serijska otpornost predstavlja otpor koji se javlja između elektroda i poluprovodničkog materijala kao i između p i n sloja poluprovodničkog materijala. Paralelna otpornost je otpornost koja se javlja prema strujama curenja nastalim kao posljedica neidealnosti poluprovodničkog materijala.

3.3 Estimacija parametara jednodiodnog modela solarnih ćelija

Tablični podaci dobijeni od proizvođača solarnih ćelija koriste se za predviđanje i praćenje rada fotonaponskih sistema. Kako bi se dobio veliki broj pouzdanih podataka, potrebno je izvršiti kompleksna laboratorijska mjerenja koja dovode do povećanja troškova proizvodnje. Estimacija parametara jednodiodnog modela može precizno predvidjeti nepoznate parametre na osnovu skupa osnovnih podataka koji uglavnom budu obezbijeđeni.

Proizvođači solarnih ćelija u specijalizovanim laboratorijama vrše eksperimente na solarnim ćelijama pri standardnim test uslovima [61], najčešće pri nominalnoj temperaturi $T_n = 25^\circ\text{C}$ i iradijaciji $G_n = 1000\text{W/m}^2$. Na osnovu eksperimenata dobijaju se osnovni podaci o struji

kratkog spoja I_{ks} , naponu praznog hoda V_{ph} , struji tačke maksimalne snage I_m i naponu tačke maksimalne snage V_m . Neki proizvođači osim ovih podataka obezbeđuju i podatke o koeficijentu struje kratkog spoja k_i i koeficijentu napona praznog hoda k_v . Pored osnovnih podataka koji se upisuju tablično, eksperimentima se dobijaju i podaci o izgledu strujno naponske, I-V karakteristike solarne ćelije.

Podaci dobijeni zahvaljujući laboratorijskim ispitivanjima nijesu dovoljni za cjelokupan uvid u ponašanje i rad solarne ćelije. Solarne ćelije se u realnim uslovima sredine u kojima se nalaze ponašaju različito u odnosu na ponašanje pri standardnim test uslovima. Proizvodnja iz ovih ćelija, maksimalna snaga, izgled I-V karakteristike su različiti pri drugačijim vrijednostima temperature i insolacije. Kako bi se u svakom trenutku moglo pratiti ponašanje ćelija, pa i čitavih fotonaponskih sistema, neophodno je izvršiti estimaciju parametara. Precizno modelovanje solarnih ćelija omogućava dizajnerima fotonaponskih modula i sistema optimizaciju rada i obezbeđuje maksimalnu isplativost sistema.

Estimacija nepoznatih parametara na primjeru jednodiodnog modela solarne ćelije vrši se uz pomoć različitih analitičkih, metaheurističkih i hibridnih metoda [62]. Analitički pristup estimaciji parametara solarne ćelije bazira se na kreiranju relacija koje povezuju podatke dobijene od proizvođača i uz korišćenje osnovne relacije (3.5) vrše neophodne proračune parametara. Drugi pristup estimaciji je uz pomoć metaheurističkih metoda. Ove metode estimaciju vrše na osnovu kreiranja optimizacionih problema. Cilj je minimizovati grešku između postavljenog optimizacionog problema i stvarnih rješenja kreiranjem metaheurističkog optimizacionog algoritma. Treću kategoriju metoda predstavljaju hibridni analitički i metaheuristički pristup problemu optimizacije. Jedan dio parametara se proračunava analitičkim pristupom, dok se drugi dio proračunava metaheurističkim optimizacionim algoritmom.

Analitičke metode za estimaciju parametara [63] – [64] su najjednostavnije od sve tri grupe metoda, ali sa velikom preciznošću daju podatke o nepoznatim parametrima. Osnovna prednost analitičkih metoda u odnosu na metaheurističke i hibridne metode jeste u jednostavnosti relacija i algoritama koji se primjenjuju. Takođe, prednost analitičkih metoda može se pronaći i u brzini izvršenja algoritma, mogućnosti rješavanja uz pomoć gotovo svih platformi za matematičko modelovanje i mogućnosti konvergencije algoritma. Ove metode ne daju preciznija rješenja u odnosu na ostale dvije grupe metoda, ali zbog brze konvergencije algoritama i jednostavnih proračuna našle su primjenu u sistemima upravljanja i prognoze proizvodnje električne energije iz solarnih ćelija. U nastavku rada analitičke metode će biti detaljnije opisane.

4. ANALITIČKE METODE

Analitičke metode za estimaciju parametara služe za jednostavno i brzo određivanje vrijednosti nepoznatih parametara. Ove metode baziraju se na matematičkim relacijama koje uz određene aproksimacije i pojednostavljenja opisuju realne fizičke procese. Uvedene aproksimacije su takve da ne utiču značajno na tačnost rezultata. Na konkretnom primjeru jednodiodnog modela solarne ćelije, bazu za estimaciju parametara primjenom analitičkih metoda predstavlja osnovna strujno-naponska jednačina (3.5). Uvrštavanjem poznatih tabličnih podataka u (3.5) dobija se set dodatnih relacija uz pomoć kojih se vrši estimacija pet nepoznatih parametara.

Svaka od analitičkih metoda ima različit pristup estimaciji parametara. Neke od metoda baziraju se na pokušaju prilagođavanja (3.5) eksperimentalno određenoj krivoj [65]. Ove metode koriste iterativne postupke i srednju kvadratnu grešku (eng. Root Mean Square Error, RMSE) između proračunatih vrijednosti i stvarnih vrijednosti struja I-V krive. Druga grupa metoda se temelji na iterativnim postupcima sa različitim uslovima konvergencije, kao što je na primjer minimizacija greške između proračunate i stvarne, tablične, vrijednosti maksimalne snage.

Neke analitičke metode mogu se bazirati isključivo na izvođenju matematičkih relacija koje koriste dostupne tablične podatke [66]. Ovi podaci se uvrštavaju u osnovnu strujno-naponsku jednačinu (3.5) i uz pomoć aproksimacija daju relacije koje vrše direktnu estimaciju nepoznatih parametara.

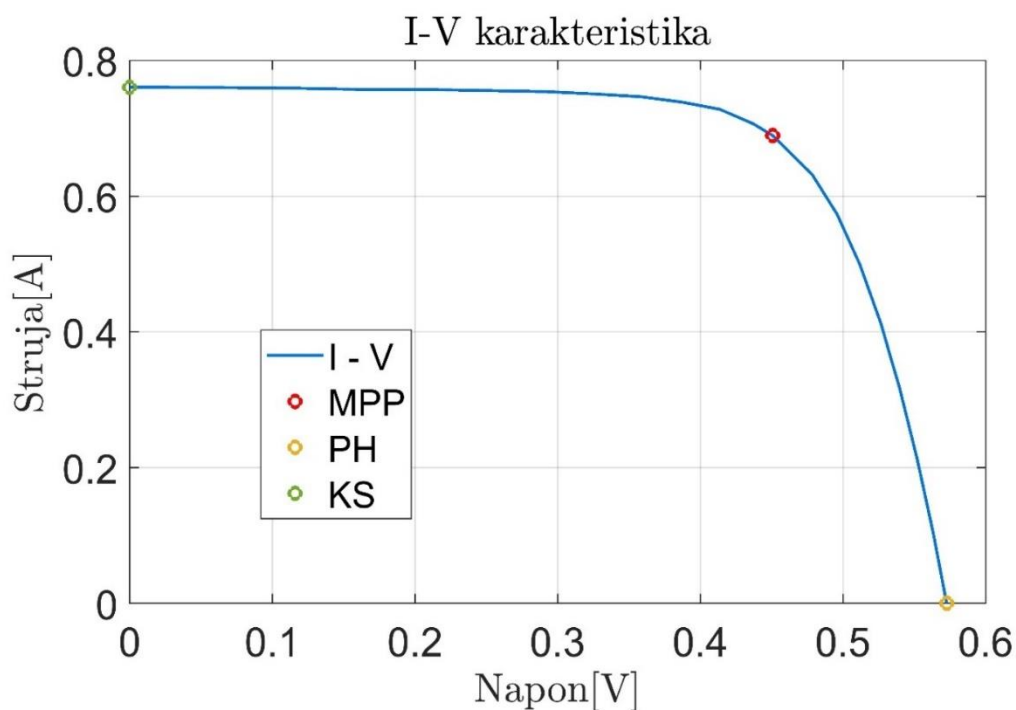
Kompleksnije analitičke metode koriste tehnike nelinearne regresije poput Newthon – Raphson [67], Gauss – Seidel [68] kako bi minimizovale razliku između dobijenih i eksperimentalno određenih podataka. Ove metode se mogu nazvati hibridnim jer se jedan dio parametara proračunava isključivo analitički, dok se drugi dio proračunava numeričkim postupkom.

Još jedan od pristupa koji se često koristi jeste iterativni postupak zasnovan na konvergenciji jednog ili dva parametra [69]. Ovim postupkom se iteracije određene jednačine vrše dok vrijednost apsolutne razlike parametara iz prethodne i tekuće iteracije ne zadovolji željeno odstupanje.

4.1 Teorijska osnova analitičkih metoda

Kao što je prethodno naglašeno, analitičke metode za rješavanje problema estimacije parametara najviše koriste dobro poznavanje fizičkih procesa koji se događaju unutar solarne ćelije, matematičke aproksimacije i ulazne podatke dobijene od proizvođača. U nastavku ovog poglavlja prikazana je teorijska osnova analitičkih metoda za estimaciju parametara na primjeru jednodiodnog modela solarne ćelije.

Na slici 4.1 prikazana je strujno naponska karakteristika solarne ćelije. Ovo je ujedno ključni parametar koji opisuje performanse i princip funkcionisanja solarnih ćelija. Kao što joj i samo ime kaže ova karakteristika opisuje vezu struje i napona. I-V karakteristika solarne ćelije omogućava bolje razumijevanje, analizu i optimizaciju. Tri ključne tačke strujno-naponske karakteristike su [70]: tačka kratkog spoja (KS) predstavljena kao tačka presjeka krive i y ose, tačka praznog hoda (PH) predstavljena kao presjek krive i x ose i tačka maksimalne snage u kojoj je proizvod struje i napona maksimalan.



Slika 4.1 Strujno-naponska karakteristika solarne ćelije

Kao što je rečeno, postoje tri karakteristične tačke strujno naponske karakteristike. Fizički gledano ove tačke predstavljaju:

1. Tačka kratkog spoja $[V, I] = (0, I_{ks})$. Ova tačka se dobija kada su elektrode direktno spojene jedna sa drugom, a opterećenje na izlazu ćelije jednako je nuli. Izlazna struja jednaka je struji kratkog spoja, a napon je jednak nuli. I_{ks} je maksimalna vrijednost struje koju solarna ćelija teorijski može da proizvede. Kada se vrijednosti izlazne struje i napona uvrste u (3.5) dobija se sljedeći izraz:

$$I_{ks} = I_{pv} - I_0 \left(e^{\frac{I_{ks} R_s}{aV_t}} - 1 \right) - \frac{I_{ks} R_s}{R_p} \quad (4.1)$$

Izvod struje po naponu u tački kratkog spoja jednak je negativnoj recipročnoj vrijednosti paralelne otpornosti:

$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_{(0, I_{ks})} = -\frac{1}{R_p} \quad (4.2)$$

2. Tačka praznog hoda $[V, I] = (V_{ph}, 0)$. Ova tačka se dobija u eksperimentu praznog hoda. Napon praznog hoda je napon na izlazu solarne ćelije kada između elektroda postoji beskonačni otpor. Kako je tok struje prekinut izlazna struja jednaka je nuli. Ova tačka daje uvid u maksimalnu vrijednost napona koju solarna ćelija može proizvesti na svom izlazu. Uvrštavanjem tačke praznog hoda u (3.5) dobija se sljedeća jednačina:

$$0 = I_{pv} - I_0 \left(e^{\frac{V_{ph}}{aV_t}} - 1 \right) - \frac{V_{ph}}{R_p} \quad (4.3)$$

Izvod struje po naponu u tački praznog hoda jednak je negativnoj recipročnoj vrijednosti serijske otpornosti:

$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_{(V_{ph}, 0)} = -\frac{1}{R_s} \quad (4.4)$$

3. Tačka maksimalne snage $[V, I] = (V_m, I_m)$ predstavlja tačku u kojoj je proizvod struje i napona maksimalan. Gledano sa fizičkog aspekta, to je tačka u kojoj je snaga na izlazu solarne ćelije maksimalna, P_m . Poznavanje tačke maksimalne snage je ključno za optimizaciju performansi, dizajn i pravilnu konfiguraciju solarnih modula [71] – [72]. Kada se tačka maksimalne snage uvrsti u (3.5) dobija se:

$$I_m = I_{pv} - I_0 \left(e^{\frac{I_m R_s + V_m}{a V_t}} - 1 \right) - \frac{I_m R_s + V_m}{R_p} \quad (4.5)$$

Izvod snage po naponu u tački maksimalne snage jednak je nuli:

$$\left. \frac{d(IV)}{dV} \right|_{(I_m, V_m)} = - \frac{\frac{1}{R_p} + \frac{I_0}{a V_t} \exp\left(\frac{V_m + I_m R_s}{a V_t}\right)}{1 + \frac{R_s}{R_p} + \frac{I_0 R_s}{a V_t} \exp\left(\frac{V_m + I_m R_s}{a V_t}\right)} V_m + I_m = 0 \quad (4.6)$$

Relacija kojom se opisuje maksimalna snaga je:

$$P_m = V_m \left[I_{pv} - I_0 \left(e^{\frac{I_m R_s + V_m}{a V_t}} - 1 \right) - \frac{I_m R_s + V_m}{R_p} \right] \quad (4.7)$$

4.2 Analitička metoda 1 – Vilalva

Ova analitička metoda opisana u [73] ima za cilj pronalaženje parametara nelinearne transcendentne jednačine (3.5) uz pomoć analitičkih relacija i iterativnog postupka. Analitičke relacije formirane su na osnovu tabličnih podataka dobijenih od proizvođača solarnih ćelija. Iterativni postupak bazira se na činjenici da postoji tačno jedan par paralelne i serijske otpornosti koji uvršten u jednačinu maksimalne snage (4.7) daje snagu približno jednaku maksimalnoj eksperimentalno određenoj snazi.

Vrijednost faktora idealnosti diode za potrebe ove analitičke metode se bira proizvoljno. Većina autora koji raspravljaju o načinima tačne procjene vrijednosti faktora idealnosti diode [74]-[75] utvrdili su da se on kreće u opsegu $1 \leq a \leq 1.5$. Izbor vrijednosti a zavisi od ostalih faktora koji utiču na izgled strujno-naponske karakteristike. Kao što je opisano u [74] postoje različiti načini za izbor faktora idealnosti diode, a jedan je empirijsko određivanje ovog parametra. Prema [73], kada se odrede ostali parametri, moguće je mijenjati vrijednost a kako bi se proračunata strujno naponska karakteristika bolje poklopila sa eksperimentalno dobijenom.

Za određivanje serijske otpornosti R_s , paralelne otpornosti R_p , struje I_0 i struje I_{pv} koristi se sljedeći iterativni postupak:

1. Inicijalizacija:

Prevashodno je potrebno postaviti inicijalne vrijednosti serijske i paralelne otpornosti. Inicijalna vrijednost serijske otpornosti postavi se na nulu, a vrijednost paralelne otpornosti izrazi se jednačinom (4.8). Ova jednačina u suštini predstavlja nagib linearnog segmenta

strujno naponske karakteristike solarne ćelije između tačke kratkog spoja i tačke maksimalne snage, a ujedno i minimalnu vrijednost paralelne otpornosti:

$$R_{p,min} = \frac{V_m}{I_{ks} - I_m} - \frac{V_{ph} - V_m}{I_m} \quad (4.8)$$

Za proračun početne vrijednosti struje koristi se aproksimacija da je $I_{ks}R_s \ll aV_t$, pa je $(I_{ks}R_s)/(aV_t) \approx 0$. Uvrštavanjem prethodno navedenih aproksimacija u (4.1) dobija se da je inicijalna vrijednost fotostruje:

$$I_{pv} = I_{ks} \frac{R_s + R_p}{R_p} \quad (4.9)$$

2. Iterativni postupak započinje pronalaženjem struje I_{pv} na osnovu (4.9). Nakon toga se iz jednačine maksimalne snage proračuna vrijednost paralelne otpornosti:

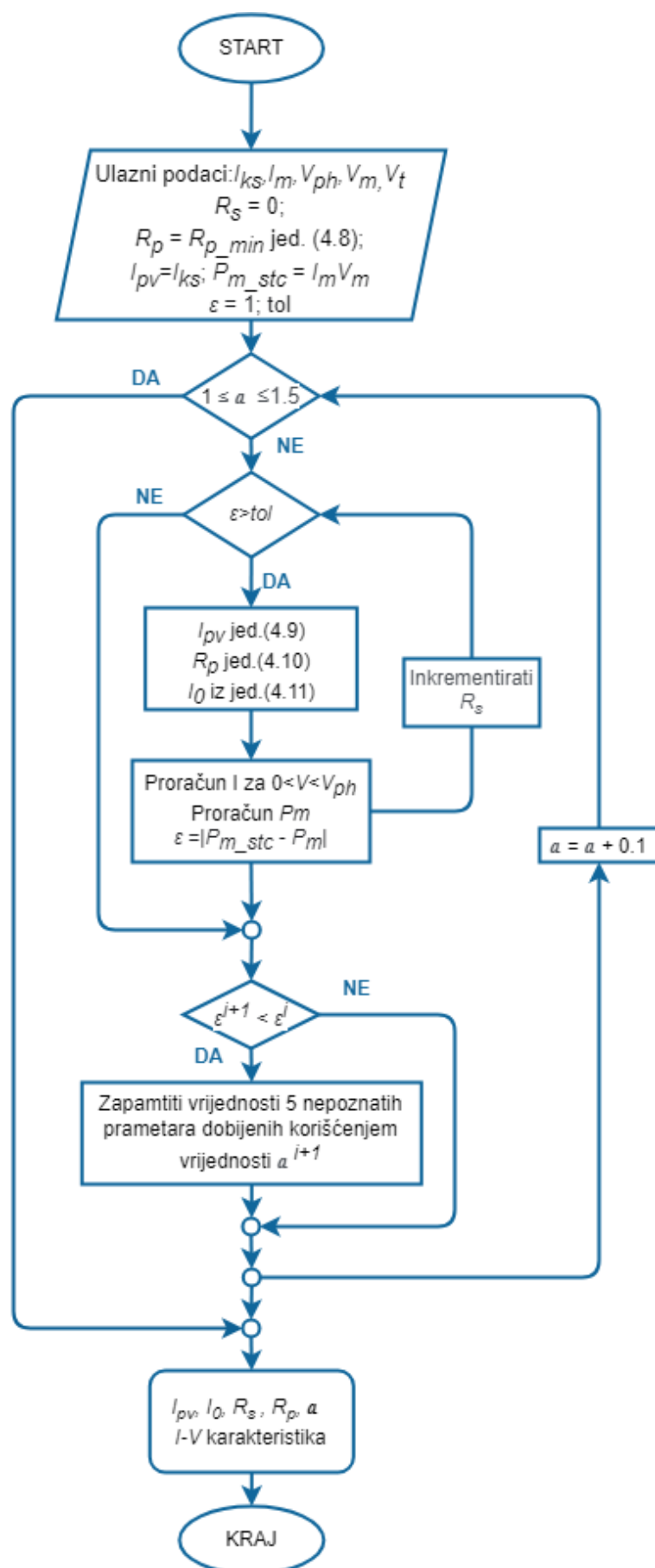
$$R_p = \frac{V_m(V_m + I_m R_s)}{V_m I_{pv} - I_0 V_m \left(e^{\frac{V_m + R_s I_m}{a V_t}} - 1 \right) - P_m} \quad (4.10)$$

3. Na osnovu vrijednosti R_p , I_{pv} i a iz jednačine praznog hoda (4.3) dobija se vrijednost I_0 izražena sljedećom relacijom:

$$I_0 = \frac{I_{pv} - \frac{V_{ph}}{R_p}}{e^{\frac{V_{ph}}{a V_t}} - 1} \quad (4.11)$$

4. Jednačinom (3.5) sa uvrštenim vrijednostima nepoznatih parametara vrši se proračun struja za napone u opsegu $0 \leq V \leq V_{ph}$. Za parove napon struja (V, I) pronalazi se tačka maksimalne snage.
5. Koraci 3 i 4 se ponavljaju sve dok apsolutna razlika maksimalne proračunate snage i maksimalne eksperimentalno određene snage ne bude manja od željene tolerancije greške. U svakoj novoj iteraciji vrijednost serijske otpornosti se inkrementira sa unaprijed određenim korakom.

Ova analitička metoda pogodna je za potrebe praćenja tačke maksimalne snage i na tom principu je izveden uslov konvergencije. Očekuje se da će se primjenom ove metode dobiti tačka maksimalne snage koja vrlo malo odstupa od eksperimentalno dobijene tačke maksimalne snage na strujno-naponskoj karakteristici. Na slici 4.2 prikazan je blok dijagram realizacije ove analitičke metode.



Slika 4.2 Blok dijagram Metode 1

4.3 Analitička metoda 2 – Celik

Analitička metoda 2 opisana u [76] bazirana je na kreiranju analitičkih relacija na osnovu tabličnih podataka dobijenih od proizvođača solarnih ćelija i podataka o izgledu I-V karakteristike dobijenih u eksperimentima pri standardnim test uslovima. Ovo je metoda kojom se direktno, bez upotrebe iterativnog postupka, predviđaju vrijednosti nepoznatih parametara.

Kao što je prethodno rečeno, vrijednost paralelne otpornosti može se predstaviti kao negativna recipročna vrijednost nagiba strujno naponske karakteristike u tački kratkog spoja, a vrijednost serijske otpornosti kao negativna recipročna vrijednost nagiba u tački praznog hoda. Podaci o početnim vrijednostima serijske otpornosti R_{s0} i paralelne otpornosti R_{p0} u većini slučajeva nijesu obezbijeđeni od strane proizvođača.

Struja inverzne polarizacije diode se proračunava iz jednačine praznog hoda (4.3), pri čemu se uvažava aproksimacija da je struja I_{pv} jednaka struji kratkog spoja. Uvrštavanjem prethodno dobijene pretpostavke u jednačinu praznog hoda (4.3) vrijednost I_0 dobija se kao:

$$I_0 = \frac{I_{ks} - \frac{V_{ph}}{R_p}}{e^{\frac{V_{ph}}{aV_t}}} \quad (4.12)$$

Faktor idealnosti diode dobija se iz (4.13). Naime uvažavajući aproksimaciju da je $I_{pv} = I_{ks}$ i uvrštavajući (4.12) u (4.5) dobija se relacija za direktno proračunavanje faktora idealnosti diode:

$$a = \frac{V_m + I_m R_{s0} - V_{ph}}{V_t \left[\ln \left(I_{ks} - \frac{V_m}{R_{p0}} - I_m \right) - \ln \left(I_{ks} - \frac{V_{ph}}{R_{p0}} \right) + \left(\frac{I_m}{I_{ks} - \frac{V_{ph}}{R_{p0}}} \right) \right]} \quad (4.13)$$

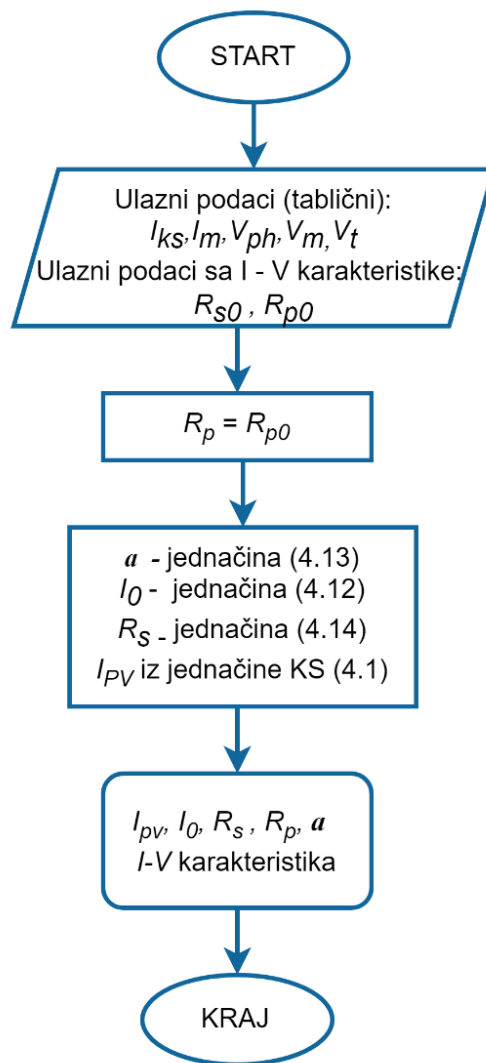
Za potrebe estimacije parametara ovom analitičkom metodom stvarna vrijednost serijske i paralelne otpornosti dobijaju se na osnovu (4.14) i (4.15) respektivno:

$$R_s = R_{s0} - \frac{aV_t}{I_0} e^{-\frac{V_{ph}}{aV_t}} \quad (4.14)$$

$$R_p = R_{p0} \quad (4.15)$$

Vrijednost fotostruje dobija se iz jednačine kratkog spoja (4.1).

Kao što se može uočiti iz priloženog Metod 2 koristi direktno formirane analitičke relacije koje nastaju korišćenjem tabličnih podataka i podataka vezanih za strujno-naponsku karakteristiku. Na slici 4.3 prikazan je blok dijagram realizacije ove analitičke metode.



Slika 4.3 Blok dijagram Metode 2

4.4 Analitička metoda 3 - De Blas

Analitička metoda 3, opisana u [77] koristi gotovo identične relacije kao prethodno opisana analitička metoda. Ova metoda je nastala kombinacijom direktne upotrebe analitičkih relacija i iterativnog postupka. Dakle, (3.5) se rješava kombinacijom seta jednačina opisanih u poglavlju 4.3 i iterativnog postupka baziranog na konvergenciji serijske otpornosti. Ova metoda treba da obezbijedi dobro poklapanje između eksperimentalno određene strujno-naponske karakteristike i proračunate karakteristike.

Osnova ove metode jeste određivanje pravilne recipročne vrijednosti nagiba eksperimentalno dobijene krive u tački kratkog spoja i tački praznog hoda, tj. određivanje

vrijednosti R_{p0} i R_{s0} respektivno. Na osnovu istraživanja sprovedenih na različitim solarnim ćelijama u [77] se predlaže se da se R_{s0} kreće u opsegu od 0.3 do 0.33 Ω , a R_{p0} u opsegu od 50 Ω do 170 Ω za silicijumske solarne ćelije. Međutim, ove vrijednosti se mogu proračunati na osnovu eksperimentalno dobijenog strujno-naponskog grafika.

U naučnoj literaturi [78] izvedeni su poznati izrazi za analitičko određivanje parametara na osnovu eksperimenata kratkog spoja i praznog hoda na jednodiodnom modelu solarne ćelije. Međutim, za estimaciju parametara potrebno je pronaći recipročnu vrijednost nagiba eksperimentalne strujno-naponske karakteristike. Na osnovu (4.2) i (4.4) jasno je da se ove vrijednosti mogu dobiti diferenciranjem struje po naponu. Kako u (3.5) postoji pet nepoznatih parametara, proračunavanje izvoda uz pomoć diferencijalnih jednačina bilo bi kompleksno i zahtijevalo bi korišćenje kompleksnih iterativnih postupaka.

Za precizno određivanje nagiba I-V karakteristike u tačkama $(0, I_{ks})$ i $(V_{ph}, 0)$ potrebno je vršenje niza eksperimenata pri standardnim test uslovima kako bi se dobilo dovoljno parova napon-struja u blizini tačke kratkog spoja i praznog hoda.

Početna vrijednost serijske otpornosti prije iterativnog postupka postavi se na nulu. Iterativni postupak otpočinje proračunom paralelne otpornosti. Na osnovu određene vrijednosti R_{p0} proračuna se inicijalna vrijednost paralelne otpornosti kao:

$$R_p = R_{p,0} - R_s \quad (4.16)$$

Zatim se uz pomoć (4.13) proračuna faktor idealnosti diode. Vrijednost serijske otpornosti se može izraziti relacijom:

$$R_s = \frac{R_{s0} \left(\frac{V_{ph}}{aV_t} - 1 \right) + R_{p0} \left(1 - \frac{I_{ks} R_{s0}}{aV_t} \right)}{\frac{V_{ph} - I_{ks} R_{s0}}{V_t a}} \quad (4.17)$$

Apsolutna razlika između proračunate otpornosti u tekućoj i prethodnoj iteraciji je manja od zadate tolerancije. Ovo je uslov konvergencije iterativnog postupka. Ukoliko uslov nije ispunjen, iterativni postupak se nastavlja sve dok vrijednost serijske otpornosti ne konvergira.

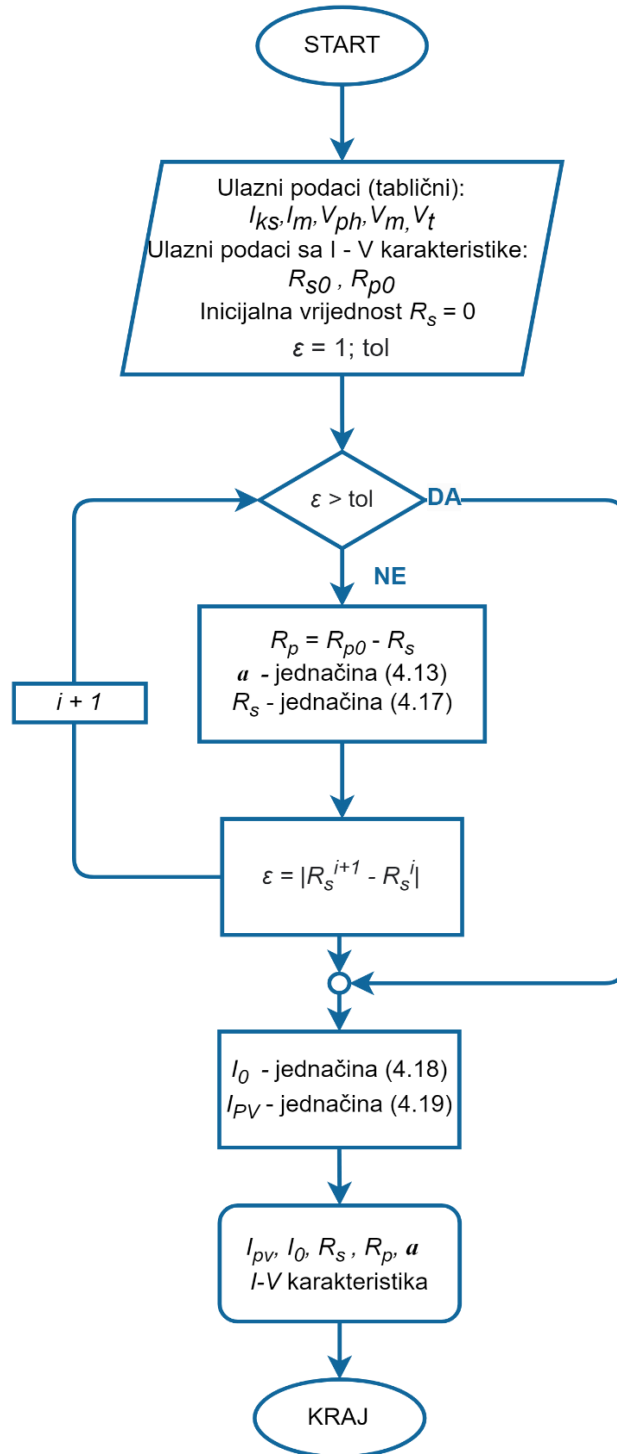
Kao što se vidi, iterativnim postupkom se teži preciznijem proračunu tri nepoznata parametra: R_s , R_p i a . Nakon proračuna ova tri parametra potrebno je odrediti fotostruju i inverznu struju zasićenja diode. Vrijednost I_0 se dobija na osnovu jednačine praznog hoda uz uvažavanje (4.9). Jednačina (4.18) služi za proračun I_0 .

$$I_0 = \frac{I_{ks} \left(1 + \frac{R_s}{R_p} \right) - \frac{V_{ph}}{R_p}}{\frac{V_{ph}}{e a V_t}} \quad (4.18)$$

Nakon proračuna četiri nepoznata parametra, preciznija vrijednost struje I_{pv} najlakše se može izraziti iz jednačine praznog hoda kao:

$$I_{pv} = I_0 \left(e^{\frac{V_{ph}}{aV_t}} - 1 \right) + \frac{V_{ph}}{R_p} \quad (4.19)$$

Na slici 4.4 je prikazan algoritam za implementaciju ove analitičke metode.



Slika 4.4 Blok dijagram Metode 3

4.5 Analitička metoda 4 – Orioli

Analitička Metoda 4 opisana u [79] bazira se na određivanju nepoznatih parametara rješavanjem jednačina dobijenih na osnovu podataka od proizvođača i korišćenjem iterativnog postupka sa uslovima konvergencije vezanim za faktor idealnosti diode i serijsku otpornost. Ova metoda karakteristična je po korišćenju ugniježdene petlje u algoritmu za rješavanje problema estimacije parametara.

Procedura za određivanje nepoznatih parametara ovom analitičkom metodom prevashodno zahtijeva određivanje vrijednosti nagiba strujno-naponske karakteristike u tački kratkog spoja i tački praznog hoda, R_{p0} i R_{s0} . Kao što je pomenuto u prethodnim poglavljima, proizvođač ne obezbjeđuje ove podatke, zato ih je potrebno proračunati iz eksperimentalno određenog grafika.

Kako bi se započeo proces rješavanja potrebno je postaviti početne uslove, a to su:

$$I_{pv,n} = I_{ks}, \quad R_p = R_{p0}, \quad R_s = 0, \quad a = 1 \quad (4.20)$$

Iterativni postupak koji se primjenjuje za rješavanje ove metode bazira se na ugniježdenoj petlji. U nastavku je opisan postupak kojim se vrši estimacija parametara:

1. Postave se inicijalni uslovi (4.20);
2. Jednačinom (4.11) proračuna se vrijednost inverzne struje zasićenja diode za standardne test uslove. Vrijednost struje I_{pv} proračuna se iz jednačine kratkog spoja (4.1).
3. Paralelna otpornost se dobija iz (4.21), tj. uslova da je izvod struje po naponu u tački kratkog spoja jednak negativnoj, recipročnoj vrijednosti paralelne otpornosti:

$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_{(0,I_{ks})} = - \frac{\frac{I_{0,n}}{aV_t} e^{\frac{I_{ks}R_s}{aV_t} + \frac{1}{R_p}}}{1 + R_s \left(\frac{I_{0,n}}{aV_t} e^{\frac{I_{ks}R_s}{aV_t} + \frac{1}{R_p}} \right)} = - \frac{1}{R_{p0}} \quad (4.21)$$

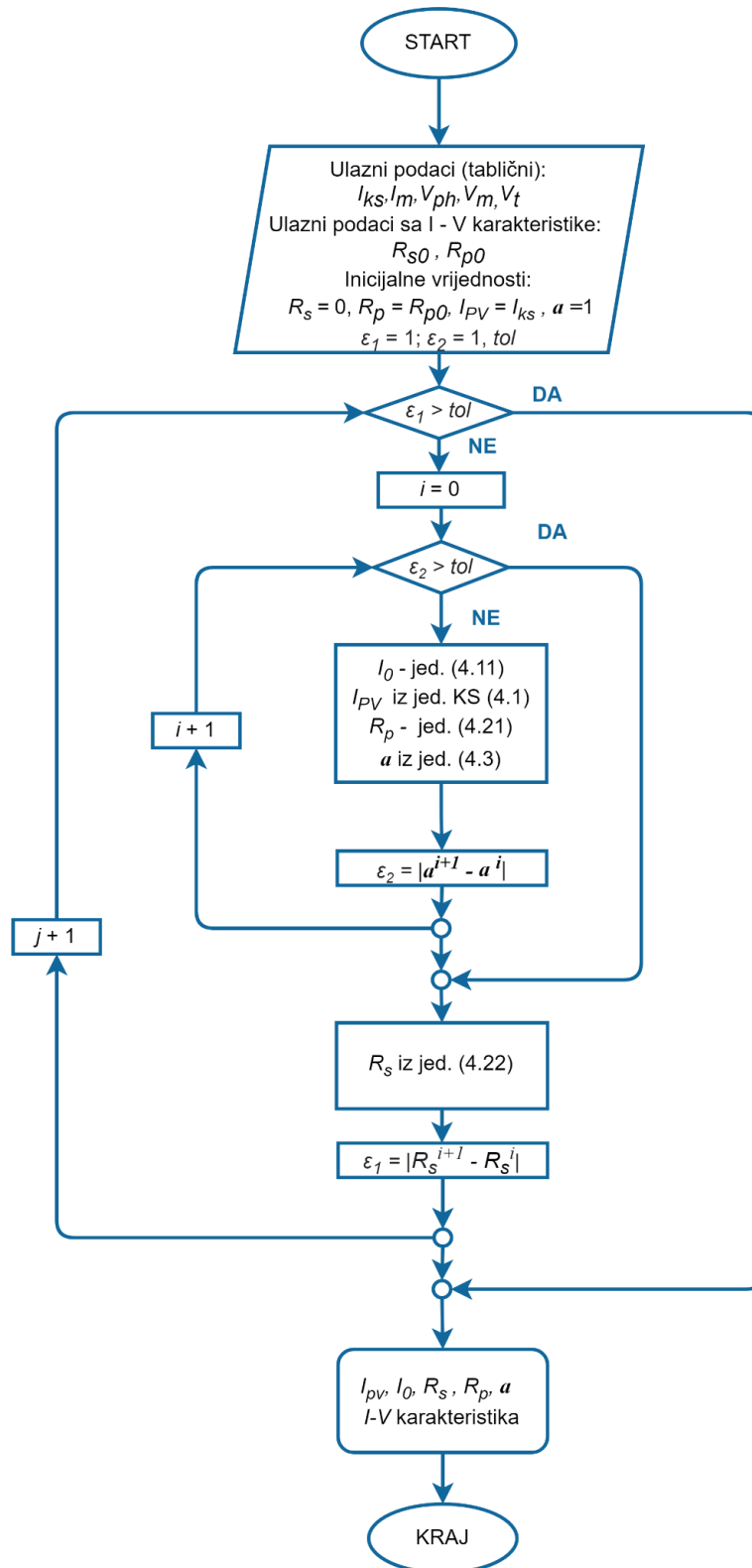
Nakon određivanja vrijednosti I_0 , I_{pv} i R_p iz jednačine praznog hoda (4.3) se proračunava vrijednost faktora idealnosti diode.

4. Uslov konvergencije ovog dijela iterativnog postupka jeste da je apsolutna razlika između proračunate vrijednosti faktora idealnosti diode u tekućoj i prethodnoj iteraciji približno jednaka nuli. Koraci 2 i 3 se ponavljaju sve dok se ovaj uslov ne ispuni.
5. Sljedeći korak postupka estimacije je proračun serijske otpornosti. Serijska otpornost se dobija iz (4.22), tj. uslova da je izvod struje po naponu u tački praznog hoda jednak negativnoj, recipročnoj vrijednosti serijske otpornosti.

$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_{(V_{ph},0)} = - \frac{\frac{I_{0,n}}{aV_t} e^{\frac{V_{ph}}{aV_t} + \frac{1}{R_p}}}{1 + R_s \left(\frac{I_{0,n}}{aV_t} e^{\frac{V_{ph}}{aV_t} + \frac{1}{R_p}} \right)} = - \frac{1}{R_{s0}} \quad (4.22)$$

6. Koraci 2 – 5 se ponavljaju sve dok se ne zadovolji uslov konvergencije koji kaže da apsolutna razlika vrijednosti serijske otpornosti u tekućoj i prethodnoj iteraciji bude približno jednaka nuli.

Opisani iterativni postupak prikazan je na slici 4.5, a koji se lako može implementirati uz pomoć softverskih alata, pronalazi rješenje sa zadovoljavajućom tačnošću polazeći od pretpostavljenih početnih vrijednosti nepoznatih parametara, a koristeći poznavanje tri ključne tačke strujno-naponske karakteristike.



Slika 4.5 Blok dijagram Metode 4

4.6 Analitička metoda 5 – Chatterjee

Metoda 5 koja je prikazana u [80] predstavlja kombinaciju analitičkog i numeričkog postupka. Na osnovu tabličnih podataka dobijenih od proizvođača, formiraju se pet matematičkih relacija uz pomoć kojih se vrši estimacija parametara solarnih ćelija. Kako su dvije relacije nelinearne i transcendentne, jedan dio metoda koristi Gaus – Seidel numerički postupak. Prilikom primjene Metode 5 nije potrebno poznavanje izgleda strujno-naponske karakteristike i vršenje opsežnih mjerenja.

Kako bi se proces određivanja nepoznatih parametara pojednostavio jednačina (3.5) se zapisuje u obliku:

$$I = I_{pv} - I_0 e^{\frac{IR_s + V}{aV_t}} - \frac{IR_s + V}{R_p} \quad (4.23)$$

Uvrštavanjem tačke maksimalne snage (V_m, I_m), tačke kratkog spoja ($0, I_{ks}$) i praznog hoda ($V_{ph}, 0$) dobijaju se (4.24), (4.25) i (4.26):

$$I_m = I_{pv} - I_0 e^{\frac{I_m R_s + V_m}{aV_t}} - \frac{I_m R_s + V_m}{R_p} \quad (4.24)$$

$$I_{ks} = I_{pv} - I_0 e^{\frac{I_{ks} R_s}{aV_t}} - \frac{I_{ks} R_s}{R_p} \quad (4.25)$$

$$0 = I_{pv} - I_0 e^{\frac{V_{ph}}{aV_t}} - \frac{V_{ph}}{R_p} \quad (4.26)$$

Kako postoji pet nepoznatih parametara, osim tri kreirane relacije, potrebno je kreirati još dvije. Jedna relacija može se dobiti iz činjenice da je izvod snage po naponu u tački maksimalne snage jednak nuli (4.6), a druga se dobija iz činjenice da je izvod struje po naponu u tački kratkog spoja jednak negativnoj recipročnoj vrijednosti paralelne otpornosti (4.2).

Iz (4.25) inverzna struja zasićenja diode dobija se kao:

$$I_0 = \left(I_{ks} - \frac{V_{ph} - I_{ks} R_s}{R_p} \right) e^{\frac{-V_{ph}}{aV_t}} \quad (4.27)$$

Relacija za proračun struje I_{pv} dobija se iz (4.26) kao:

$$I_{pv} = I_0 e^{\frac{V_{ph}}{aV_t}} + \frac{V_{ph}}{R_p} \quad (4.28)$$

Uvrštavanjem (4.27) i (4.28) u (4.24) dobija se:

$$I_m = I_{ks} - \frac{V_m + I_m R_s - I_{ks} R_s}{R_p} - \left(I_{ks} - \frac{V_{ph} - I_{ks} R_s}{R_p} \right) e^{\frac{V_m + I_m R_s - V_{ph}}{aV_t}} \quad (4.29)$$

Sređivanjem izraza $dP/dV = 0$ za tačku maksimalne snage i uvrštavanjem (4.27) i (4.28) dobija se:

$$I_m = \frac{V_m B e^D + \frac{V_m}{R_p}}{1 + R_s B e^D + \frac{R_s}{R_p}} \quad (4.30)$$

gdje je: $B = (I_{ks}R_p - V_{ph} - I_{ks}R_s) / (aR_pV_t)$ i $D = (V_m + R_sI_m - V_m) / (aV_t)$.

Posljednja jednačina za određivanje nepoznatih parametara dobija se kada se u (4.25) uvrste (4.27) i (4.28). Sređivanjem izraza dobija se:

$$\frac{1}{R_p} = \frac{B e^E + \frac{1}{R_p}}{1 + R_s B e^E + \frac{R_s}{R_p}} \quad (4.31)$$

gdje je $E = (I_{ks}R_s - U_{ph}) / (aV_t)$.

Pet jednačina (4.27) – (4.31) služe za određivanje pet nepoznatih parametara. Jednačine (4.29) – (4.31) su po prirodi transcendentne jednačine što zahtijeva numerički postupak rješavanja. Kao što se vidi ove tri jednačine su u potpunosti nezavisne od I_0 i I_{pv} što numerički metod svodi na određivanje tri nepoznata parametar iz tri jednačine. Za rješavanje sistema jednačina koristi se Gaus – Seidel metoda. Ova iterativna metoda omogućava rješavanje nelinearnih transcendentnih jednačina izraženih u obliku:

$$x^{k+1} = f(x^k) \quad (4.32)$$

gdje je x nepoznata promjenljiva koju je potrebno odrediti, a k je oznaka iteracije. Nova vrijednost promjenljive u $k+1$ iteraciji dobija se korišćenjem stare vrijednosti x^k na desnoj strani. Proces se ponavlja sve dok se apsolutna razlika starih i novih vrijednosti ne dovede ispod prihvatljive granice. Prema [80] za konvergenciju ovih metoda dovoljno je ponoviti nekoliko iteracija.

Kako bi se Gaus – Seidel metoda mogla primijeniti za estimaciju parametara na primjeru solarne ćelije ili modula potrebno je izraziti a , R_p i R_s iz jednačina (4.29) – (4.31) na sljedeći način:

$$a = \frac{V_m + I_m R_s - V_{ph}}{V_t \ln \left[\frac{(I_{ks} - I_m)(R_p + R_s) - V_m}{I_{ks}(R_s + R_p) - V_{ph}} \right]} \quad (4.33)$$

Serijska otpornost u zavisnosti od a , R_p i vrijednosti R_s iz prethodne iteracije može se predstaviti kao:

$$R_s = \frac{aV_t M + V_{ph} - V_m}{I_m} \quad (4.34)$$

gdje je: $M = \ln \left(\frac{aV_t(I_m R_p + I_m R_s - V_m)}{V_m I_{ks} R_s + V_m I_{ks} R_p + V_{ph} I_m R_p - I_m I_{ks} R_s^2 - I_m I_{ks} R_s R_p - V_m V_{ph}} \right)$

Paralelna otpornost u zavisnosti od a , R_s i vrijednosti R_p iz prethodne iteracije može se predstaviti kao:

$$R_p = \frac{aV_t R_p + R_s N + R_s aV_t}{aV_t + N} \quad (4.35)$$

gdje je: $N = (I_{ks}R_p + I_{ks}R_s - V_{ph})e^{\frac{I_{ks}R_s - V_{ph}}{aV_t}}$.

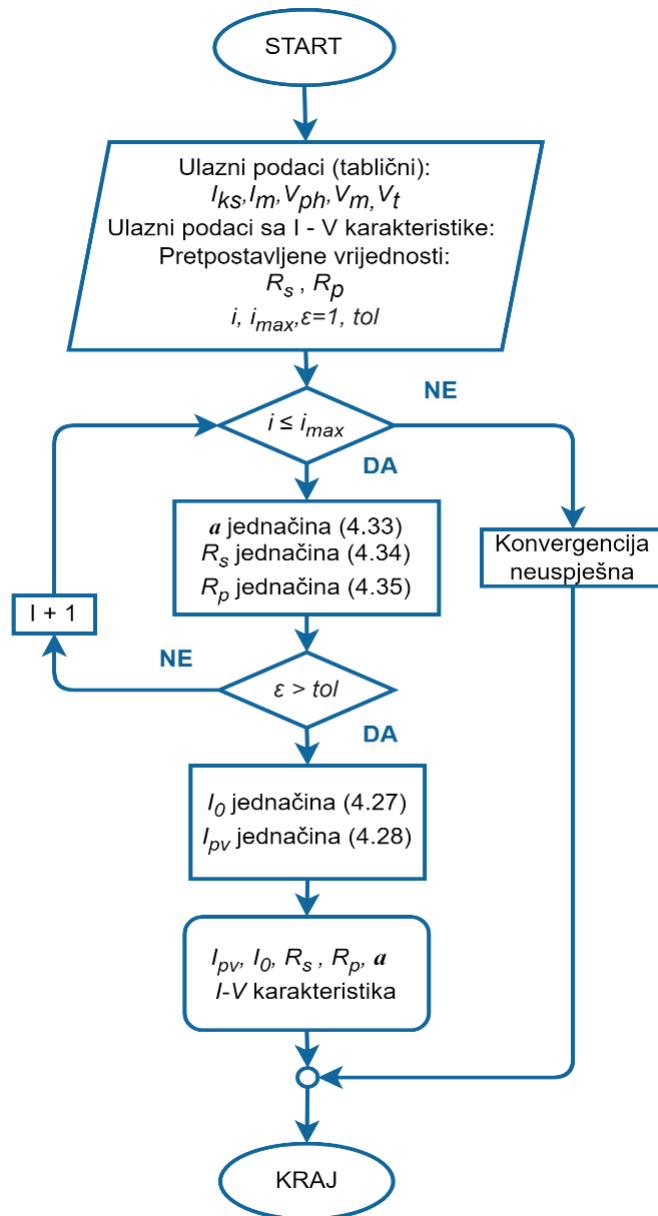
Primjećuje se da je jednačina (4.33) kojom se predstavlja faktor idealnosti diode eksplicitna, dok su jednačine (4.34) i (4.35) za izražavanje serijske i paralelne otpornosti implicitne.

Iterativni postupak za određivanje ova tri nepoznata parametra može se opisati sljedećim koracima:

1. Inicijalizuju se vrijednosti R_p i R_s .
2. Proračunava se inicijalna vrijednost faktora idealnosti diode koristeći eksplicitnu jednačinu (4.33).
3. Proračunavaju se vrijednosti R_s , R_p i a na osnovu (4.34), (4.35) i (4.33) kroz nekoliko iteracija korišćenjem opisanog Gaus – Seidelovog metoda. Nakon nekoliko iteracija postupak konvergira. Nove vrijednosti tri nepoznata parametra gotovo se ne razlikuju u odnosu na vrijednosti proračunate u prethodnoj iteraciji.

Postupak kojim se na osnovu Gaus – Seidelove metode određuju vrijednosti a , R_p i R_s predstavljen je na slici 4.6. Nakon određivanja tri nepoznate promjenljive moguće je odrediti vrijednosti I_0 i I_{pv} na osnovu jednačina (4.27) i (4.28) respektivno.

U većini slučajeva postupak može konvergirati nakon svega nekoliko iteracija. Međutim, postoje slučajevi u kojima Gaus - Seidel metoda neće konvergirati ili će konvergirati ka pogrešnim vrijednostima. To su slučajevi u kojima se inicijalne vrijednosti serijske i paralelne otpornosti nasumično biraju i budu mnogo veće od realnih vrijednosti. Ovo predstavlja i jedan od nedostataka numeričkih postupaka.



Slika 4.6 Blok dijagram Metode 5

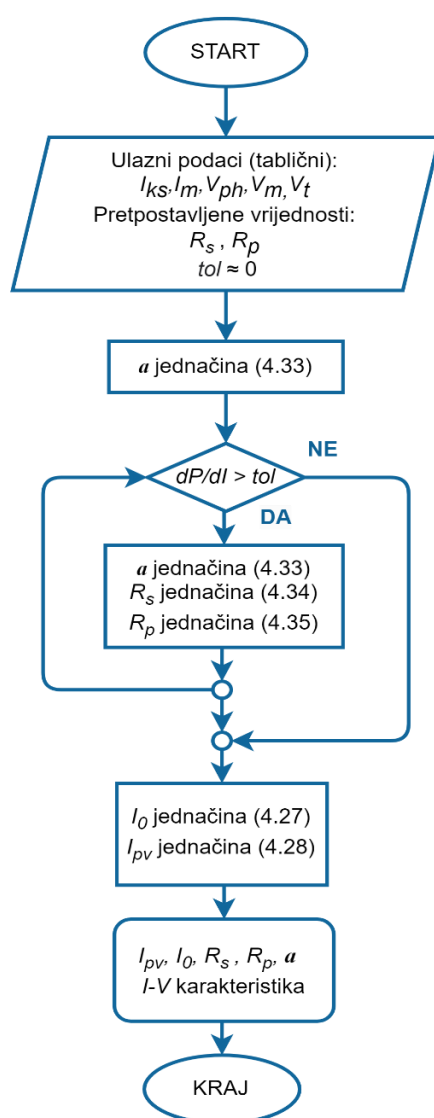
4.7 Metoda 6 – Chatterjee i Sera

Ova metoda nastala je kombinacijom metoda obrađenih u [80] i [81] i bazira se isključivo na upotrebi tabličnih podataka. Metoda se sprovodi korišćenjem analitičkih relacija i iterativnog postupka. Analitičke relacije se koriste za određivanje vrijednosti inverzne struje zasićenja diode I_0 , kao i fotostruje I_{pv} koristeći relacije (4.27) i (4.28).

Kao i u prethodno opisanoj metodi, pored navedenih relacija, kreiraju se još tri relacije (4.33) – (4.35). Ove relacije se koriste za proračun vrijednosti preostalih nepoznatih parametara. Pomenute relacije su transcendentne i nelinearne pri čemu je (4.33) eksplicitna, a (4.34) i (4.35) su implicitne. Zbog toga je za njihovo rješavanje potrebna primjena numeričkog iterativnog postupka. Iterativni postupak za određivanje parametara R_s , R_p i a predstavljen je u nastavku:

1. Pretpostave se inicijalne vrijednosti R_p i R_s , pri čemu se uzima u obzir da je R_s veoma malo, a da je $R_p \gg R_s$.
2. Iterativni postupak započinje pronalaženjem vrijednosti faktora idealnosti diode na osnovu relacije (4.33) za pretpostavljene vrijednosti R_s i R_p .
3. Za ovako dobijene vrijednosti parametra a provjerava se da li je $dP/dI \approx 0$. Ukoliko uslov nije zadovoljen na osnovu (4.34) i (4.35) vrši se proračun paralelne otpornosti i serijske otpornosti respektivno. Koraci 2 i 3 se ponavljaju sve dok uslov konvergencije ne bude zadovoljen. Nakon pronalaženja vrijednosti R_s , R_p i a , na osnovu (4.27) i (4.28) pronalaze se vrijednosti I_0 i I_{pv} čime se završava estimacija parametara.

Na slici 4.7 je dat prikaz načina implementacije algoritma za proračun vrijednosti nepoznatih parametara korišćenjem predložene metode.



Slika 4.7 Blok dijagram Metode 6

4.8 Metoda 7 – Lineykin

Metoda 7 opisana u [82] je bazirana na nekoliko ključnih koraka pomoću kojih se vrši estimacija parametara jednodiodnog modela solarne ćelije. Prvi korak uključuje dobijanje osnovne strujno-naponske jednačine ekvivalentnog jednodiodnog modela solarne ćelije uz pomoć Lambert W funkcije. U drugom koraku vrši se unošenje tabličnih podataka dobijenih pri standardnim test uslovima u izraz izveden u prvom koraku. Skup ovako dobijenih jednačina nije dovoljan za dobijanje pet nepoznatih parametara. Treći korak je određivanje petog nepoznatog parametra pomoću odgovarajućih eksperimentalno dobijenih karakteristika. Za parametar koji se dobija na ovaj način odabran je faktor idealnosti diode.

Lambert W funkcija se koristi za rješavanje matematičkih problema, i omogućava pojednostavljenje fizičkih jednačina. Implementirana je u mnogobrojnim matematičkim platformama i služi za jednostavnije rješavanje transcendentnih nelinearnih jednačina. Ova funkcija, označena kao $W(\beta)$ zadovoljava sljedeći odnos:

$$\theta e^{\theta} = \beta \quad (4.36)$$

gdje je $\theta = W(\beta)$.

Prilagođavanjem (3.5) upotrebi Lambert W funkcije dobija se sljedeća relacija:

$$I = \frac{R_p}{R_s + R_p} \left(I_{pv} + I_0 - \frac{V}{R_p} \right) - \frac{aV_t}{R_s} W(\beta) \quad (4.37)$$

$$\text{gdje je } \beta = \frac{I_0}{aV_t} e^{\frac{R_p(R_s(I_{pv}+I_0)+V))}{aV_t(R_s+R_p)}} \frac{R_p R_s}{R_s + R_p}$$

Jednačina (3.5) se takođe može izraziti kao $V(I)$ uz pomoć Lambert W funkcije kao:

$$V = (I_0 + I_{pv})R_p + I(R_s + R_p) - aV_t W(\gamma) \quad (4.38)$$

$$\text{gdje je } \gamma = \frac{I_0}{aV_t} R_p e^{\frac{(I_0+I_{pv}-I)R_p}{aV_t}}$$

Uvrštavanjem tačke praznog hoda $I = 0$ i $V = V_{ph}$ u (4.37) dobija se:

$$V_{ph} = (I_0 + I_{pv})R_p - aV_t W\left(\frac{I_0}{aV_t} R_p e^{\frac{(I_0+I_{pv})R_p}{aV_t}}\right) \quad (4.39)$$

Uvrštavajući tačku kratkog spoja $I = I_{ks}$ i $V = 0$ u (51) dobija se

$$I_{ks} = \frac{R_p}{R_s + R_p} (I_{pv} + I_0) - \frac{aV_t}{R_s} W\left(\frac{I_0}{aV_t} e^{\frac{R_p R_s (I_{pv}+I_0)}{aV_t(R_s+R_p)}} \frac{R_p R_s}{R_s + R_p}\right) \quad (4.40)$$

I na kraju, kada se tačka maksimalne snage uvrsti u (4.38), dobija se:

$$V_m = (I_0 + I_{pv})R_p + I_m(R_s + R_p) - aV_t W\left(\frac{I_0}{aV_t} R_p e^{\frac{(I_0+I_{pv}-I_m)R_p}{aV_t}}\right) \quad (4.41)$$

Kao što je prethodno navedeno izvod snage po struji u tački maksimalne snage jednak je 0, kombinovanjem ovog uslova i (4.38) dobija se:

$$(I_0 + I_{pv})R_p - 2I_m(R_s + R_p) + W \left(\frac{I_0 R_p}{aV_t} e^{\frac{(I_0 - I_m + I_{ph})R_p}{aV_t}} \right) \left[\frac{\frac{I_m R_p}{(I_0 - I_m + I_{ph})R_p}}{1 + W \left(\frac{I_0 R_p}{aV_t} e^{\frac{(I_0 - I_m + I_{ph})R_p}{aV_t}} \right)} - aV_t \right] = 0 \quad (4.42)$$

Sumarno, formiran je sistem od četiri jednačine za STC. Primjećuje se da predložene jednačine (4.39) – (4.42) još uvijek nijesu dovoljne za kompletno rješenje problema estimacije parametara, zbog toga što postoji 5 nepoznatih parametara, a svega četiri jednačine.

Metoda 7 predlaže novi način za rješavanje problema estimacije parametara. Kao što je rečeno, potrebno je tretirati jedan od parametara kao nezavisan. Ovaj parametar se može odrediti ispunjavanjem dodatnog uslova koji podrazumijeva minimizaciju devijacije dobijene i izmjerene strujno – naponske karakteristike. Svaki od pet nepoznatih parametara može biti izabran kao nezavisan. Međutim, najpogodnije je birati faktor idealnosti diode, obzirom na to da su poznate granice njegovih vrijednosti $1 \leq a \leq 2$ za bilo koju vrstu solarne ćelije ili modula.

Struja I_0 može se predstaviti uz pomoć (4.11). Uvrštavanjem I_0 u jednačinu kratkog spoja (4.1) i sređivanjem izraza, dobija se da je I_{pv} :

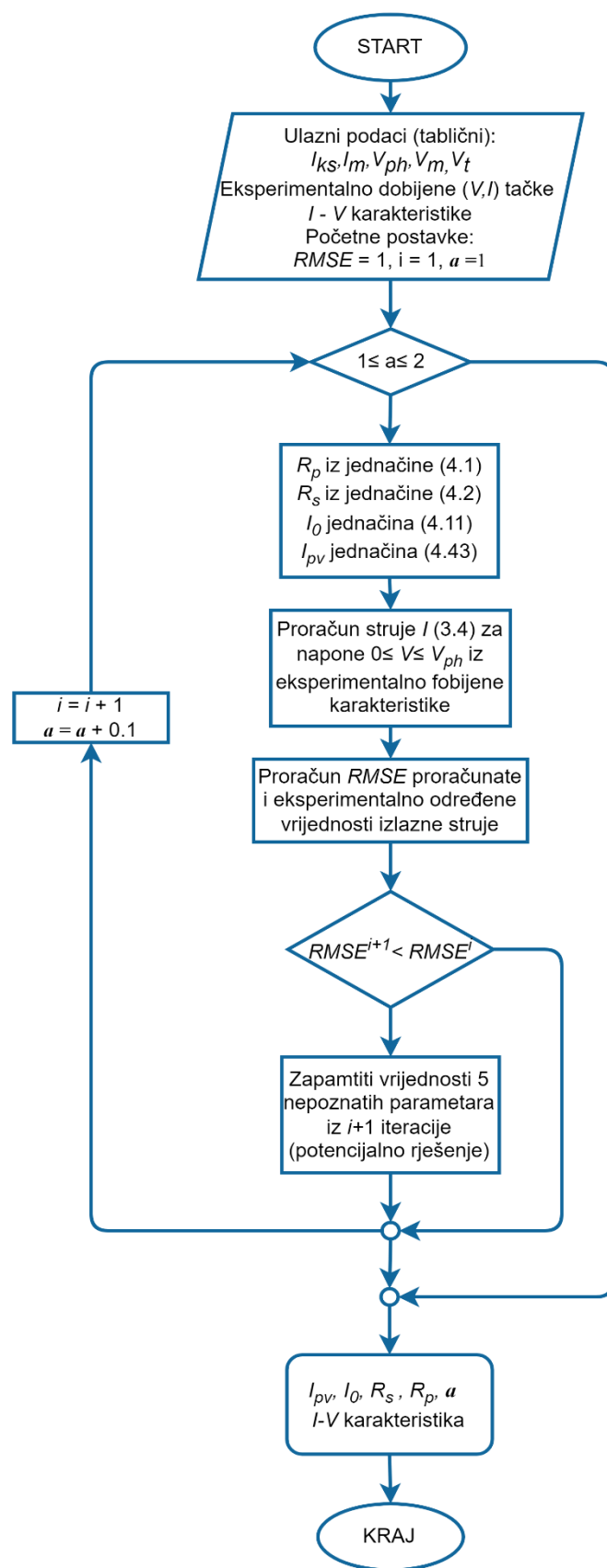
$$I_{pv} = I_{ks} \frac{R_p + R_s}{R_p} + \frac{I_{ks}(R_p + R_s) - V_{ph}}{R_p} \cdot \frac{e^{\frac{I_{ks}R_s}{aV_t}} - 1}{\frac{V_{ph}}{aV_t} - e^{\frac{I_{ks}R_s}{aV_t}}} \quad (4.43)$$

Zamjenom I_0 i I_{pv} u (4.41) i (4.42) dobija se sistem od dvije jednačine sa tri nepoznate R_s , R_p i a , gdje se kao što je naglašeno, a smatra nezavisnim parametrom. Ovaj sistem jednačina rješava se iterativnim postupkom u kojem se za svaku vrijednost a proračunava set vrijednosti (R_s i R_p), a zatim se rješavanjem (4.11) i (4.43) dobijaju vrijednosti I_0 i I_{pv} . Iterativnim postupkom u kojem se vrijednost a inkrementira određuje se izgled strujno-naponske karakteristike. Tačna vrijednost faktora idealnosti diode daje strujno-naponsku karakteristiku sa minimalnim odstupanjem srednje kvadratne greške (4.44) u odnosu na izmjerenu strujno naponsku karakteristiku. Srednja kvadratna greška može se izraziti kao:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (I_i - I_{i,sc})^2}{n}} \quad (4.44)$$

gdje je I_i proračunata vrijednost struje za napon V_i , $I_{i,sc}$ je stvarna vrijednost struje za napon V_i , a n je ukupan broj posmatranih tačaka strujno-naponske karakteristike.

Na slici 4.8 je dat prikaz načina implementacije algoritma za proračun vrijednosti nepoznatih parametara korišćenjem Metode 7.



Slika 4.8 Blok dijagram Metode 7

5. NUMERIČKI REZULTATI

Testiranje efikasnosti primjene analitičkih metoda predstavljenih u prethodnom poglavlju sprovedeno je na jednoj literaturno poznatoj solarnoj ćeliji i jednom literaturno poznatom solarnom modulu. Za ćeliju je korišćena R.T.C. France solarne ćelije, a za moduo Solarex MSX – 60 solarni moduo.

Analiza rezultata dobijenih primjenom sedam predloženih metoda na primjeru solarne ćelije R.T.C. France biće izvršena poređenjem dobijenih vrijednosti nepoznatih parametara sa metaheurističkom metodom HISA (eng. *Hybridized Interior Search Algorithm*). Ova metoda, upoređena sa još 68 metoda u [83], dala je vrijednosti sa najmanjim odstupanjem od rezultata mjerenja.

Komparativna analiza rezultata dobijenih primjenom sedam predloženih metoda na primjeru solarnog modula Solarex MSX – 60 biće izvršena poređenjem srednje kvadratne greške između mjerenih i proračunatih vrijednosti I-V karakteristike.

5.1. Estimacija parametara R.T.C. France solarne ćelije

R.T.C. France je jedan od najpoznatijih literaturnih primjera silikonske solarne ćelije koji se vezuje za razvoj fotonaponske tehnologije u Francuskoj. Nastala je 70 – ih godina prošlog vijeka kao proizvod kompanije La Radiotechnique – Compelec (R.T.C.) u Parizu u Francuskoj. Ova ćelija je umnogome doprinijela naučno – istraživačkom radu kao i razvoju fotonaponskih tehnologija. Tehnologija izrade ćelije je monokristalni silicijum, koji je poznat po velikoj efikasnosti konverzije sunčeve svjetlosti u električnu energiju. U Tabeli 5.1 je dat prikaz osnovnih podataka sa natpisne pločice R.T.C. France solarne ćelije pri standardnim test uslovima, to jeste temperaturi od 33 °C i iradijaciji od 1000W/m².

Tabela 5.1 Podaci sa natpisne pločice R.T.C. France solarne ćelije

Napon praznog hoda – V_{ph} [V]	0.5728
Struja kratkog spoja – I_{ks} [A]	0.7603
Struja tačke maksimalne snage – I_m [A]	0.4507
Napon tačke maksimalne snage – V_m [V]	0.6894

5.1.1 Estimacija parametara R.T.C. France – Metoda 1

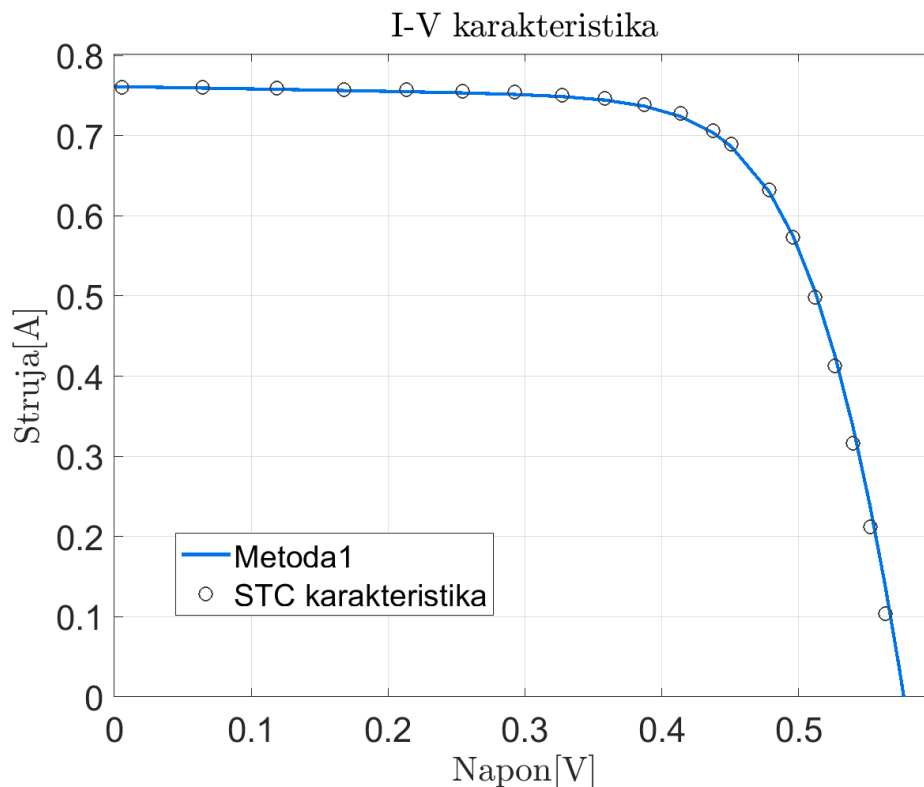
U Tabeli 5.2 predstavljeni su rezultati dobijeni primjenom Metode 1 na primjeru R.T.C. France solarne ćelije, kao i rezultati dobijeni primjenom HISA algoritma. Početna vrijednost faktora idealnosti diode je postavljena na 1, a početna vrijednost serijske otpornosti na 0.01. Nakon izvršenja iterativnog postupka opisanog u poglavlju 4.2. dobijene su vrijednosti pet nepoznatih parametara.

Vrijednost faktora idealnosti diode mijenjana je sa korakom 0.1, dok je serijska otpornost mijenjana sa korakom 0.01. Na slici 5.1 predstavljena je I-V karakteristika, a na slici 5.2 P-V karakteristika dobijena primjenom Metode 1.

Tabela 5.2 – Rezultati estimacije parametara R.T.C. France Metodom 1

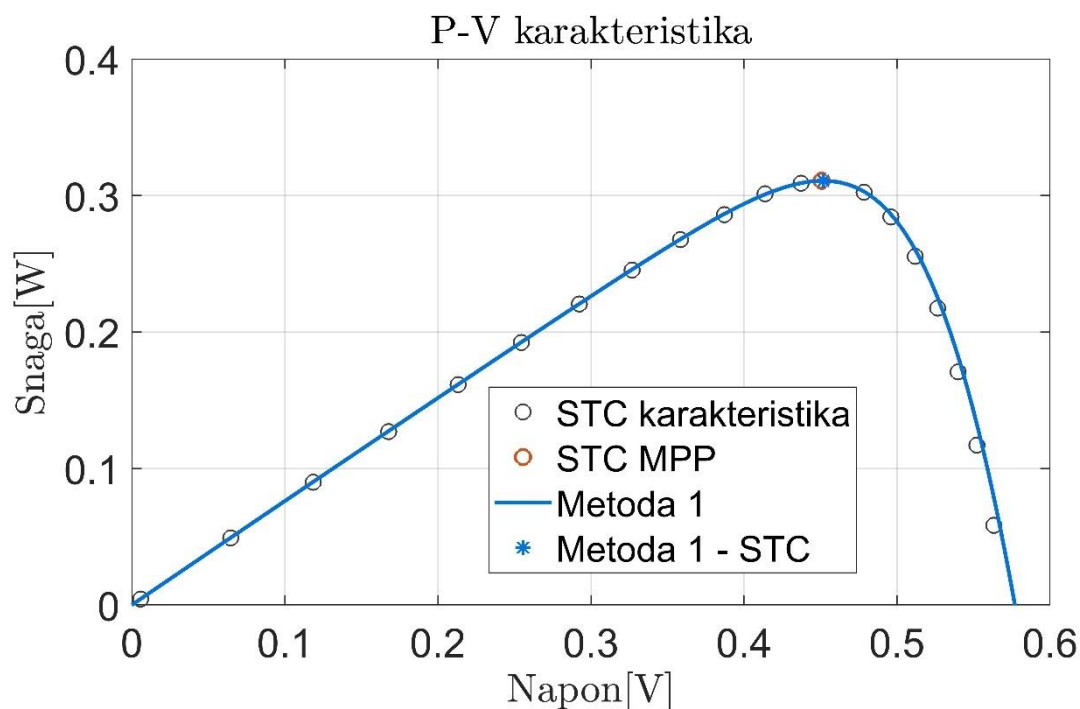
Parametri / Metoda	HISA	Metoda 1
a	1.4772	1.5
R_s [Ω]	0.0365	0.04
R_p [Ω]	52.8897	33.8947
I_{pv} [A]	0.7607	0.7622
I_0 [μ A]	0.3106	0.3479

Iz Tabele 5.2 može se uočiti da su ovom metodom postignuti prihvatljivi rezultati pri određivanju vrijednosti parametara R_s , a i I_0 . Najveće odstupanje od HISA metode javlja se pri određivanju vrijednosti paralelne otpornosti koja je mnogo manja u odnosu na R_p dobijenu HISA metodom.



Slika 5.1 I-V karakteristika R.T.C. France dobijena primjenom Metode 1

Na slici 5.2 prikazana je P-V karakteristika dobijena primjenom Metode 1. Vidi se da se proračunata tačka maksimalne snage gotovo poklapa sa stvarnom tačkom izmjenom pri STC. Ovo dokazuje da je metoda pogodna za potrebe praćenja tačke maksimalne snage.



Slika 5.2 P-V karakteristika R.T.C. France dobijena primjenom Metode 1

5.1.2 Estimacija parametara R.T.C. France – Metoda 2

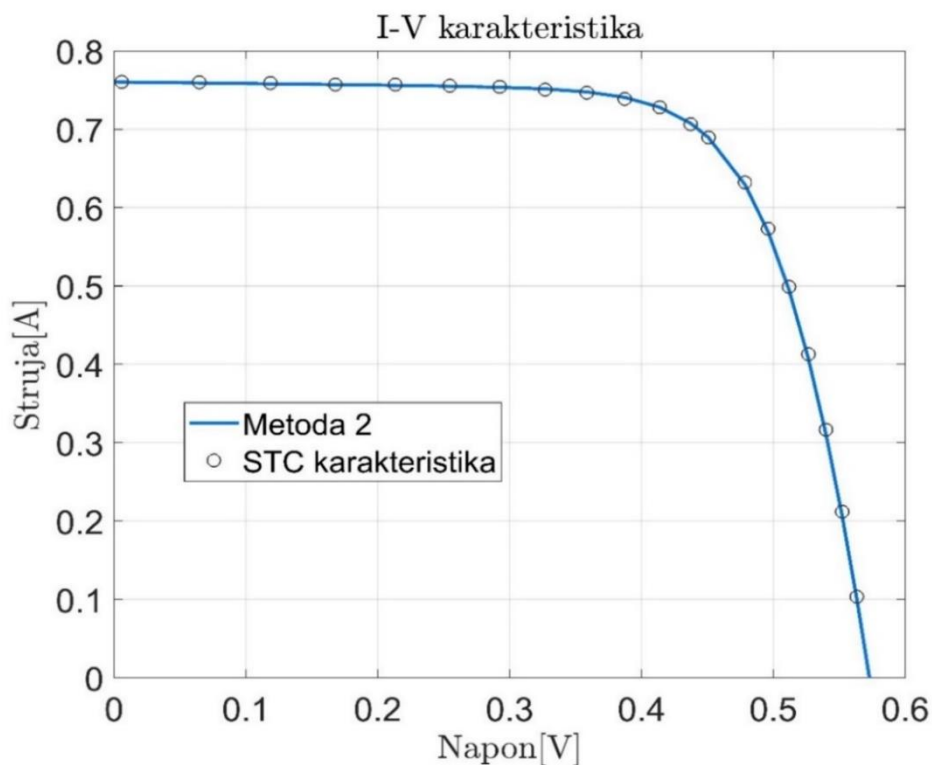
Primjenom Metode 2 na primjeru R.T.C. France solarne ćelije dobijene su vrijednosti nepoznatih parametara prikazane u Tabeli 5.3. Kako bi se metoda mogla primijeniti, potrebno je odrediti vrijednosti R_{s0} i R_{p0} . Na osnovu grafika dobijenog mjerenjima, negativna recipročna vrijednost nagiba krive u tački kratkog spoja je određena kao $R_{p0} = 50.6465$, a negativna recipročna vrijednost nagiba krive u tački praznog hoda je određena kao $R_{s0} = 0.0907$.

Tabela 5.3 – Rezultati estimacije parametara R.T.C. France Metodom 2

Parametri / Metoda	HISA	Metoda 2
a	1.4772	1.4195
R_s [Ω]	0.0365	0.0418
R_p [Ω]	52.8897	50.8485
I_{pv} [A]	0.7607	0.7609
I_0 [μ A]	0.3106	0.1705

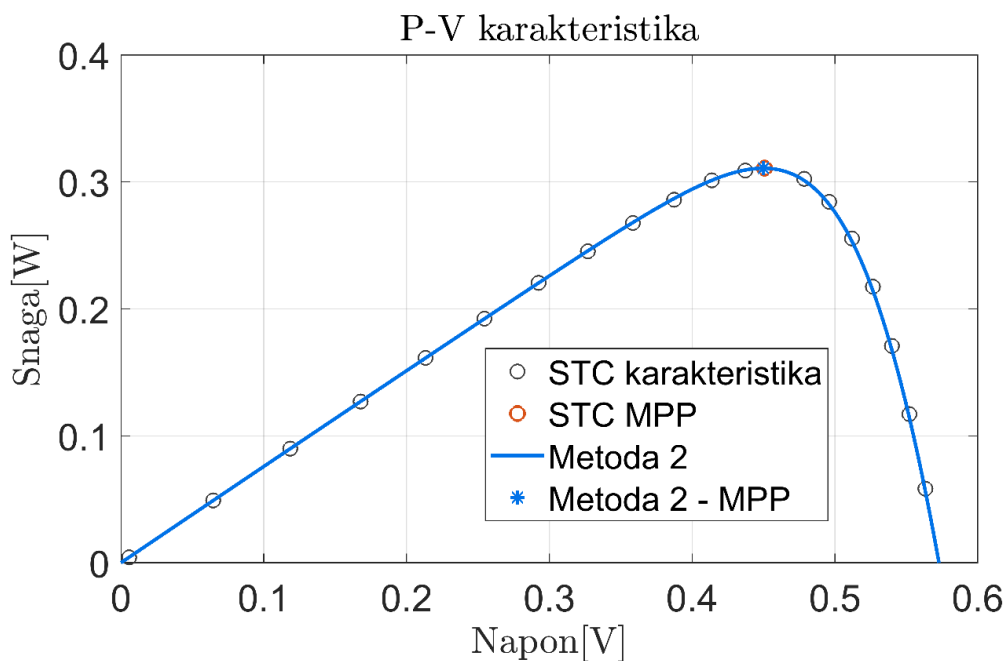
Na osnovu Tabele 5.3 može se zaključiti da je Metodom 2 najpreciznije određena fotostruja. Takođe, dobijene su zadovoljavajuće vrijednosti serijske i paralelne otpornosti.

Na slici 5.3 prikazane su eksperimentalno dobijena I-V karakteristika pri STC i proračunata I-V karakteristika, a na slici 5.4 P-V karakteristika.



Slika 5.3 I-V karakteristika R.T.C. France dobijena primjenom Metode 2

Na osnovu slike 5.3 i slike 5.4 može se zaključiti da se sa manjim odstupanjima parametara dobija zadovoljavajući izgled I-V i P-V karakteristika koji veoma dobro prati karakteristike dobijene od proizvođača. Sa slike 5.4 vidi se da je odstupanje proračunate vrijednosti maksimalne snage od tablične vrijednosti minimalno.



Slika 5.4 P-V karakteristika R.T.C. France dobijena primjenom Metode 2

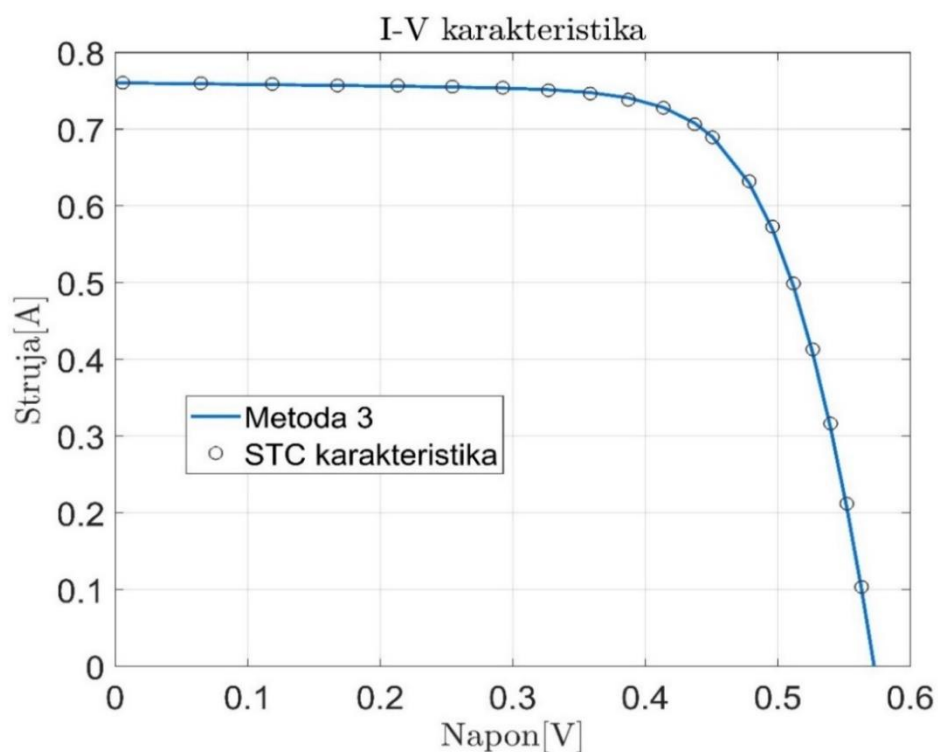
5.1.3 Estimacija parametara R.T.C. France – Metoda 3

U Tabeli 5.4 prikazane su vrijednosti nepoznatih parametara dobijene korišćenjem Metode 3. Vrijednosti R_{s0} i R_{p0} iste su kao u prethodnoj metodi.

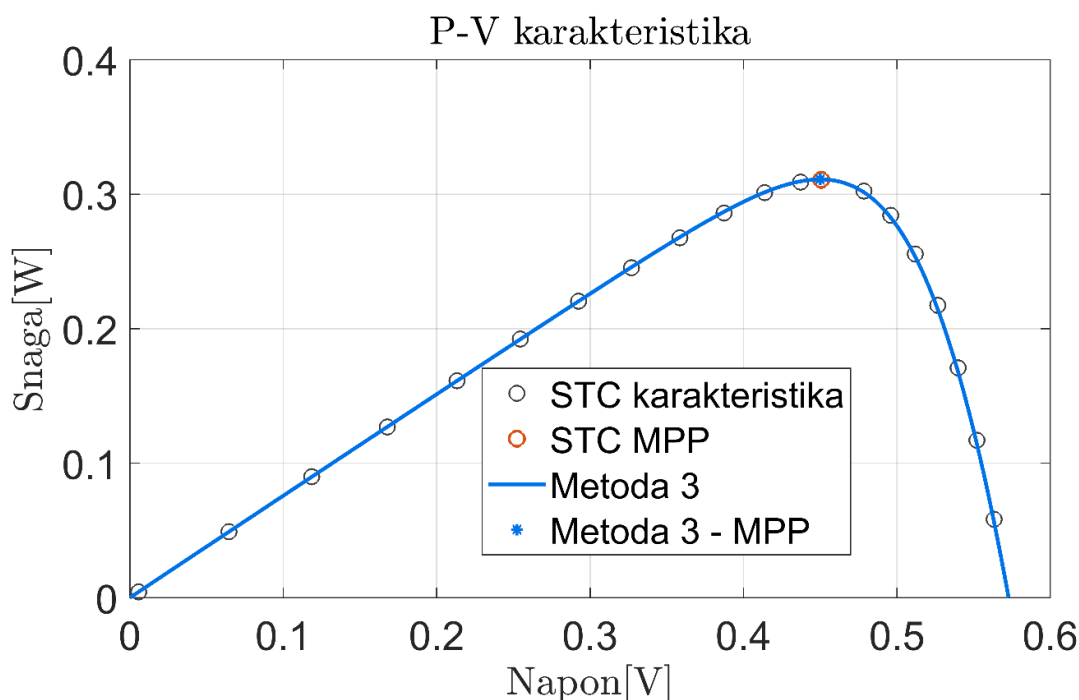
Tabela 5.4 – Rezultati estimacije parametara R.T.C. France Metodom 3

Parametri / Metoda	HISA	Metoda 3
a	1.4772	1.4125
$R_s [\Omega]$	0.0365	0.0419
$R_p [\Omega]$	52.8897	50.8066
$I_{pv} [A]$	0.7607	0.7609
$I_0 [\mu A]$	0.3106	0.1583

Za Metodu 3 je moguće izvesti gotovo identične zaključke koji su izvedeni za Metodu 2. Razlika je u primjeni iterativnog postupka za određivanje serijske otpornosti. Ovaj postupak nije kompleksan i jednostavno se primjenjuje u softveru za proračun. Međutim, ne utiče značajno na poboljšanje tačnosti rezultata, što se da primijetiti iz Tabela 5.3 i 5.4. Dakle, Metoda 2 i Metoda 3 daju komplementarne rezultate, ali je preporuka koristiti Metodu 2 zbog jednostavnije primjene i kraćeg vremena izvršenja algoritma. Na slici 5.5 je predstavljen izgled I-V karakteristike, a na slici 5.6 predstavljen je izgled P-V karakteristike.



Slika 5.5 I-V karakteristika R.T.C. France dobijena primjenom Metode 3



Slika 5.6 P-V karakteristika R.T.C. France dobijena primjenom Metode 3

5.1.4 Estimacija parametara R. T. C. France – Metoda 4

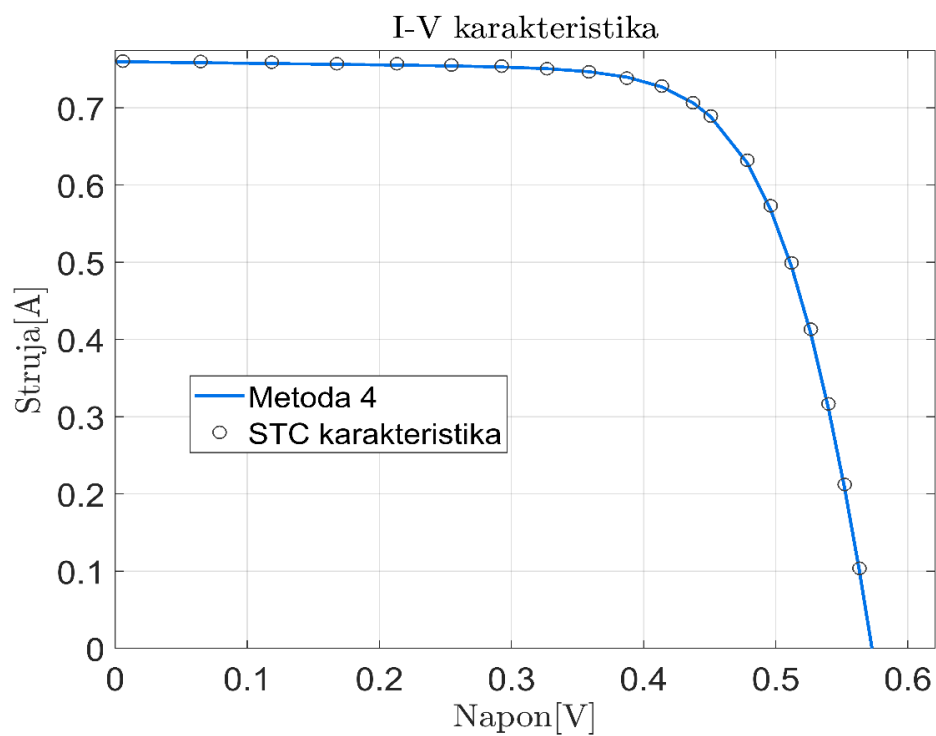
U Tabeli 5.5 predstavljeni su rezultati dobijeni u MATLAB – u primjenom Metode 4 na primjeru R.T.C. France solarne ćelije, kao i rezultati dobijeni primjenom HISA algoritma. Za parametre R_{s0} i R_{p0} usvojene su iste vrijednosti kao u prethodne dvije metode.

Tabela 5.5 – Rezultati estimacije parametara R.T.C. France Metodom 4

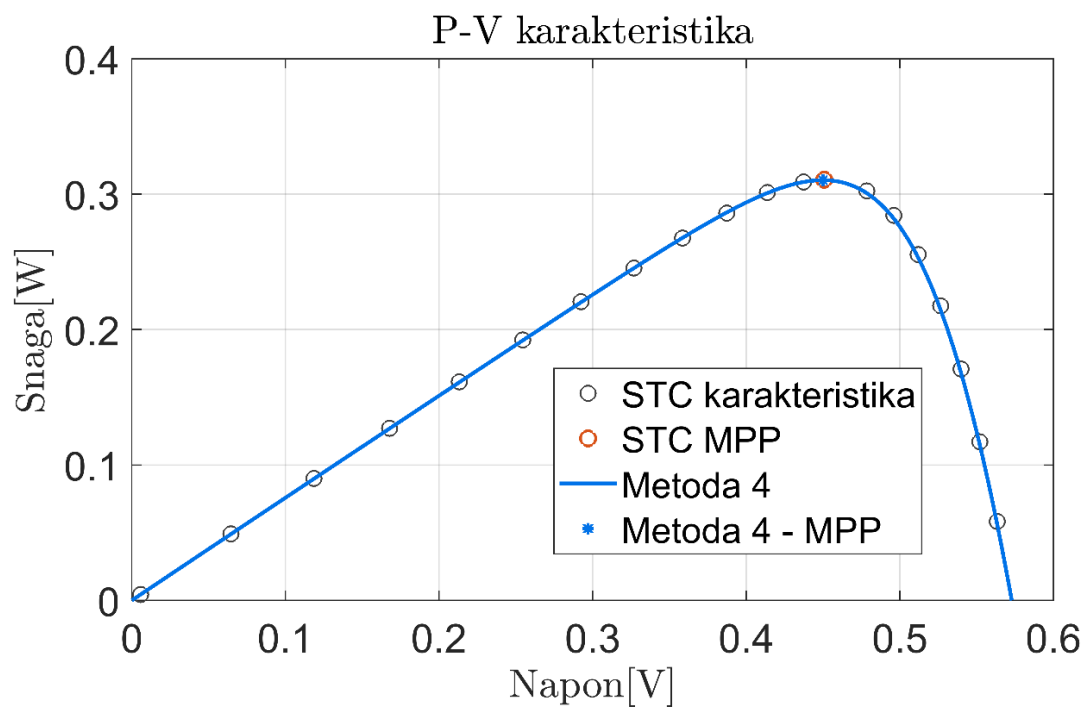
Parametri / Metoda	HISA	Metoda 4
a	1.4772	1.4675
$R_s [\Omega]$	0.0365	0.0411
$R_p [\Omega]$	52.8897	49.8485
$I_{pv} [A]$	0.7607	0.7603
$I_0 [\mu A]$	0.3106	0.1891

Posmatrajući Tabelu 5.5 može se zaključiti da se primjenom Metode 4 na podatke o ćeliji R.T.C. France dobija vrijednost faktora idealnosti diode bliska vrijednosti dobijenoj primjenom HISA metode. Ovom metodom postignuti su zadovoljavajući rezultati prilikom određivanja ostalih parametara. Najveće odstupanje javlja se prilikom proračuna vrijednosti inverzne struje zasićenja diode.

Na slikama 5.7 i 5.8. predstavljen je izgled I-V i P-V karakteristika respektivno. Vizuelnom analizom ovih karakteristika može se zaključiti da se proračunom dobijaju grafici koji se gotovo preklapaju sa grafikom dobijenim od proizvođača.



Slika 5.7 I – V karakteristika R.T.C. France dobijena primjenom Metode 4



Slika 5.8 P-V karakteristika R.T.C. France dobijena primjenom Metode 4

5.1.5 Estimacija parametara R.T.C. France – Metoda 5

Metoda 5 za estimaciju parametara jednodiodnog modela solarne ćelije predstavlja kombinaciju analitičke metode i numeričkog iterativnog postupka kojim se određuju vrijednosti R_s , R_p i a . Zbog postojanja numeričkog dijela, pristup analizi rezultata opisan u nastavku je drugačiji u odnosu na pristup korišćen pri analizi rezultata drugih metoda. Kako bi numerički postupak konvergirao ka pravim vrijednostima, potrebno je napraviti dobar izbor ulaznih parametara. U Tabelama 5.6 predstavljeni su dobijeni rezultati estimacije R_s , R_p i a pri različitim početnim vrijednostima R_s , R_p .

Tabela 5.6 – Estimacija vrijednosti nepoznatih parametara R_s , R_p i a solarne ćelije R.T.C. France Metodom 5 za različite početne vrijednosti R_{p0} i R_{s0}

HISA		Metoda 5			
R_s	0.0365	$R_{p0} = 45$			
		R_{s0}	R_s	R_p	a
		0.02	0.0389	45.084	1.4791
		0.03	0.0389	45.2071	1.4797
		0.04	0.0388	45.2996	1.4802
		0.05	0.0388	45.3717	1.4806
		$R_{p0} = 50$			
		R_{s0}	R_s	R_p	a
		0.02	0.0374	49.7721	1.5037
		0.03	0.0373	49.9293	1.5044
R_p	52.8897	0.04	0.0373	50.0474	1.5049
		0.05	0.0388	50.1383	1.5052
		$R_{p0} = 53$			
		R_{s0}	R_s	R_p	a
		0.02	0.0366	52.5594	1.5162
		0.03	0.0365	52.7399	1.5170
		0.04	0.0365	52.8753	1.5175
a	1.4772	0.05	0.0365	52.9707	1.5178
		$R_{p0} = 55$			
		R_{s0}	R_s	R_p	a
		0.02	0.0361	54.4068	1.5239
		0.03	0.0361	54.6039	1.5246
		0.04	0.0360	54.7515	1.5251
		0.05	0.0360	54.8644	1.5255

Iz Tabele 5.6 se može zaključiti da primjenom Metode 5 na primjeru solarne ćelije R.T.C. France R_s konvergira ka preciznoj vrijednosti bez obzira na izbor početne vrijednosti R_{s0} . Paralelna otpornost se veoma malo mijenja u odnosu na pretpostavljenu početnu vrijednost R_{p0} . Vrijednost faktora idealnosti diode varira. Za manju vrijednost paralelne otpornosti dobija se preciznija vrijednost faktora idealnosti diode. Kako bi se utvrdio razlog ovih varijacija, prilikom implementacije formule za faktor idealnosti diode unesene su vrijednosti R_s i R_p dobijene

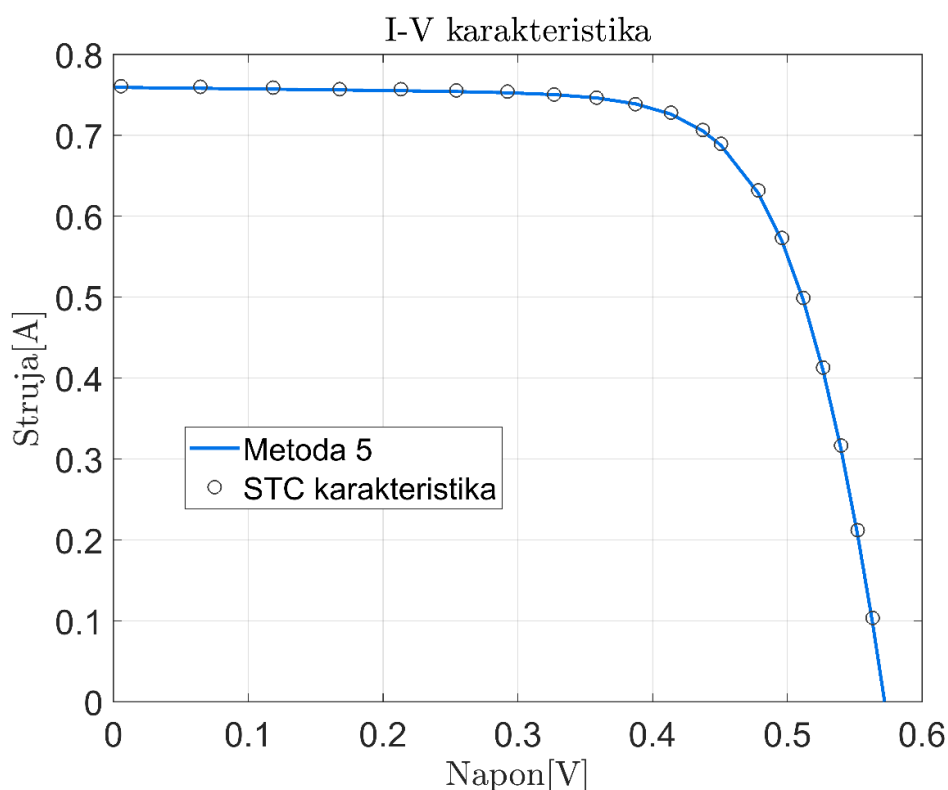
primjenom HISA metode. Primjenom (4.33) dobijeno je $a = 1.5176$. Razlozi ovog odstupanja su uvedene analitičke aproksimacije. Dakle, preporuka izvedena iz prethodne analize je da je prilikom primjene Metode 5 na primjeru solarnih ćelija potrebno pretpostaviti vrijednost paralelne otpornosti blisku realnoj vrijednosti.

Za potrebe dalje analize ove metode, kao i komparativne analize u nastavku rada, usvojena je pretpostavka da su početne vrijednosti serijske i paralelne otpornosti: $R_{s0} = 0.04\Omega$ i $R_{p0} = 53\Omega$. U Tabeli 5.7 predstavljeni su rezultati estimacije parametara primjenom Metode 5. Kao što je naglašeno, ova metoda od svih parametara najpreciznije određuje vrijednost R_s . Ukoliko se početna vrijednost R_p dobro pretpostavi, metoda daje preciznu vrijednost paralelne otpornosti. Takođe, iz Tabele 5.7 se može vidjeti da je i vrijednost struje I_{pv} i I_0 određena sa dovoljnom preciznošću.

Tabela 5.7 – Rezultati estimacije parametara R.T.C. France Metodom 5

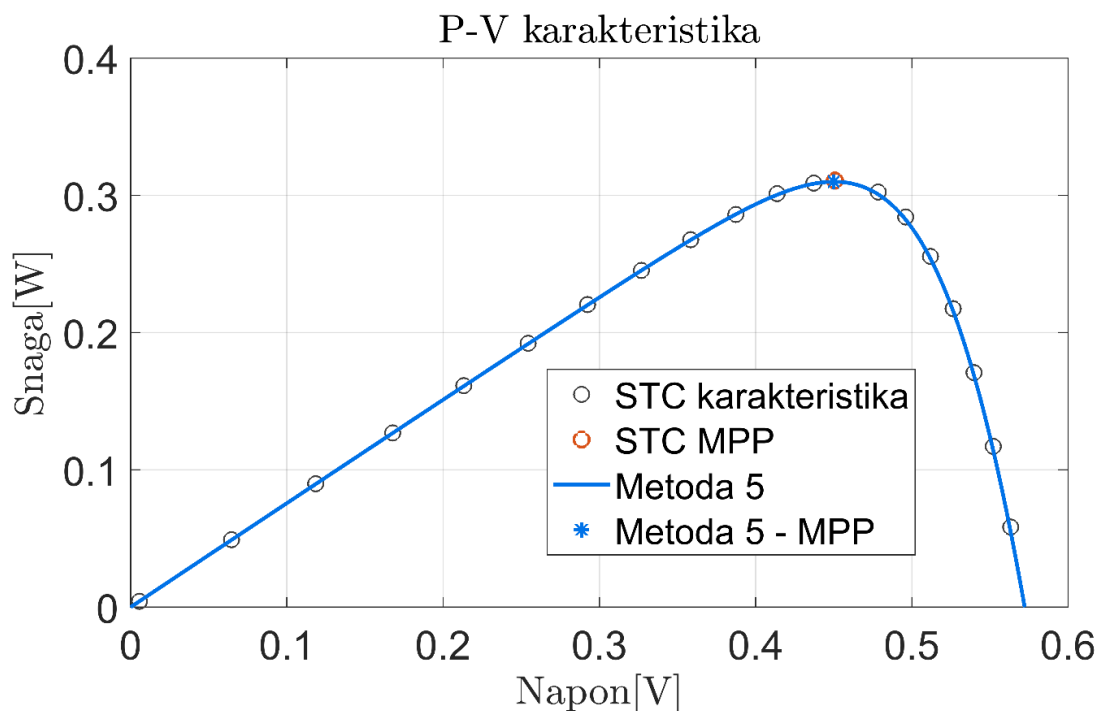
Parametri / Metoda	HISA	Metoda 5
a	1.4772	1.5175
$R_s [\Omega]$	0.0365	0.0365
$R_p [\Omega]$	52.8897	52.8753
$I_{pv} [A]$	0.7607	0.7598
$I_0 [\mu A]$	0.3106	0.3165

Na slici 5.9 predstavljena je I-V, a na slici 5.10 P-V karakteristika dobijena primjenom Metode 5 na primjeru R.T.C. France solarne ćelije.



Slika 5.9 I-V karakteristika R.T.C. France dobijena primjenom Metode 5

Sa ovih slika se može zaključiti da metoda daje dobre izlazne karakteristike. Najveći nedostatak ove metode je potreba za izborom početnih vrijednosti serijske i paralelne otpornosti. Ukoliko se vrijednosti ne pretpostave dobro, metoda može da ne konvergira ili konvergira ka pogrešnim vrijednostima.



Slika 5.10 P-V karakteristika R.T.C. France dobijena primjenom Metode 5

5.1.6 Estimacija parametara R.T.C. France – Metoda 6

Metoda 6, kao i Metoda 5 osim analitičkih relacija, u sebi sadrži numerički iterativni postupak. Za potrebe analize ove metode na primjeru solarne ćelije R.T.C. France korišćene su različite početne vrijednosti serijske i paralelne otpornosti. Glavni uslov numeričkog postupka jeste da je $dP/dV = 0$, a za grešku proračuna uzeto je 10^{-6} . Rezultati ove analize predstavljeni su u Tabeli 5.8.

Tabela 5.8 – Estimacija vrijednosti nepoznatih parametara R_s , R_p i a solarne ćelije R.T.C. France Metodom 6 za različite početne vrijednosti R_{p0} i R_{s0} .

HISA			Metoda 6		
R_s	R_p	a	$15 \leq R_{p0} < \infty, 0.01 \leq R_{s0} \leq 0.09$		
			R_s	R_p	A
0.0365	52.8897	52.8897	0.0375	50.4310	1.5037

Iz Tabele 5.8 može se zaključiti da ova metoda na primjeru R.T.C. France solarne ćelije konvergira za veliki broj pretpostavljenih vrijednosti serijske i paralelne otpornosti. Metoda neće konvergirati za vrijednosti izvan ovih opsega. Odstupanja proračunatih vrijednosti parametara od

vrijednosti dobijenih HISA metodom nijesu velika. Iz prethodno navedenih razloga, ova metoda je veoma pogodna za estimaciju parametara na primjeru solarne ćelije R.T.C. France.

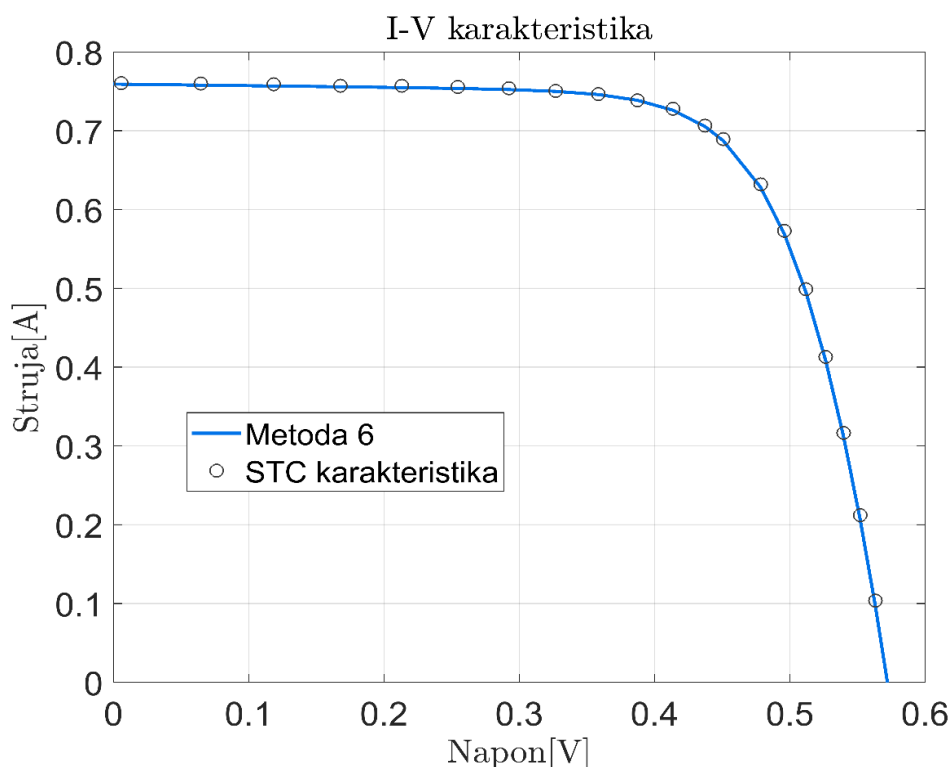
Kako se radi o numeričkom postupku, konvergencija na jednom primjeru solarne ćelije ne garantuje konvergenciju na nekom drugom primjeru. Mogućnost konvergencije zavisi od seta ulaznih parametara, pretpostavljenih vrijednosti nepoznatih parametara, koraka kojim se mijenjaju vrijednosti parametara u iterativnom postupku, kao i vrijednosti dozvoljenog odstupanja od uslova konvergencije.

U Tabeli 5.9 osim prethodno određenih vrijednosti nepoznatih parametara R_s , R_p i a , prikazane su vrijednosti I_0 i I_{pv} . Iz Tabele 5.9 se može zaključiti da su dobijene zadovoljavajuće vrijednosti R_s , R_p i I_0 .

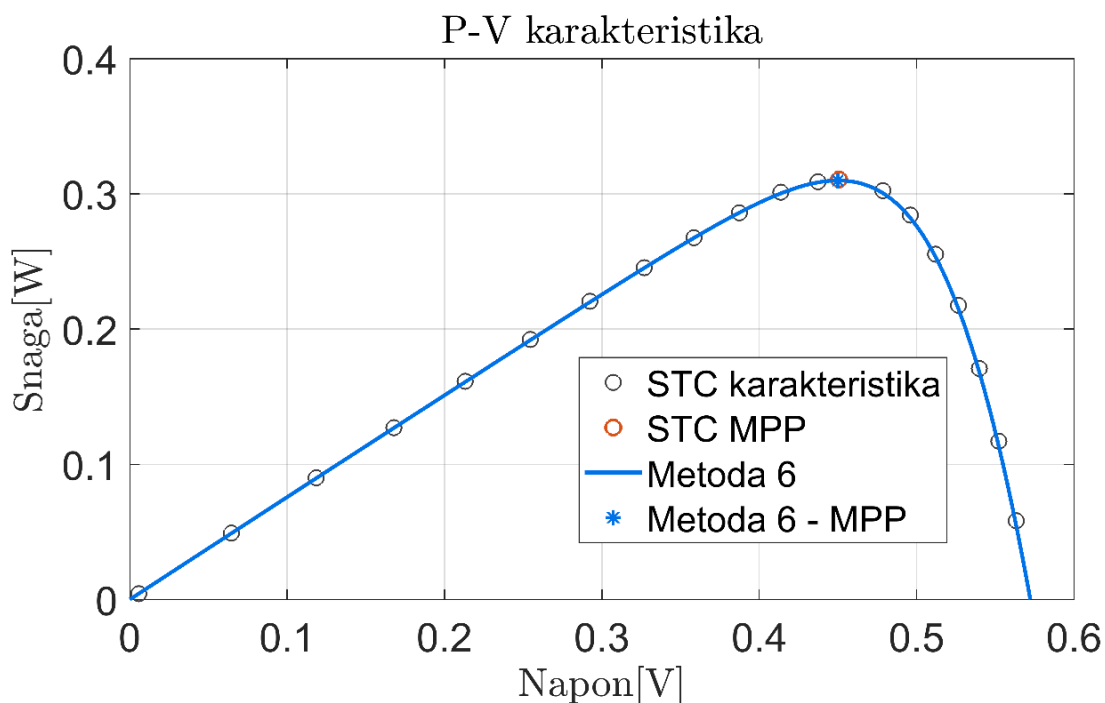
Tabela 5.9– Rezultati estimacije parametara R.T.C. France Metodom 6

Parametri / Metoda	HISA	Metoda 6
a	1.4772	1.5037
R_s [Ω]	0.0365	0.0375
R_p [Ω]	52.8897	50.4310
I_{pv} [A]	0.7607	0.7597
I_0 [μ A]	0.3106	0.2768

Na slici 5.11 dat je prikaz I-V karakteristike dobijene primjenom Metode 6, a na slici 5.12 predstavljena je P-V karakteristika dobijena primjenom ove metode.



Slika 5.11 I-V karakteristika R.T.C. France dobijena primjenom Metode 6



Slika 5.12 P-V karakteristika R.T.C. France dobijena primjenom Metode 6

5.1.7 Estimacija parametara R.T.C. France – Metoda 7

Kao što je prethodno objašnjeno Metoda 7 se bazira na estimaciji parametara na osnovu I-V karakteristike određene u eksperimentima pri standardnim test uslovima. Za implementaciju ove metode prvo su uneseni podaci dobijeni od proizvođača o tačkama na I-V karakteristici ćelije R.T.C. France. Vrijednost srednje kvadratne greške postavljena je na $RMSE = 1$, pod pretpostavkom da u najboljem slučaju ova vrijednost ne prelazi 1.

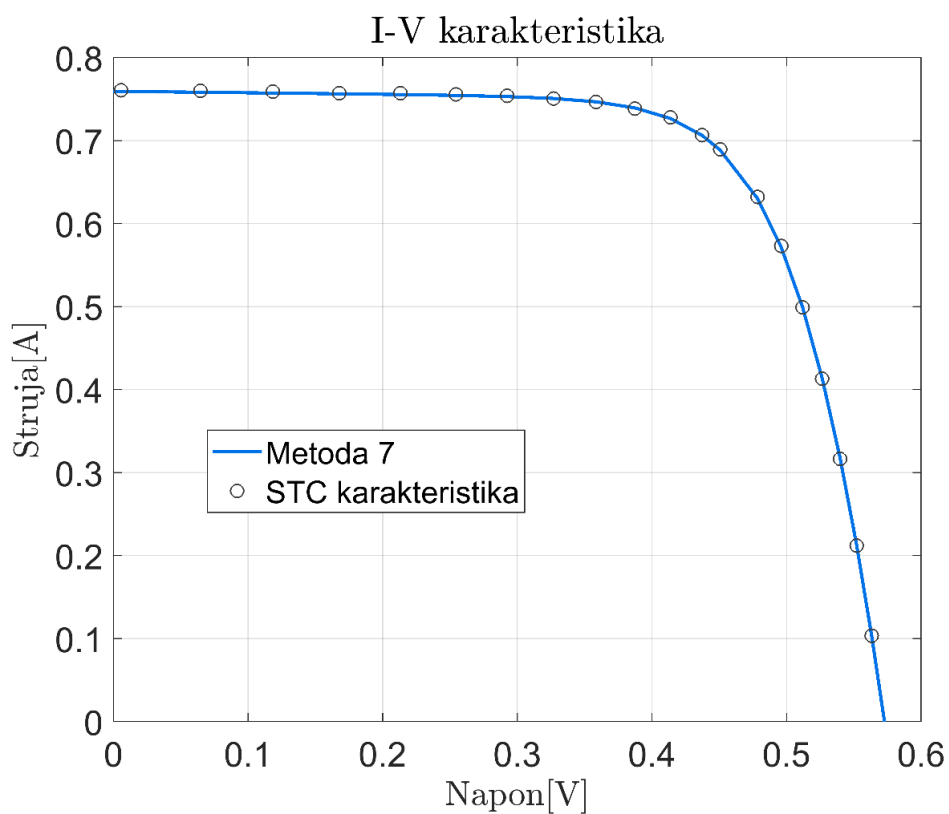
U Tabeli 5.10 predstavljeni su rezultati estimacije parametara dobijeni primjenom Metode 7 na primjeru solarne ćelije R.T.C. France. Kao što se vidi iz Tabele 5.10, ovom metodom se najpreciznije određuju vrijednosti serijske otpornosti, struje I_0 i struje I_{pv} . Vrijednost faktora idealnosti diode prelazi 1.5.

Tabela 5.10 – Rezultati estimacije parametara R.T.C. France Metodom 7

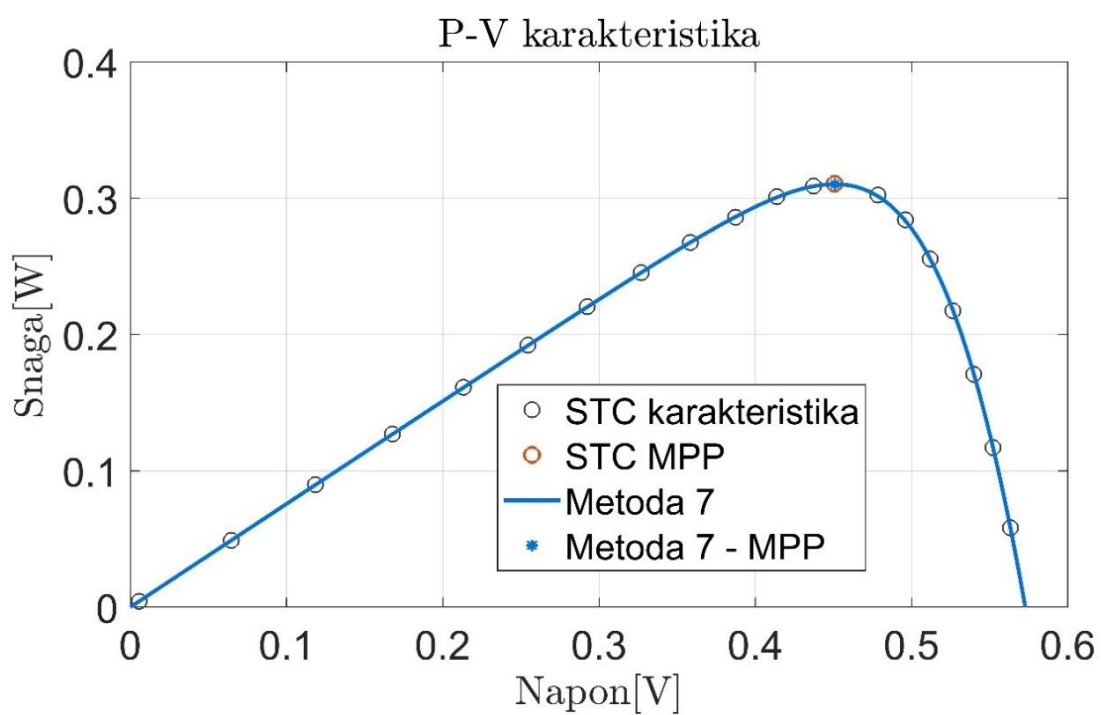
Parametri / Metoda	HISA	Metoda 7
a	1.4772	1.503
$R_s [\Omega]$	0.0365	0.0358
$R_p [\Omega]$	52.8897	56.7496
$I_{pv} [A]$	0.7607	0.7598
$I_0 [\mu A]$	0.3106	0.3427

Na slikama 5.13 i 5.14. predstavljen je izgled I-V i P-V karakteristike respektivno. Sa slike 5.14 može se uočiti da se tačka maksimalne snage, dobijena primjenom Metode 7, poklapa sa

tačkom maksimalne snage dobijenom eksperimentima na solarnoj ćeliji R.T.C. France pri standardnim test uslovima.



Slika 5.13 I-V karakteristika R.T.C. France dobijena primjenom Metode 7



Slika 5.14 P-V karakteristika R.T.C. France dobijena primjenom Metode 7

5.1.8 Uporedna analiza estimacije parametara solarne ćelije R.T.C. France

U Tabeli 5.11 su prikazani rezultati estimacije nepoznatih parametara solarne ćelije R.T.C. France dobijeni primjenom sedam metoda. Radi poređenja preciznosti dobijenih rezultata, unesene su vrijednosti pet nepoznatih parametara dobijene primjenom HISA metode.

Tabela 5.11 – Rezultati estimacije parametara svih sedam metoda i HISA na primjeru solarne ćelije R.T.C. France

Metoda/ Parametri	a	R_s [Ω]	R_p [Ω]	I_{pv} [A]	I_0 [μ A]
HISA	1.4772	0.0365	52.8897	0.7607	0.3106
Metoda 1	1.5	0.04	33.8947	0.7622	0.3479
Metoda 2	1.4195	0.0418	50.8485	0.7609	0.1705
Metoda 3	1.4125	0.0419	50.8066	0.7609	0.1583
Metoda 4	1.4675	0.0411	49.8485	0.7603	0.1891
Metoda 5	1.5175	0.0365	52.8753	0.7598	0.3165
Metoda 6	1.5037	0.0375	50.4310	0.7597	0.2768
Metoda 7	1.503	0.0358	56.7496	0.7598	0.3427

Na osnovu rezultata predstavljenih u Tabeli 5.11 može se utvrditi da je svaka od metoda karakteristična za precizno određivanje nekog od pet nepoznatih parametara. Vrijednosti nepoznatih parametara određene su sa različitom preciznošću u zavisnosti od korišćene metode što je posljedica upotrebe različitih analitičkih relacija, iterativnih postupaka, kao i uvedenih aproksimacija.

Primjenom Metode 4 dobija se vrijednost faktora idealnosti diode koja je preciznija u odnosu na ostale metode. Prema preporukama, faktor idealnosti diode solarnih ćelija bi trebao biti u opsegu $1 \leq a \leq 1.5$. Iz Tabele 5.11 vidi se da Metoda 5, Metoda 6 i Metoda 7 daju vrijednosti a izvan ovog opsega. Kao što je objašnjeno, prilikom analize rezultata dobijenih primjenom Metode 5, ovo je posljedica određenih aproksimacija unesenih u relaciju za proračun faktora idealnosti diode. Metode 2 i 3 imaju najveće odstupanje a u odnosu na HISA metodu.

Najpreciznija vrijednost serijske otpornosti dobijena je primjenom Metode 5. Ova vrijednost se u potpunosti poklapa sa HISA metodom. Međutim, potrebno je napomenuti da Metoda 5 u sebi sadrži numerički postupak za određivanje vrijednosti R_s , R_p i a , te da je ovakva vrijednost serijske otpornosti dobijena empirijski, na osnovu upoređivanja rezultata za različite pretpostavljene vrijednosti R_{s0} i R_{p0} , pri čemu je za potrebe komparativne analize uzet najbolji mogući slučaj. Pored ove metode, precizni rezultati su dobijeni primjenom Metode 7 bazirane na poređenju proračunate i mjerene I-V karakteristike, kao i primjenom Metode 6 koja u sebi, takođe sadrži numerički postupak kao i Metoda 5. Primjenom ostalih metoda dobijene vrijednosti serijske otpornosti odstupaju u opsegu 0.0035 – 0.0055 Ω . Ovo je posljedica aproksimacija, pretpostavki i međuzavisnosti sa određivanjem ostalih parametara u sklopu iterativnih postupaka.

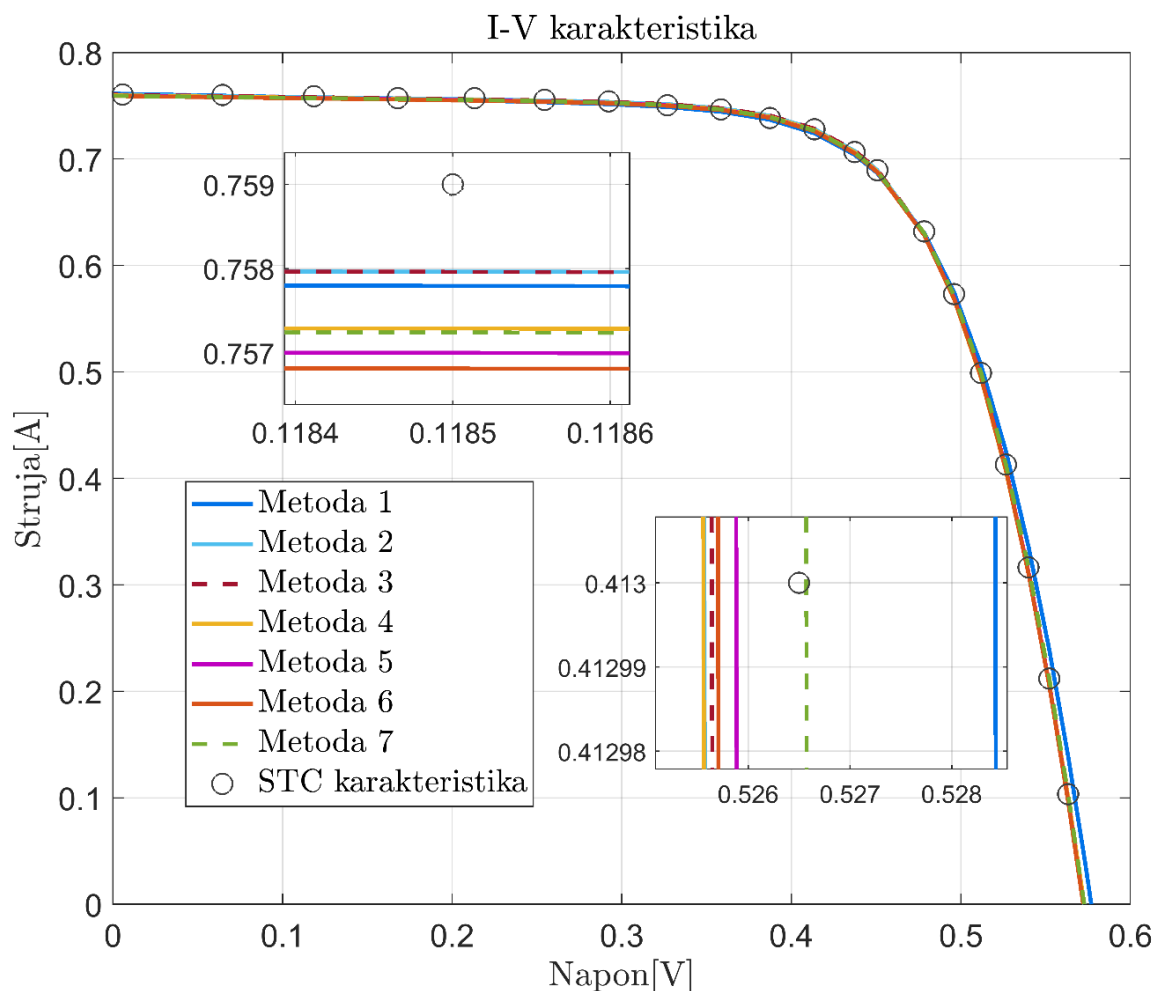
Paralelna otpornost je najpreciznije određena Metodom 5. Analizom rezultata dobijenih ovom metodom utvrđeno je da je za precizno određivanje paralelne otpornosti potrebno uzeti vrijednost R_{p0} približno jednaku željenom rezultatu. Razlog tome je primjena (4.35) prema kojoj se R_p vrlo malo mijenja u odnosu na određenu vrijednost R_{p0} . Ista situacija pojavljuje se kod Metode 2, Metode 3 i Metode 4. Metodom 2 uz usvajanje određenih aproksimacija, konačna vrijednost paralelne otpornosti je jednaka negativnoj recipročnoj vrijednosti nagiba krive u tački kratkog spoja, dok se kod Metode 3 i Metode 4 paralelna otpornost veoma malo mijenja u odnosu na R_{p0} . Dakle, za pravilan proračun paralelne otpornosti primjenom ovih metoda, potrebno je precizno određivanje nagiba krive u tački kratkog spoja iz I-V karakteristike dobijene mjerenjima pri STC.

Metodom 1 dobija se vrijednost paralelne otpornosti koja najviše odstupa od vrijednosti dobijene primjenom HISA metode. Razlog tome je izbor početne vrijednosti prije iterativnog postupka. Naime, za početnu vrijednost uzeta je minimalna vrijednost ili nagib linearnog segmenta između tačke kratkog spoja i MPP. Vrijednost R_p se i u ovom slučaju zbog prirode formule veoma malo mijenja u iterativnom postupku. Preporuka za dalja istraživanja i unapređenja jeste da se odabere vrijednost linearnog segmenta između tačke kratkog spoja i tačke u njenoj blizini. Na taj način će se popraviti vrijednosti ovog parametra prilikom estimacije.

Na osnovu podataka o vrijednosti fotostruje iz Tabele 5.11 može se zaključiti da je ovaj parametar generalno najpreciznije određen parametar kod svih sedam metoda. Precizno određivanje je posljedica činjenice da je vrijednost I_{pv} bliska vrijednosti struje kratkog spoja. Osim struje kratkog spoja ostali parametri u jednačini imaju gotovo zanemarljivu vrijednost.

Struja inverzne polarizacije diode na primjeru ćelije R.T.C. France najbolje je određena Metodom 5. Takođe, ova struja je sa manjim odstupanjima određena metodama 1, 6 i 7. Metode 2, 3 imaju gotovo duplo manje vrijednosti struje I_0 . Vrijednost faktora idealnosti diode kod ove tri metode određuje se prije vrijednosti struje I_0 . Vrijednost a pomenutih metoda je manja u odnosu na HISA metodu, a značajno utiče na I_0 , zbog čega je i vrijednost I_0 manja od željene. Metoda 4 ima manje odstupanje od prethodno navedene dvije metode. Kod ove metode odstupanje nastaje kao posljedica odstupanja vrijednosti R_s i R_p .

Na slici 5.15 predstavljene su I-V karakteristike dobijene primjenom sedam metoda na primjeru R.T.C. France solarne ćelije. Ove karakteristike upoređene su sa eksperimentalnim mjerenjima pri standardnim test uslovima. Na slici 5.15 su odabrane nekolike karakteristične tačke koje su predstavljene na uvećanim prikazima.



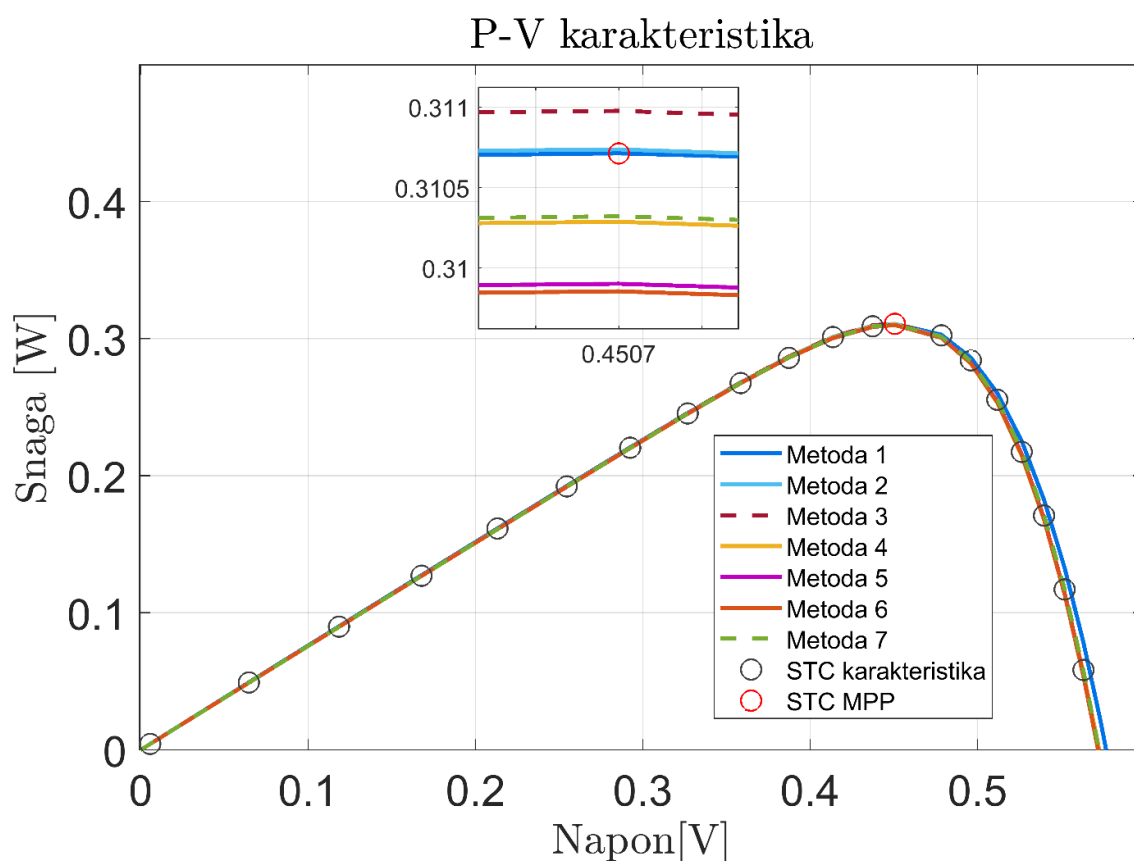
Slika 5.15 Poređenje I-V karakteristika R.T.C. France

Najveći uticaj na prvi dio I-V karakteristike, od tačke kratkog spoja do tačke maksimalne snage, ima vrijednost struje I_{pv} . Takođe, na ovaj dio karakteristike utiče i vrijednost paralelne otpornosti koja je određena kao recipročna negativna vrijednost nagiba krive u tački kratkog spoja. Sa slike 5.15 može se zaključiti da se I-V karakteristike dobijene metodama 2 i 3 najviše poklapaju sa mjerenom I-V karakteristikom. Razlog ovom poklapanju je najpreciznije određena vrijednost I_{pv} kao i preciznost u određivanju vrijednosti R_p . Metodom 1 dobijena je vrijednost struje I_{pv} koja je veća od I_{pv} dobijene primjenom HISA metode. Međutim, zbog manje vrijednosti paralelne otpornosti, tj. povećanog nagiba krive u tački kratkog spoja, struja je za istu vrijednost napona manja u odnosu na mjerenu karakteristiku. Poređenjem podataka iz Tabele 5.11 i sa slike 5.15 može se zaključiti da smanjena vrijednost I_{pv} utiče na prvi dio I-V karakteristike ostalih metoda obaranjem vrijednosti struje po y osi.

Na drugi dio karakteristike od tačke maksimalne snage do tačke praznog hoda najveći uticaj imaju vrijednosti serijske otpornosti, faktora idealnosti diode i struje I_0 . Sa uvećanog prikaza ovog dijela karakteristike može se zaključiti da se I-V karakteristika Metode 7 najbolje poklapa sa

izmjerenom karakteristikom pri STC, a nakon nje I-V karakteristika Metoda 5, što je i potvrđeno vrijednostima uticajnih parametara iz Tabele 5.11. Ostale metode više odstupaju od mjerene karakteristike zbog odstupanja nekog od tri parametra koji utiče na izgled drugog dijela strujno-naponske karakteristike.

Na slici 5.16 predstavljeno je poređenje P-V karakteristika svih sedam metoda sa eksperimentalno dobijenom P-V karakteristikom fotonaponske ćelije R.T.C. France. Na uvećanom prikazu predstavljena je tačka maksimalne snage dobijena mjerenjem. Vidi se da Metoda 1 i Metoda 4 najbolje prate tačku maksimalne snage. Metoda 1, kao što je već naglašeno, pogodna je za potrebe praćenja tačke maksimalne snage.



Slika 5.16 Poređenje P-V karakteristika R.T.C. France

5.2. Estimacija parametara Solarex MSX – 60

Solarex MSX – 60 je literaturno poznati model solarnog modula proizveden od strane kompanije Solarex. MSX – 60 je dio modula Solarex serije MSX panela poznat po svojoj efikasnosti, pouzdanosti i širokoj komercijalnoj primjeni. Pored praktične primjene Solarex MSX – 60 služio je kao moćan alat za istraživanje i edukaciju u brojnim akademskim institucijama, čime je doprinio razvoju tehnologije solarne energije.

Ovi solarni moduli pravljani su od monokristalnih silicijumskih ćelija. Nominalna snaga modula je 60 W, a efikasnost je oko 12 – 14%. U Tabeli 5.12 je dat prikaz osnovnih podataka sa natpisne pločice Solarex MSX – 60 solarnog modula pri standardnim test uslovima ($T = 25^{\circ}\text{C}$, $G=1000 \text{ W/m}^2$).

Tabela 5.12 – Podaci sa natpisne pločice solarnog modula Solarex MSX – 60

Napon praznog hoda – V_{ph} [V]	21.1
Struja kratkog spoja – I_{ks} [A]	3.8
Struja tačke maksimalne snage – I_m [A]	3.5
Napon tačke maksimalne snage – V_m [V]	17.1

5.2.1 Estimacija parametara Solarex MSX – 60 solarnog modula – Metoda 1

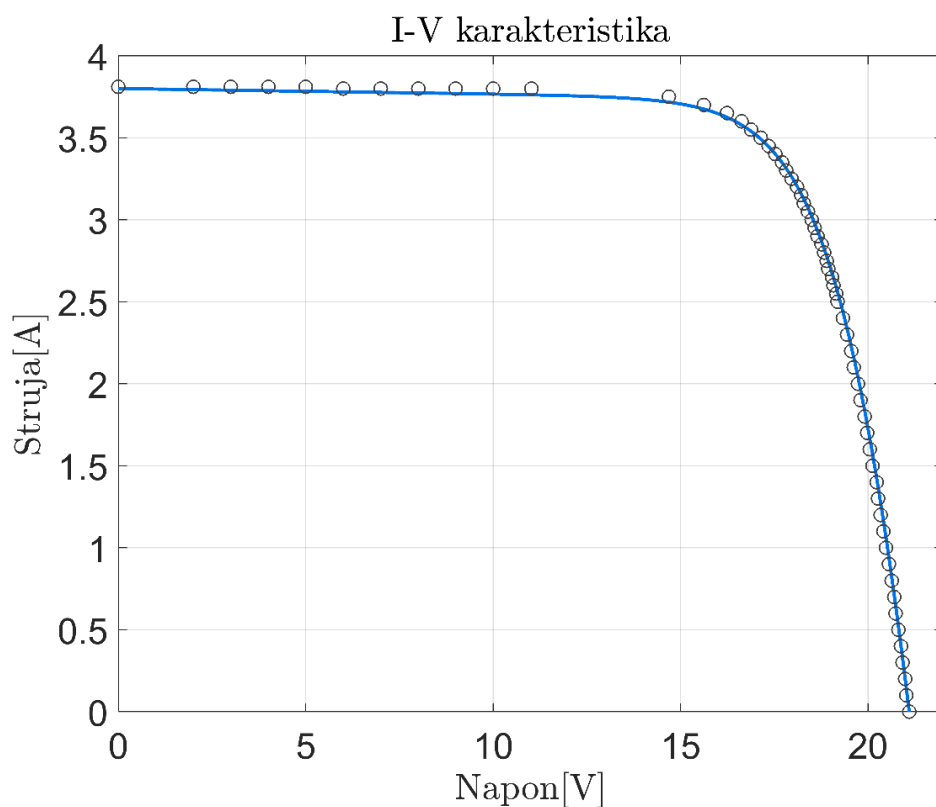
Primjenom algoritma Metode 1 na primjeru Solarex MSX – 60 solarnog modula dobijene su vrijednosti nepoznatih parametara prikazane u Tabeli 5.13. Kao i za potrebe estimacije parametara solarne ćelije R.T.C. France, početna vrijednost faktora idealnosti diode postavljena je kao $a = 1$, a vrijednost serijske otpornosti $R_s = 0.01$. Prilikom izvršenja iterativnog postupka vrijednost a je inkrementirana korakom 0.1, dok je vrijednost R_s inkrementirana korakom 0.0001.

Tabela 5.13 – Rezultati estimacije parametara Solarex MSX – 60 Metodom 1

Parametri	a	R_s [Ω]	R_p [Ω]	I_{pv} [A]	I_0 [μA]
Metoda 1	1.3	0.2047	299.0699	3.8026	$8.9252 \cdot 10^{-2}$

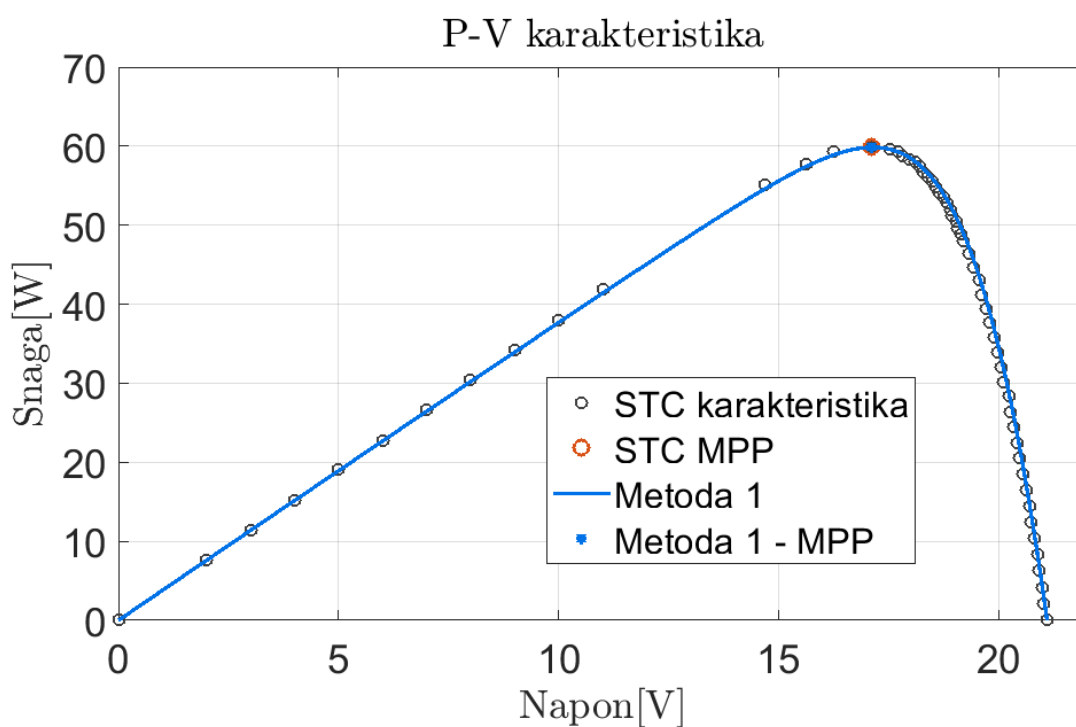
Na osnovu (4.44) proračunata je srednja kvadratna greška između mjerene I-V karakteristike i I-V karakteristike dobijene primjenom Metode 1. Ova vrijednost iznosi $RMSE = 0.0572897153267389$.

Na slici 5.17 predstavljena je I-V karakteristika Metode 1. Sa slike 5.17 se može zaključiti da dio karakteristike od tačke kratkog spoja do tačke maksimalne snage odstupa od eksperimentalno dobijene I-V karakteristike. Najveći uticaj na ovaj dio I-V karakteristike ima vrijednost struje I_{pv} kao i vrijednost serijske otpornosti R_s . Manja vrijednost I_{pv} daje manju vrijednost struje na izlazu panela, dok veća vrijednost serijske otpornosti ograničava protok izlazne struje.



Slika 5.17 I-V karakteristika Solarex MSX – 60 dobijena primjenom Metode 1

Na slici 5.18 predstavljene su P-V karakteristika dobijena primjenom Metode 1 i realna P-V karakteristika dobijena eksperimentima pri STC. Sa slike 5.18 se može zaključiti da se tačka maksimalne snage dobijena primjenom Metode 1 poklapa sa realnom tačkom maksimalne snage.



Slika 5.18 P-V karakteristika Solarex MSX – 60 dobijena primjenom Metode 1

5.2.2 Estimacija parametara Solarex MSX – 60 solarnog modula – Metoda 2

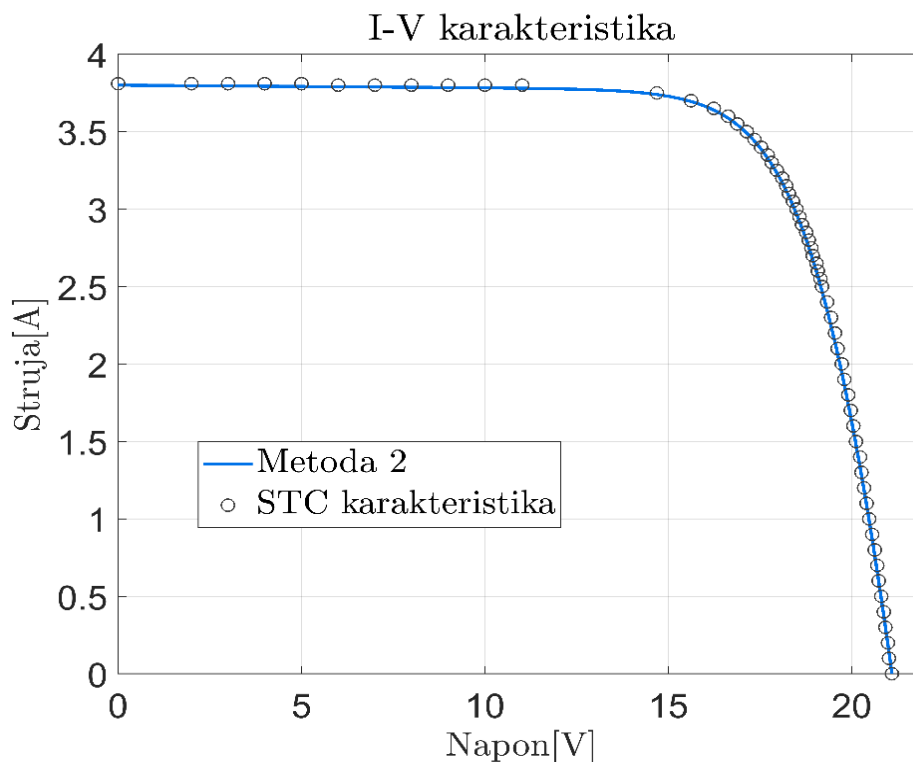
Za potrebe estimacije parametara Metodom 2 neophodno je odrediti nagib I-V karakteristike u tački kratkog spoja i tački praznog hoda. Negativna recipročna vrijednost nagiba krive u tački kratkog spoja daje vrijednost R_{p0} , dok negativna recipročna vrijednost nagiba krive u tački praznog hoda daje vrijednost R_{s0} . Na osnovu karakterističnih tačaka I-V karakteristike određenih eksperimentima pri STC početne vrijednosti serijske i paralelne otpornosti za solarni moduo Solarex MSX – 60 su $R_{s0} = 0.58 \Omega$, $R_{p0} = 600 \Omega$.

Tabela 5.14 – Rezultati estimacije parametara Solarex MSX – 60 Metodom 2

Parametri	a	$R_s [\Omega]$	$R_p [\Omega]$	$I_{pv} [A]$	$I_0 [\mu A]$
Metoda 2	1.2530	0.2722	600	3.8017	$4.6644 \cdot 10^{-2}$

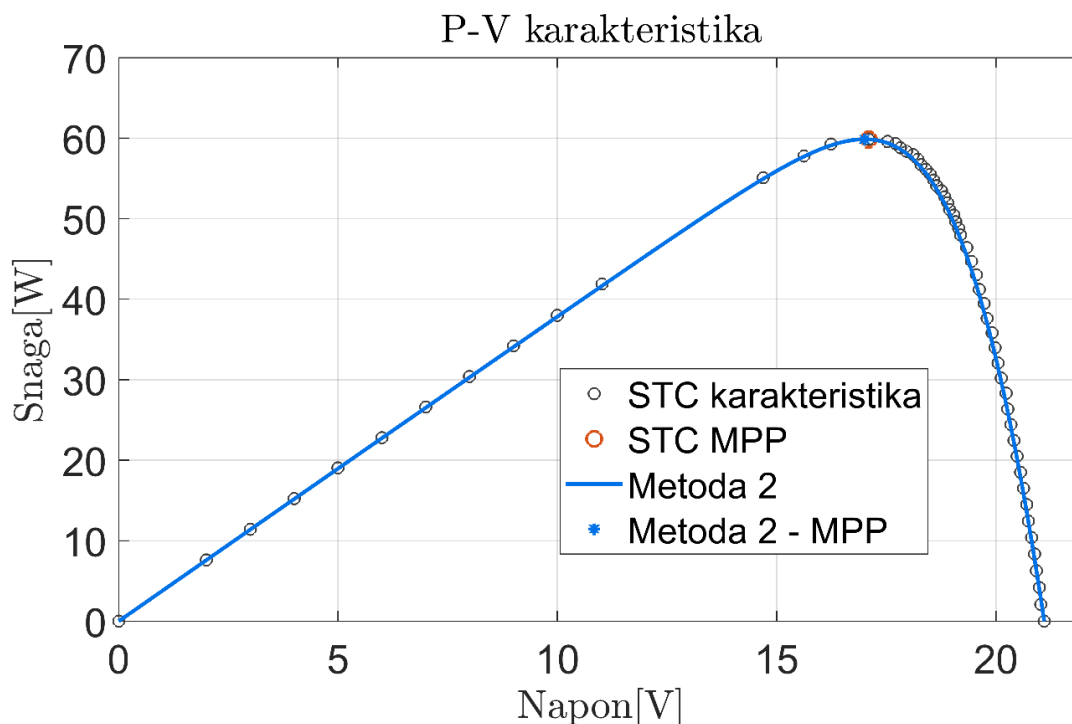
Dobijeni nepoznati parametri kao i vrijednosti napona od 0 do V_{ph} uvršćeni su u (3.5) kako bi se dobile vrijednosti izlaznih struja za potrebe kreiranja I-V i P-V karakteristike kao i potrebe određivanja RMSE. Vrijednost srednje kvadratne greške između I-V karakteristike dobijene Metodom 2 i mjerene I-V karakteristike solarnog modula Solarex MSX – 60 je $RMSE = 0.046821135892726$.

Na slici 5.19 prikazana je I-V karakteristika modula Solarex MSX – 60 dobijena primjenom Metode 2. Može se uočiti da se ova karakteristika dobro poklapa sa eksperimentalno određenom karakteristikom pri STC, što potvrđuje i prethodno proračunata vrijednost RMSE.



Slika 5.19 I-V karakteristika Solarex MSX – 60 dobijena primjenom Metode 2

Na slici 5.20 prikazana je P-V karakteristika dobijenih Metodom 2 i pri STC. Odstupanje proračunate tačke maksimalne snage od stvarne tačke maksimalne snage je veoma malo.



Slika 5.20 P-V karakteristika Solarix MSX – 60 dobijena primjenom Metode 2

5.2.3 Estimacija parametara Solarix MSX – 60 solarnog modula – Metoda 3

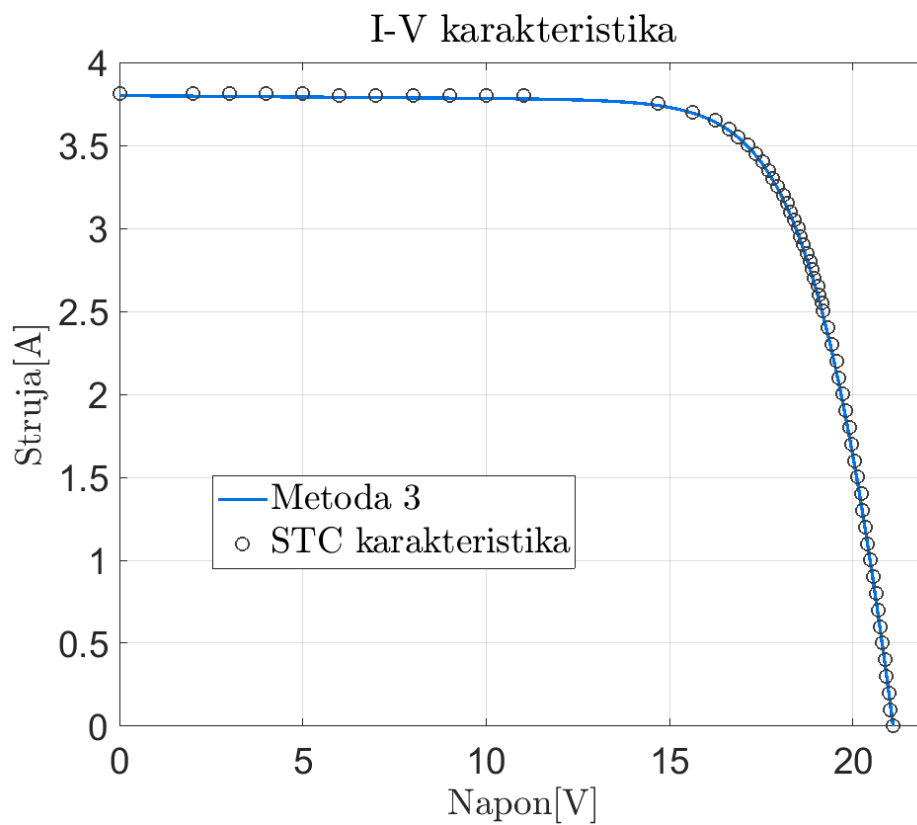
U Tabeli 5.15 predstavljeni su rezultati estimacije parametara dobijeni primjenom Metode 3 na primjeru Solarix MSX – 60 solarnog modula. Za R_{s0} i R_{p0} uzete su iste vrijednosti kao u prethodnoj metodi.

Tabela 5.15 – Rezultati estimacije parametara Solarix MSX – 60 Metodom 3

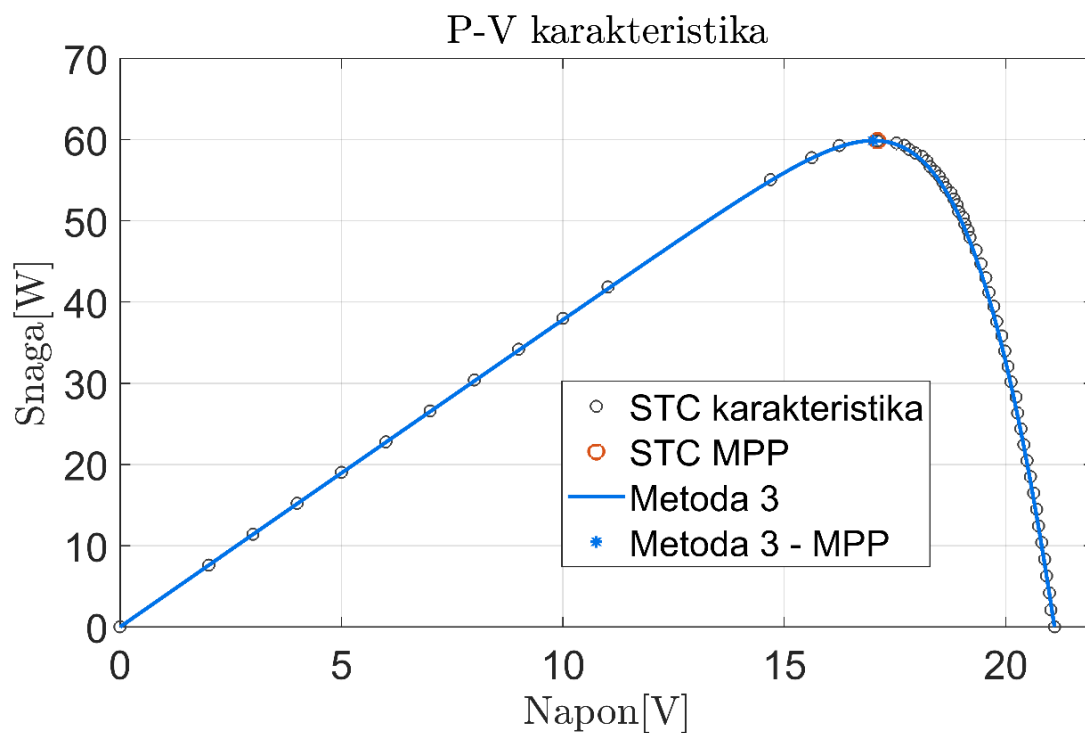
Parametri	A	$R_s [\Omega]$	$R_p [\Omega]$	$I_{pv} [A]$	$I_0 [\mu A]$
Metoda 3	1.248	0.273	599.726	3.801	$4.335 \cdot 10^{-2}$

Vrijednost srednje kvadratne greške između I-V karakteristike Metode 3 i mjerene karakteristike je $RMSE = 0.046250150623632$. Poređenjem rezultata dobijenih primjenom Metode 2 i Metode 3 može se zaključiti da su rezultati komplementarni. Kao što je prethodno naglašeno, prilikom prikaza rezultata dobijenih primjenom ove dvije metode na primjeru R.T.C. France, preporuka je koristiti Metodu 2. Naime, Metodom 3 se dobijaju gotovo identične vrijednosti nepoznatih parametara kao i Metodom 2. Međutim, Metoda 2 u sebi ne sadrži iterativni postupak zbog čega je vrijeme izvršenja algoritma mnogo kraće.

Na slici 5.21 prikazana je I-V karakteristika modula Solarix MSX – 60, a na slici 5.22 prikazana je P-V karakteristika ovog modula dobijena primjenom Metode 3.



Slika 5.21 I-V karakteristika Solarex MSX – 60 dobijena primjenom Metode 3



Slika 5.22 P-V karakteristika Solarex MSX – 60 dobijena primjenom Metode 3

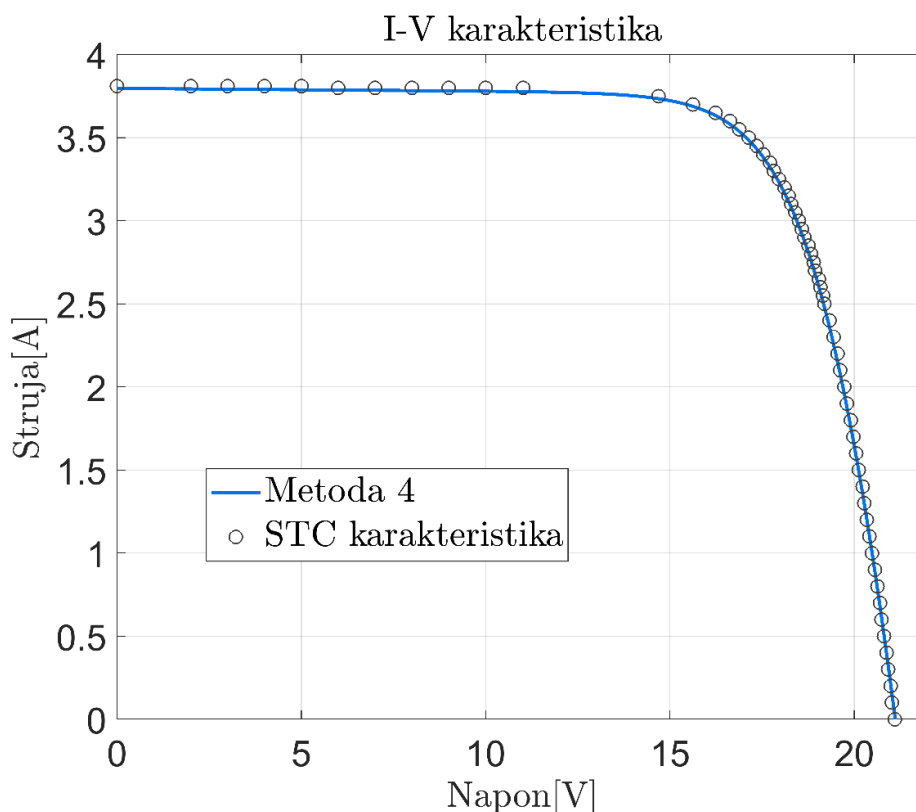
5.2.4 Estimacija parametara Solarex MSX – 60 solarnog modula – Metoda 4

Vrijednosti nepoznatih parametara dobijenih primjenom Metode 4 na primjeru modula Solarex MSX - 60 predstavljene su u Tabeli 5.16. Ova metoda zasniva se na korišćenju iterativnog postupka koji se sastoji od dvije ugniježdene petlje. Ovim postupkom se teži preciznom određivanju faktora idealnosti diode i serijske otpornosti. Osim tabličnih podataka dobijenih od proizvođača, kao ulazni podaci uzimaju se iste vrijednosti R_{s0} i R_{p0} kao u dvije prethodne metode. Početna vrijednost serijske otpornosti postavlja se na 0, a početna vrijednost faktora idealnosti diode je $a=1$.

Tabela 5.16 – Rezultati estimacije parametara Solarex MSX - 60 Metodom 4

Parametri	a	$R_s [\Omega]$	$R_p [\Omega]$	$I_{pv} [A]$	$I_0 [\mu A]$
Metoda 4	1.279	0.262	599	3.7984	$6.65 \cdot 10^{-2}$

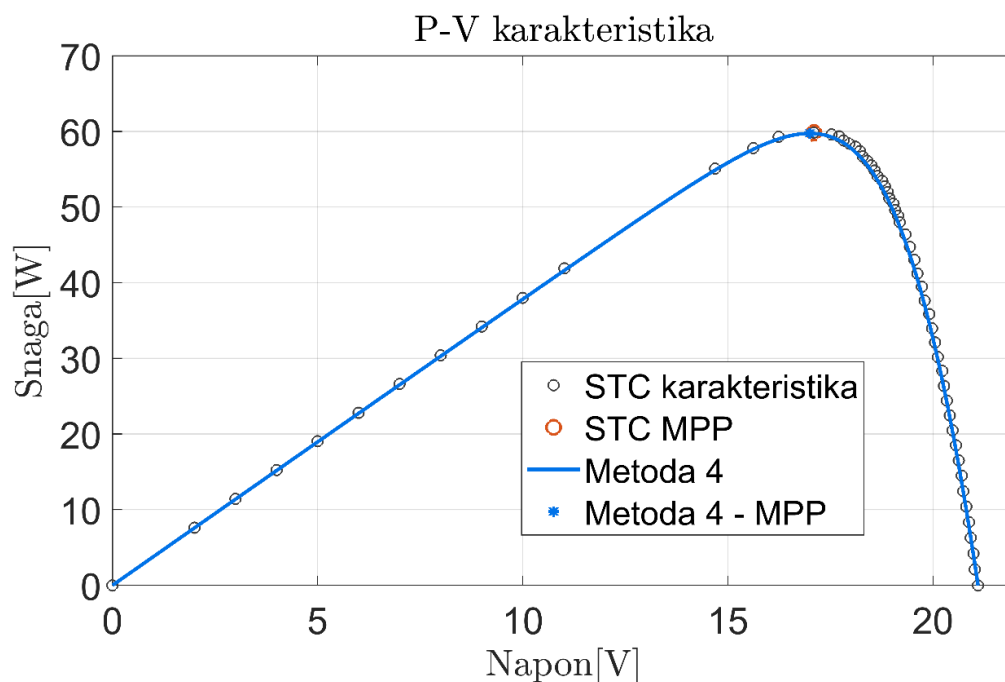
Srednja kvadratna greška između I-V karakteristike dobijene primjenom Metode 4 i I-V karakteristike pri standardnim test uslovima iznosi $RMSE = 0.040597651100263$. Na osnovu slike 5.23 kojom je predstavljena I-V karakteristika i na osnovu vrijednosti RMSE može se zaključiti da ova metoda dobro prati izgled I-V karakteristike dobijene eksperimentima pri standardnim test uslovima.



Slika 5.23 I-V karakteristika Solarex MSX – 60 dobijena primjenom Metode 4

Na slici 5.24 prikazana je P-V karakteristika. Sa ove slike vidi se da proračunata tačka maksimalne snage vrlo malo odstupa od mjerene vrijednosti.

Zbog postojanja dva iterativna postupka, dvije ugniježdene petlje, vrijeme izvršenja algoritma je duže nego kod prethodno opisanih metoda i iznosi više od 1 min u konkretnom slučaju.



Slika 5.24 P-V karakteristika Solarix MSX – 60 dobijena primjenom Metode 4

5.2.5 Estimacija parametara Solarix MSX – 60 solarnog modula– Metoda 5

Metoda 5 je nastala kombinacijom analitičkih relacija i numeričkog iterativnog postupka, što je objašnjeno u teorijskom dijelu ove metode. Zbog primjene numeričkog iterativnog postupka, ova metoda za različite vrijednosti ulaznih parametara daje različite izlazne rezultate. Naime, može konvergirati ka željenim rješenjima, može konvergirati ka rješenjima koja odstupaju od željenog, a u nekim situacijama može se dogoditi da uopšte ne konvergira.

Princip testiranja Metode 5 na primjeru solarnog modula je isti kao kod testiranja na primjeru R.T.C. France. Dakle, za različite početne vrijednosti paralelne i serijske otpornosti vrši se proračun nepoznatih parametara. U Tabeli 5.17 predstavljeni su rezultati estimacije nepoznatih parametara za različite početne vrijednosti serijske otpornosti R_{s0} i paralelne otpornosti R_{p0} kao i vrijednost RMSE za svaki od primjera.

Na osnovu Tabele 5.17 može se zaključiti da rezultati Metode 5 prilično variraju u zavisnosti od izbora početnih parametara, mnogo više u odnosu na rezultate dobijene primjenom iste metode za solarnu ćeliju R.T.C. France. Razlog ovih varijacija je primjena numeričkog

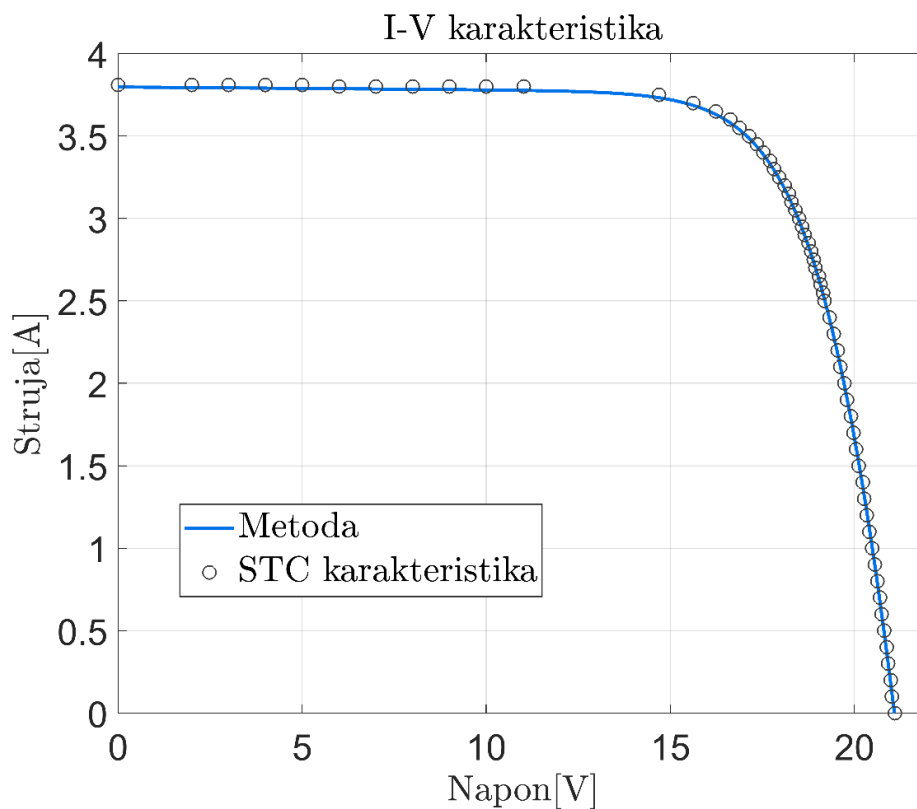
postupka na analitički izvedene relacije koje su isključivo zavisne od tabličnih podataka. Tablični podaci za solarni moduo podrazumijevaju veće vrijednosti struja i napona tri karakteristične tačke u odnosu na tablične podatke vezane za solarnu ćeliju. Ovo utiče na vrijednost serijske otpornosti i njenu promjenu tokom iterativnog postupka. Dakle, serijska otpornost, za posmatrani opseg početnih vrijednosti R_{p0} i R_{s0} varira u opsegu od ± 0.05 .

Konačna vrijednost paralelne otpornosti ima neznatnu promjenu u odnosu na pretpostavljenu početnu vrijednost. Dakle, može se izvesti isti zaključak kao za R.T.C. France, a to je da za početnu vrijednost paralelne otpornosti treba birati vrijednost blisku očekivanoj. Vrijednost faktora idealnosti diode smanjuje se povećanjem početne vrijednosti serijske otpornosti.

Za potrebe dalje analize ove metode, kao i komparativne analize u nastavku rada, usvojena je pretpostavka da su početne vrijednosti serijske i paralelne otpornosti: $R_{s0} = 0.03\Omega$ i $R_{p0} = 600\Omega$. Pri ovim početnim vrijednostima paralelne i serijske otpornosti dobija se najmanja vrijednost srednje kvadratne greške koja iznosi $RMSE = 0.025284412595116$.

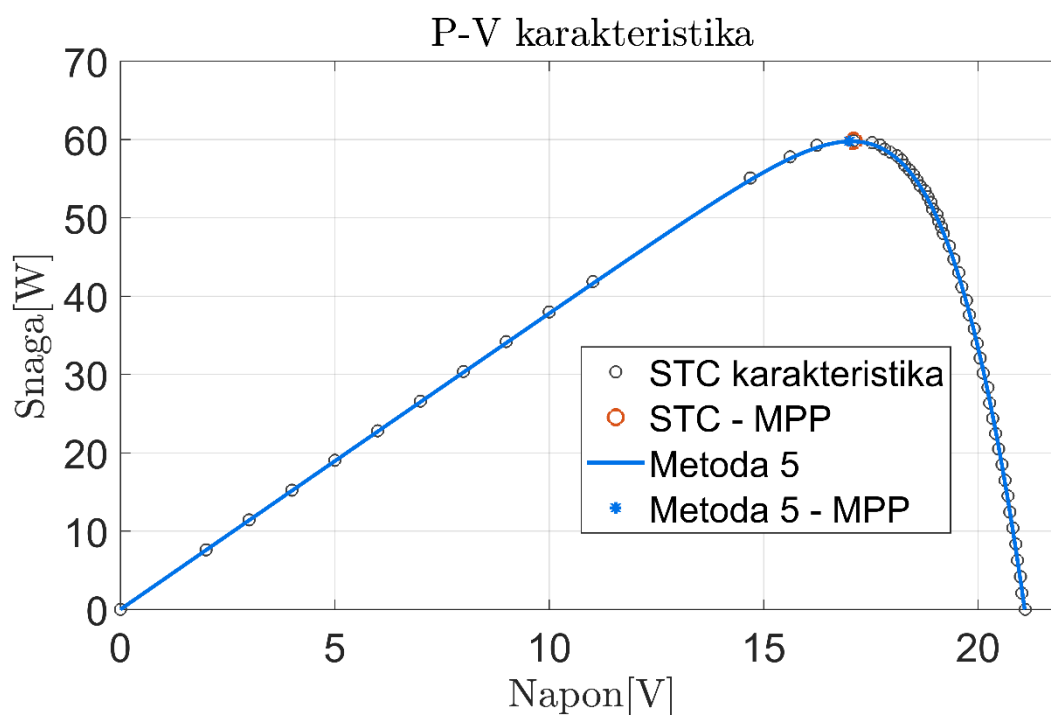
Tabela 5.17 – Estimacija vrijednosti nepoznatih parametara R_s , R_p i a solarnog modula Solarex MSX - 60 Metodom 5 za različite početne vrijednosti R_{p0} i R_{s0}

Metoda 5						
$R_{s0} = 0.2$						
R_{p0}	$R_s [\Omega]$	$R_p [\Omega]$	a	$I_{pv} [A]$	$I_0 [\mu A]$	$RMSE$
540	0.1882	540.5283	1.3683	3.7987	$2.1849 \cdot 10^{-1}$	0.035902868234908
560	0.1845	560.5194	1.3731	3.7987	$2.3145 \cdot 10^{-1}$	0.036871101089962
580	0.1845	580.5106	1.3775	3.7988	$2.4412 \cdot 10^{-1}$	0.037819754668566
600	0.1882	600.5019	1.3731	3.7988	$2.5648 \cdot 10^{-1}$	
$R_{s0} = 0.3$						
R_{p0}	R_s	R_p	a	$I_{pv} [A]$	$I_0 [\mu A]$	$RMSE$
540	540.7128	49.7721	1.3213	3.7985	$1.1363 \cdot 10^{-1}$	0.027218556826586
560	0.2224	560.7065	1.3296	3.7985	$1.2070 \cdot 10^{-1}$	0.026448862952511
580	0.2206	580.7005	1.3256	3.7986	$1.2763 \cdot 10^{-1}$	0.025809246170301
600	0.219	600.6945	1.3296	3.7986	$1.3441 \cdot 10^{-1}$	0.025284412595116
$R_{s0} = 0.4$						
R_{p0}	R_s	R_p	a	$I_{pv} [A]$	$I_0 [\mu A]$	$RMSE$
540	0.2637	540.8940	1.2602	3.7981	$5.2245 \cdot 10^{-2}$	0.054607323471598
560	0.2619	560.8892	1.2646	3.7982	$5.5677 \cdot 10^{-2}$	0.053153896891368
580	0.2602	580.8846	1.2688	3.7983	$5.9061 \cdot 10^{-2}$	0.051810145857677
600	0.2586	600.8803	1.2762	3.7984	$6.2364 \cdot 10^{-2}$	0.050564861826969
$R_{s0} = 0.5$						
R_{p0}	R_s	R_p	a	$I_{pv} [A]$	$I_0 [\mu A]$	$RMSE$
540	0.3074	541.0760	1.2085	3.7979	$2.0264 \cdot 10^{-2}$	0.094041515881334
560	0.3045	561.0760	1.2018	3.7979	$2.1682 \cdot 10^{-2}$	0.092565141620105
580	0.304	581.0722	1.2058	3.7880	$2.3082 \cdot 10^{-2}$	0.091193621439148
600	0.3025	601.068	1.2095	3.7981	$2.4460 \cdot 10^{-2}$	0.089916303155786



Slika 5.25 I-V karakteristika Solarex MSX – 60 dobijena primjenom Metode 5

Na slici 5.25 predstavljena je I-V karakteristika dobijena primjenom Metode 5 na primjeru Solarex MSX – 60. Sa slike 5.25 se vidi da je odstupanje I-V karakteristike dobijene Metodom 5 u odnosu na mjerenu I-V karakteristiku veoma malo, što potvrđuje i vrijednost RMSE. Na slici 5.26 prikazan je izgled P-V karakteristike Metode 5.



Slika 5.26 P-V karakteristika Solarex MSX – 60 dobijena primjenom Metode 5

5.2.6 Estimacija parametara Solarex MSX – 60 solarnog modula – Metoda 6

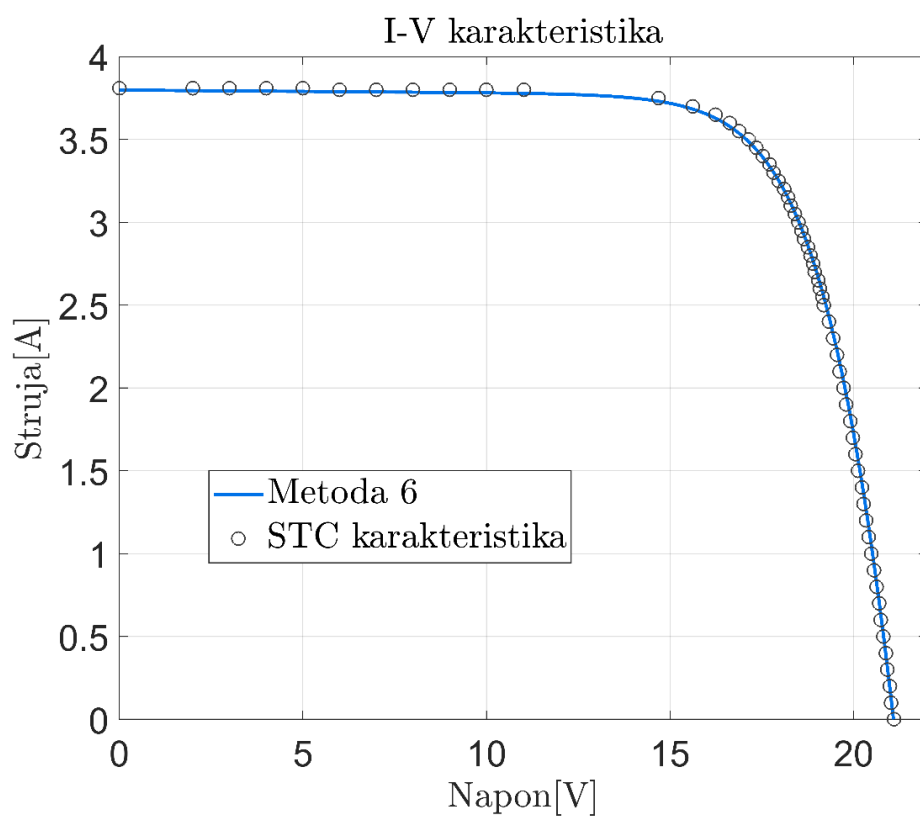
Za potrebe estimacije parametara primjenom Metode 6 prevashodno je potrebno postaviti odgovarajuće početne vrijednosti paralelne i serijske otpornosti. Numerički postupak Metode 6 kojim se određuje vrijednost a , R_p i R_s je testiran za veći broj početnih vrijednosti R_{p0} i R_{s0} . Rezultati ovog postupka predstavljeni su u Tabeli 5.18.

Tabela 5.18 – Estimacija vrijednosti nepoznatih parametara solarnog modula Solarex MSX – 60 R_s , R_p i a Metodom 6 za različite početne vrijednosti R_{p0} i R_{s0}

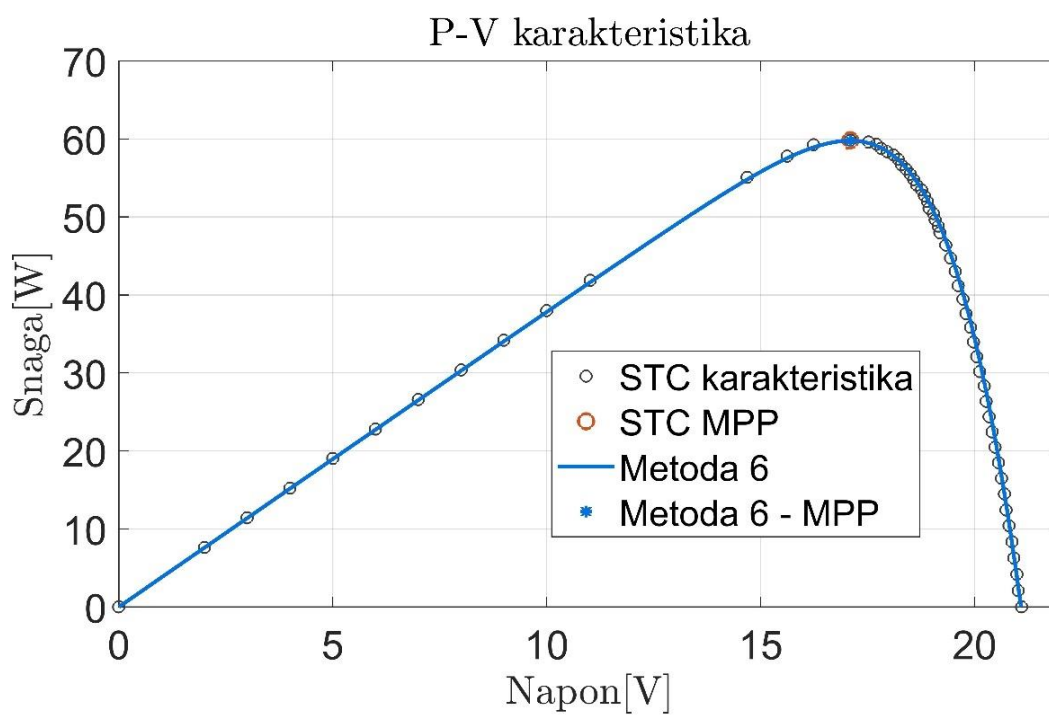
Metoda 6					
$50 \leq R_{p0} < \infty$, $0.01 \leq R_{s0} \leq 0.7$					
R_s [Ω]	R_p [Ω]	a	I_{pv} [A]	I_0 [μ A]	RMSE
0.17	639.6941	1.4	3.8	$3.2801 \cdot 10^{-1}$	0.062672295163687

Na osnovu rezultata prikazanih u Tabeli 5.18 može se zaključiti da numerički postupak Metode 6 konvergira za veliki opseg vrijednosti paralelne otpornosti ($50 \leq R_{p0} < \infty$) i za vrijednosti serijske otpornosti u opsegu $0.01 \leq R_{s0} \leq 0.7$. Ova metoda kao i na primjeru R.T.C. France konvergira ka istim vrijednostima bez obzira na početne vrijednosti R_{p0} i R_{s0} . Srednja kvadratna greška između I-V karakteristike Metode 6 i mjerene I-V karakteristike je $RMSE = 0.062672295163687$.

Na slici 5.27 dat je prikaz I-V karakteristike dobijene primjenom Metode 6, a na slici 5.28 predstavljena je P-V karakteristika dobijena primjenom ove metode. Sa slika 5.27 i 5.28 može se zaključiti da bez obzira na odstupanja određena srednjom kvadratnom greškom, I-V i P-V karakteristike ne odstupaju značajno od karakteristike dobijene mjerenjima pri STC. Najveće odstupanje se javlja na prvom dijelu karakteristike, od tačke kratkog spoja do tačke maksimalne snage. Ovo odstupanje nastaje kao posljedica odstupanja vrijednosti serijske otpornosti koja pomijera karakteristiku po y osi. Takođe, sa P-V karakteristike moguće je zaključiti da je Metoda 6 pogodna za praćenje tačke maksimalne snage.



Slika 5.27 I-V karakteristika Solarex MSX – 60 dobijena primjenom Metode 6



Slika 5.28 P-V karakteristika Solarex MSX – 60 dobijena primjenom Metode 6

5.2.7 Estimacija parametara Solarex MSX – 60 solarnog modula – Metoda 7

Rezultati estimacije parametara solarnog modula Solarex MSX – 60 Metodom 7 prikazani su u Tabeli 5.19. Prilikom izvršenja algoritma korišćene su tačke sa I-V karakteristike dobijene od proizvođača, eksperimentalno pri STC. Vrijednost faktora idealnosti diode se mijenja sa korakom 0.01 uz uslov minimizacije RMSE. Dakle, ovaj parametar se ne opisuje analitičkom relacijom, zbog čega je dovoljno kreirati sistem od četiri jednačine.

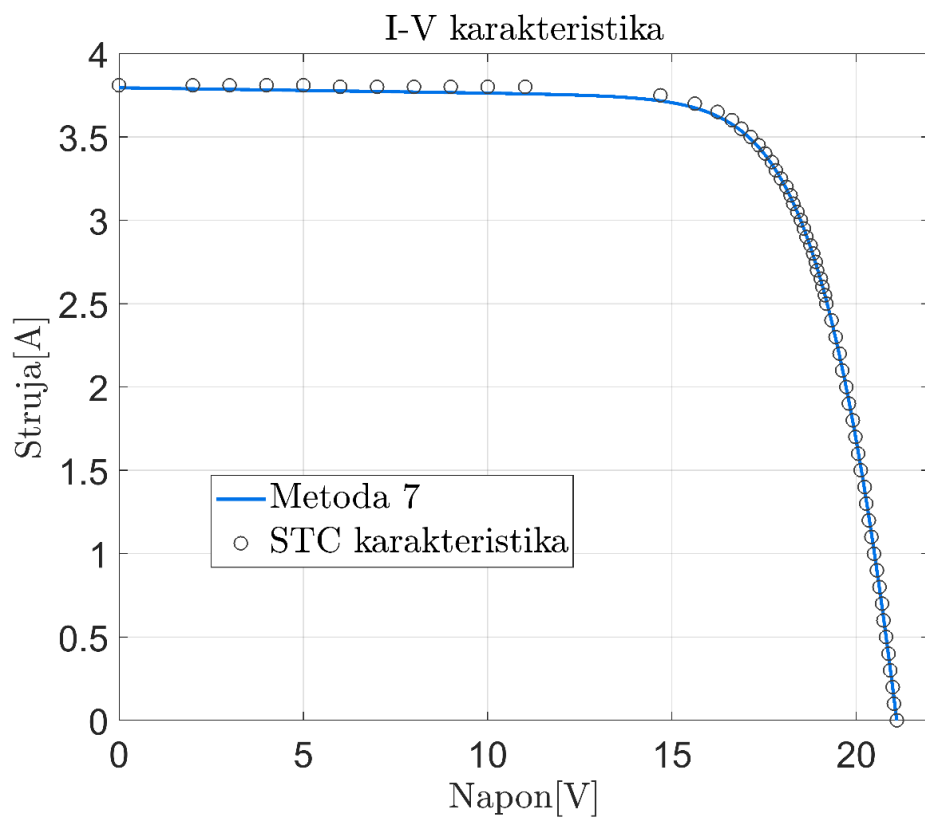
Tabela 5.19 – Rezultati estimacije parametara modula Solarex MSX - 60 Metodom 7

Parametri	a	$R_s [\Omega]$	$R_p [\Omega]$	$I_{pv} [A]$	$I_0 [\mu A]$
Metoda 1	1.25	0.2439	376.762	3.7970	$4.43 \cdot 10^{-2}$

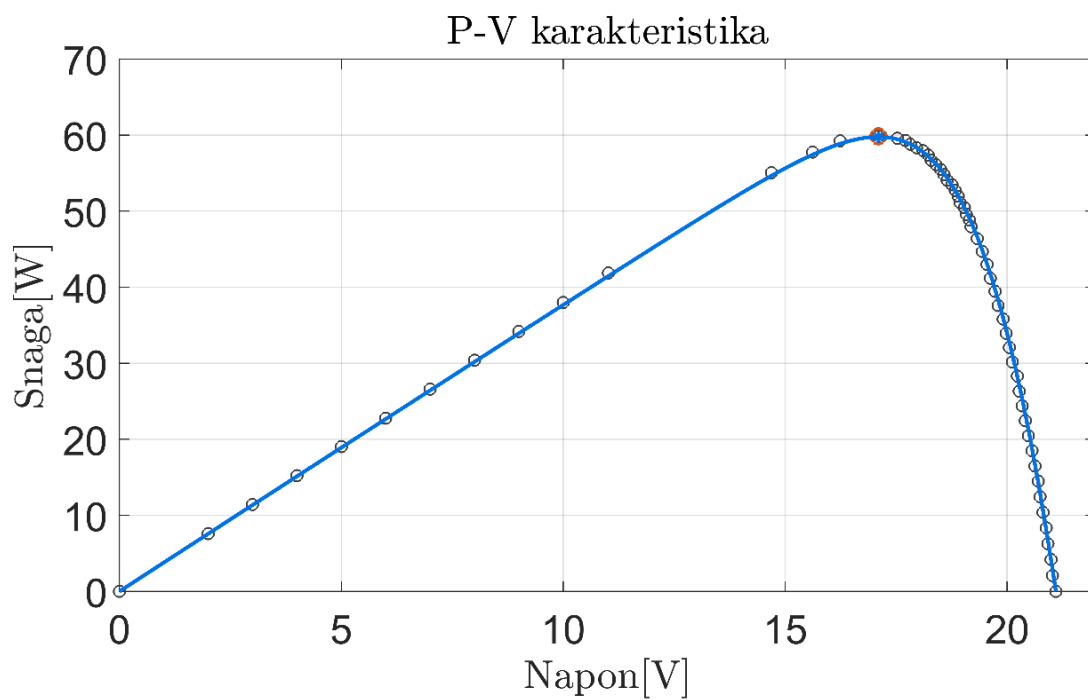
Na slici 5.29 predstavljena je I-V karakteristika. Dio karakteristike od tačke KS do tačke maksimalne snage odstupa od eksperimentalno dobijene I-V karakteristike. Ovo se može povezati sa odstupanjem I_{pv} od precizne vrijednosti.

Primjenom Metode 7 na primjeru solarnog modula Solarex MSX – 60 dobija se srednja kvadratna greška vrijednosti $RMSE = 0.019317416523302$. Jasno je da je ova vrijednost zadovoljavajuća, čak mnogo bolja u odnosu na druge metode. Međutim, kao što je rečeno, prvi dio I-V karakteristike, od tačke KS do tačke MPP, odstupa od eksperimentalno dobijene karakteristike. Razlog tome je mali broj tačaka dobijenih mjerenjem za prvi dio karakteristike. Dakle, može se konstatovati da bi rezultati bili mnogo precizniji kada bi postojao veći broj mjerenih tačaka zato što se ova metoda upravo zasniva na poređenju mjerene i dobijene strujno naponske karakteristike.

Na slici 5.30 upoređene su P-V karakteristika dobijena primjenom Metode 7 i P-V karakteristika mjerena pri STC. Sa slike 5.30 može se uočiti da je odstupanje proračunate tačke maksimalne snage zanemarljivo.



Slika 5.29 I-V karakteristika Solarex MSX – 60 dobijena primjenom Metode 7



Slika 5.30 P-V karakteristika Solarex MSX – 60 dobijena primjenom Metode 7

5.2.8 Usporedna analiza estimacije parametara solarnog modula Solarex MSX - 60

U Tabeli 5.20 su prikazani rezultati estimacije nepoznatih parametara na primjeru solarnog modula Solarex MSX – 60, dobijeni primjenom sedam prethodno analiziranih metoda. Za svih sedam metoda u Tabeli 5.20 prikazana je i srednja kvadratna greška između mjerenih i proračunatih vrijednosti tačaka I-V karakteristike. Usporedna analiza na primjeru ovog solarnog modula koja je prikazana u nastavku vrši se na osnovu vrijednosti RMSE, kao i na osnovu izgleda I-V i P-V karakteristike.

Tabela 5.20 – Rezultati estimacije parametara svih sedam metoda na primjeru solarnog modula Solarex MSX – 60

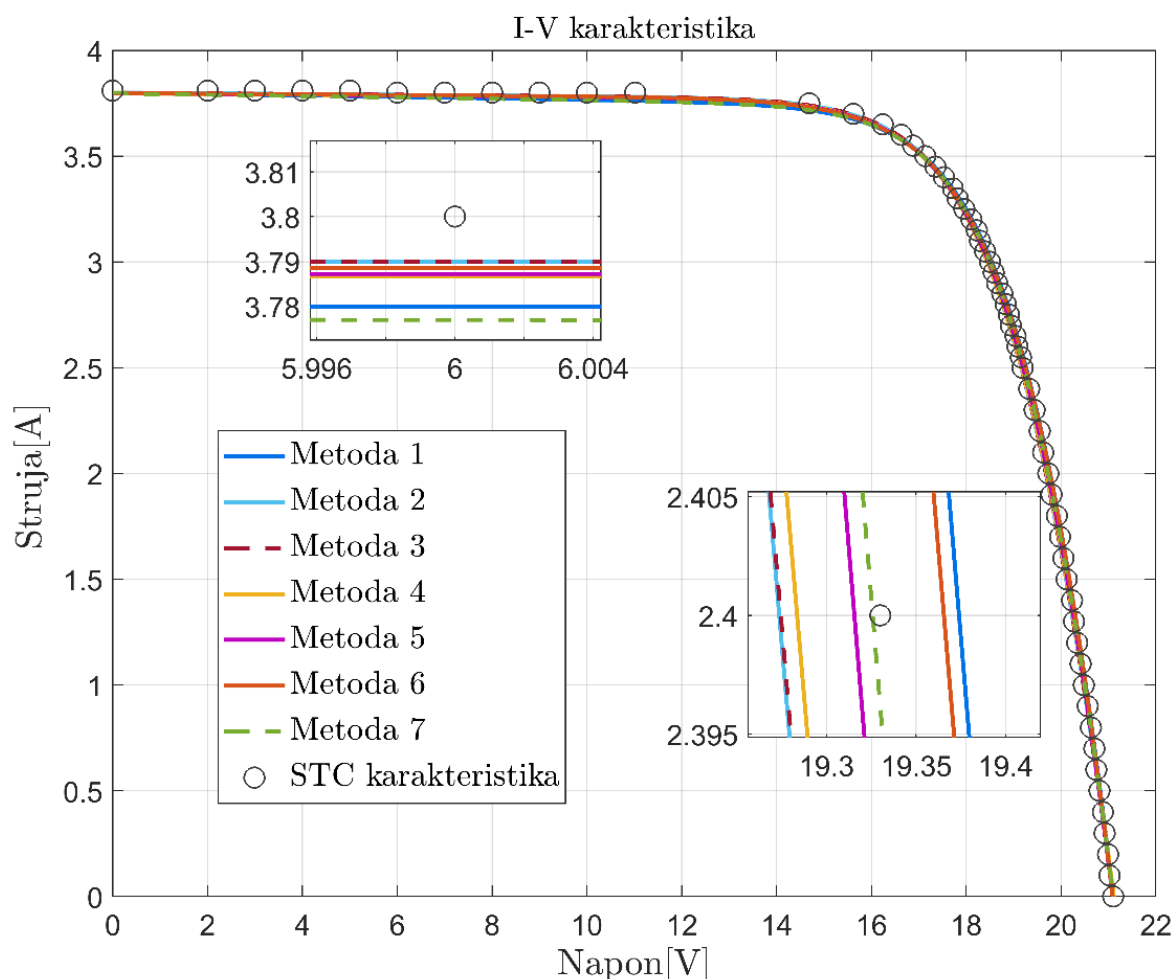
Metoda/ parametri	a	R_s [Ω]	R_p [Ω]	I_{pv} [A]	I_0 [μ A]	RMSE
Metoda 1	1.3	0.2047	299.0699	3.8026	$8.9252 \cdot 10^{-2}$	0.057289715326738
Metoda 2	1.2530	0.2722	600	3.8017	$4.6644 \cdot 10^{-2}$	0.046821135892726
Metoda 3	1.248	0.273	599.726	3.801	$4.335 \cdot 10^{-2}$	0.046250150623632
Metoda 4	1.279	0.262	599	3.7984	$6.65 \cdot 10^{-2}$	0.040597651100263
Metoda 5	1.3296	0.219	600.6945	3.7986	$1.3441 \cdot 10^{-1}$	0.025284412595116
Metoda 6	1.4	0.17	639.6941	3.8	$3.2801 \cdot 10^{-1}$	0.062672295163687
Metoda 7	1.25	0.2439	376.762	3.7970	$4.43 \cdot 10^{-2}$	0.019317416523302

Iz Tabele 5.20 može se zaključiti da se najbolje poklapanje sa mjerenom I-V karakteristikom dobija primjenom Metode 7. Ovakav rezultat je očekivan. Naime, Metoda 7 bazira se na određivanju nepoznatih parametara uz uslov da je srednja kvadratna greška između mjerene i proračunate karakteristike minimalna.

Analizom dobijenih rezultata može se uočiti da sve metode daju gotovo iste vrijednosti struje I_{pv} i da se ova vrijednost definitivno kreće oko 3.8. Ova konstatacija je potpuno opravdana uzimanjem aproksimacije da je struja I_{pv} približno jednaka struji kratkog spoja koja iznosi $I_{ks} = 3.8$. Pored I_{pv} metode su pokazale dobro podudaranje vrijednosti serijske otpornosti i faktora idealnosti diode. Najveće odstupanje ima Metoda 6 koja ujedno ima i najveću srednju kvadratnu grešku. Metodama 2, 3, 4, 5 i 6 dobijena je vrijednost paralelne otpornosti koja je bliska 600 Ω , preostale dvije metode daju značajno manju vrijednost paralelne otpornosti.

Struja inverzne polarizacije diode ima veći spektar vrijednosti u odnosu na ostala četiri parametra. Ovo je parametar koji se određuje na osnovu prethodno određenih vrijednosti ostalih parametara. Iz Tabele 5.20 može se uočiti da su vrijednosti ostalih parametara različite u zavisnosti od primijenjene metode. Zbog toga se i vrijednost I_0 značajno razlikuje.

Na slici 5.31 predstavljene su I-V karakteristike dobijene primjenom sedam metoda na primjeru solarnog modula Solarex MSX – 60. Ove karakteristike upoređene su sa eksperimentalnim mjerenjima pri standardnim test uslovima.

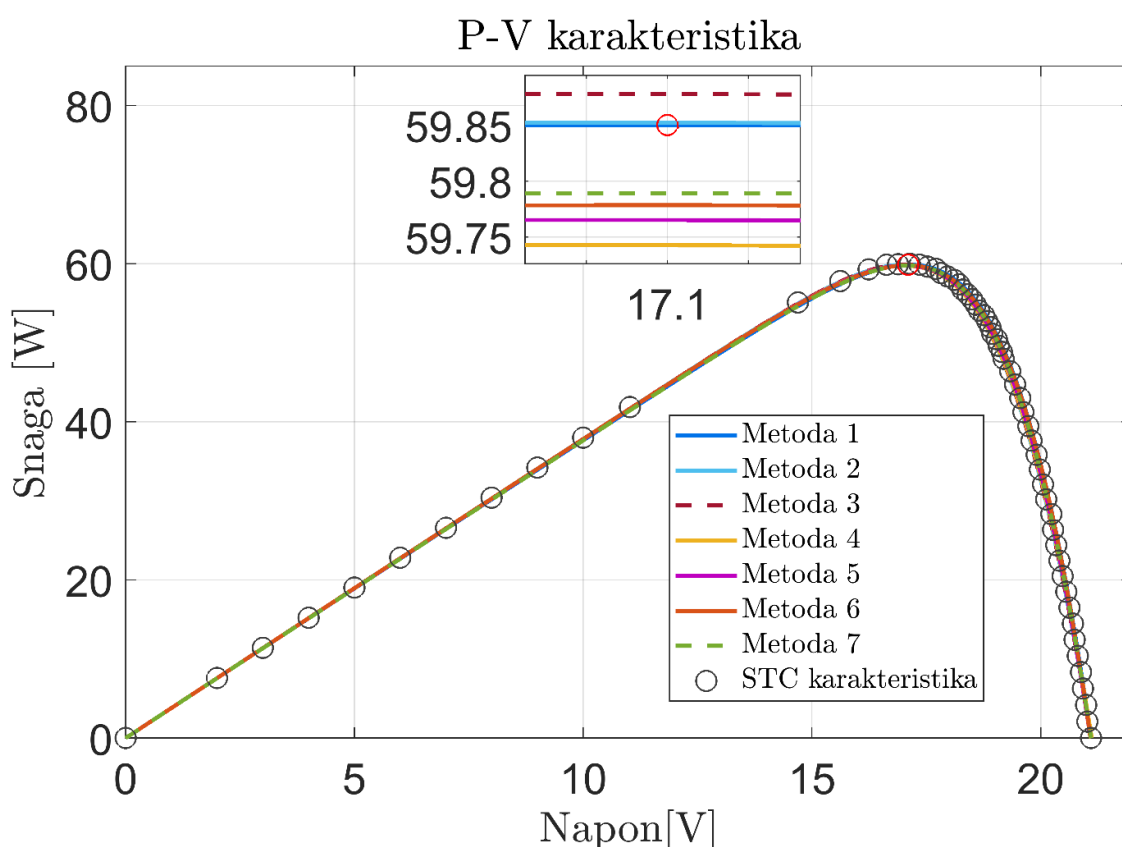


Slika 5.31 Poređenje I-V karakteristika Solarex MSX – 60

Na uvećanim prikazima na slici 5.31 prikazana su odstupanja I-V karakteristika dobijenih primjenom sedam analiziranih metoda i mjerene I-V karakteristike na prvom dijelu (od tačke kratkog spoja do tačke maksimalne snage) i na drugom dijelu (od tačke maksimalne snage do tačke praznog hoda). Kao što je naglašeno prilikom analize sedam metoda na primjeru R.T.C. France solarne ćelije, najveći uticaj na prvi dio karakteristike ima struja I_{pv} . Pored ove struje, u mnogo manjem obimu utiče i vrijednost paralelne otpornosti. Kada je vrijednost R_p niska, dolazi do povećanja struje curenja, što smanjuje vrijednost izlazne struje. Na drugi dio karakteristike pored struje I_{pv} , utiče struja inverzne polarizacije diode i faktor idealnosti diode. Veća vrijednost I_0 i a rezultira manjim naponom praznog hoda. Pored, I_0 uticaj ima i R_s . Veća vrijednost serijske otpornosti dovodi do smanjenja napona praznog hoda.

Sa slike 5.31 se može zaključiti da na prvom dijelu karakteristike Metoda 7 ima najveće odstupanje. Kao što je objašnjeno, Metoda 7 bi trebala najbolje pratiti izgled strujno naponske karakteristike, jer se bazira na minimizaciji RMSE. Međutim, kako RMSE uzima u obzir sve tačke na karakteristici, a na prvom dijelu je dat manji broj mjerenih tačaka, javlja se ovo odstupanje. Sa druge strane, metode 2 i 3 imaju najbolje poklapanje sa prvim dijelom strujno naponske karakteristike. Preklapanje na prvom dijelu karakteristike je indikacija da su vrijednosti struje I_{pv} i paralelne otpornosti R_p određene sa velikom preciznošću ovim metodama.

Drugi dio strujno naponske karakteristike dobijene primjenom Metoda 7 se najbolje poklapa sa mjerenom karakteristikom. Pored ove metode dobro poklapanje na ovom dijelu karakteristike ima Metoda 5.



Slika 5.32 Poređenje P-V karakteristika Solarex MSX – 60

Na slici 5.32 prikazane su P-V karakteristike svih sedam metoda upoređene sa mjerenom P-V karakteristikom solarnog modula Solarex MSX - 60. Na uvećanom prikazu predstavljena je tačka maksimalne snage mjerene P-V karakteristike. Vidi se da na primjeru ovog solarnog modula Metoda 1 i Metoda 2 najbolje prate tačku maksimalne snage. Metoda 1, kao što je više puta naglašeno, korisna je za potrebe praćenja tačke maksimalne snage.

5.3 Sinergija analitičkih metoda

U ovom poglavlju je predstavljena sinergija prethodno obrađenih analitičkih metoda za estimaciju parametara na primjeru solarne ćelije R.T.C. France i solarnog modula Solarex MSX – 60. Na osnovu sumarne analize i poređenja metoda moguće je utvrditi njihovu preciznost prilikom određivanja pet nepoznatih parametara, I-V i P-V karakteristika, kao i tačke maksimalne snage.

Metode koje su prethodno opisane moguće je klasifikovati na osnovu pristupa estimaciji parametra. Metoda 1 se temelji na iterativnom postupku čiji je uslov konvergencije minimizacija greške između proračunate i stvarne, tablične, vrijednosti maksimalne snage. Metoda 2 bazira se isključivo na izvođenju matematičkih relacija na osnovu dostupnih tabličnih podataka. Može se smatrati najjednostavnijom od svih sedam metoda.

Metoda 3 i Metoda 4 su kombinacija analitičkih relacija i numeričkog iterativnog postupka baziranog na konvergenciji jednog ili dva parametra. Iterativni postupak se sprovodi sve dok vrijednost apsolutne razlike parametara iz prethodne i tekuće iteracije ne zadovolji željeno odstupanje. Metoda 4 zasniva se na konvergenciji dva parametra, faktora idealnosti diode i serijske otpornosti, uz pomoć ugniježdene petlje. Ovo je čini komplikovanijom za implementaciju od Metode 2 koja se bazira samo na konvergenciji serijske otpornosti. Takođe, postojanje dvije petlje dovodi do produženja vremena izvršenja algoritma.

Metode 5 i 6 pored analitičkih relacija sadrže numeričke postupke za rješavanje problema estimacije parametra. Numerički postupak ima za cilj minimizaciju razlike između proračunatih i eksperimentalno određenih podataka. Mogućnost konvergencije numeričkog postupka zavisi od izbora početnih vrijednosti parametara. Zbog toga, metode mogu konvergirati ka tačnom ili potpuno pogrešnom, a za neke pretpostavljene početne vrijednosti parametara ove metode ne mogu konvergirati.

Metoda 7 zasniva se na iterativnom postupku sa uslovom minimizacije srednje kvadratne greške između proračunatih i stvarnih vrijednosti struja I-V karakteristike. Preciznost prilikom određivanja vrijednosti nepoznatih parametara primjenom ove metode zavisi od količine podataka, tj. broja eksperimentalno određenih tačaka realne I-V karakteristike.

Uporednom analizom parametara dobijenih primjenom sedam metoda opisanih u ovom radu na primjeru solarne ćelije R.T.C. France i solarnog modula Solarex MSX – 60 može se zaključiti da se dobijaju različiti nivoi preciznosti prilikom određivanja pet ključnih parametara. Takođe, kao posljedica različitih vrijednosti određenih parametara, dobijaju se različiti izgledi I-V i P-V karakteristika, kao i različite pozicije tačke maksimalne snage. U tabeli 5.21 prikazani su objedinjeni zaključci estimacije svakog od pet nepoznatih parametara dobijenih korišćenjem opisanih metoda. U tabeli 5.22 izvršeno je poređenje dobijenih I-V i P-V karakteristika.

Tabela 5.21 – Sinergija rezultata estimacije parametara primjenom sedam analitičkih metoda na primjeru solarne ćelije R.T.C. France i solarnog modula MSX- 60

I_{pv}	Fotostruja je, generalno gledano, parametar čija je vrijednost izuzetno tačno određena primjenom bilo koje od sedam posmatranih metoda i na primjeru solarne ćelije R.T.C. France i solarnog modula Solarex MSX – 60. Preciznost određivanja fotostruje proizilazi iz činjenice da je njena vrijednost bliska I_{ks} . Vrijednost I_{pv} ima najveći uticaj na početni dio I-V karakteristike, od tačke KS do MPP. Iz uporedne analize sprovedene na R.T.C. France može se zaključiti da Metode 2 i 3 daju najprecizniju vrijednost I_{pv} . Iz uporedne analize za solarni moduo Solarex MSX – 60 može se zaključiti da metode 2 i 3 na prvom dijelu karakteristike imaju najmanja odstupanja u odnosu na mjerene vrijednosti što ih povezuje sa najpreciznijom estimacijom struje I_{pv} .
R_p	Analičke relacije koje se vezuju za paralelnu otpornost su pokazale vrlo malo odstupanje od odabrane početne vrijednosti R_{p0} , bilo da je riječ o pretpostavljenoj vrijednosti kod numeričkih postupaka ili o vrijednosti direktno dobijenoj iz mjerene I-V karakteristike. Na primjeru solarne ćelije R.T.C. France najpreciznija vrijednost R_p dobija se primjenom Metode 5, a najveće odstupanje pokazuje Metoda 1. Ostale metode daju približne vrijednosti. Odstupanja se javljaju kod Metode 1 i Metode 7. Razlog velikog odstupanja R_p primjenom Metode 1 je upravo izbor početne vrijednosti paralelne otpornosti. Preporuka za poboljšanje ove metode je da se umjesto nagiba linearnog segmenta krive između tačke kratkog spoja i maksimalne snage bira nagib u između tačke kratkog spoja i njoj najbliže tačke na mjerenom grafiku.
R_s	Serijska otpornost na primjeru R.T.C. France najbolje je određena Metodom 5. Vrijednost ove otpornosti dobijena primjenom Metode 7 takođe ima mala odstupanja od HISA metode. Analizom izgleda I-V karakteristika R.T.C. France i Solarex MSX – 60 može se zaključiti da Metode 5 i 7 imaju najmanje odstupanje od mjerene karakteristike na drugom dijelu karakteristike, od MPP do tačke PH. Za malo odstupanje jednim dijelom je zaslužna vrijednost serijske otpornosti koja diktira nagib I-V karakteristike u tački praznog hoda.
a	Prema preporukama vrijednost faktora idealnosti diode kreće se u opsegu $1 \leq a \leq 1.5$. Faktor idealnosti diode na primjeru R.T.C. France najbolje je određen Metodom 4. Ova metoda nastala je u cilju preciznijeg određivanja faktora idealnosti diode što je i potvrđeno na primjeru R.T.C. France. Primjenom metoda 5, 6 i 7 na primjeru R.T.C. France dobijene su vrijednosti a izvan preporučenog opsega, a razlog je uvođenje aproksimacija u formulama za proračun.
I_0	Struja inverzne polarizacije diode je parametar sa najviše varijacija. Razlog tome je velika međuzavisnost od vrijednosti ostalih parametara, kao i činjenica da se ova struja određuje nakon proračuna ostalih parametara. Na primjeru R.T.C France ovaj faktor najbolje je određen primjenom Metode 5 i Metode 7. Struja I_0 uz faktor idealnosti diode i R_s ima najveći uticaj na drugi dio strujno-naponske karakteristike. Kako se Metodom 7 dobija najbolje poklapanje ovog dijela karakteristike, kao i najbliža vrijednost faktora idealnosti kao kod Metode 4, može se zaključiti da se struja I_0 najpreciznije određuje ovom Metodom.

Tabela 5.22 – Sinergija I-V i P-V karakteristika dobijenih primjenom sedam analitičkih metoda na primjeru solarne ćelije R.T.C. France i solarnog modula MSX- 60

I-V karakteristika	Radi lakše analize I-V karakteristika se može podijeliti na dva dijela. Na prvi dio karakteristike, od tačke KS do tačke MPP, najveći uticaj imaju vrijednosti struje I_{pv} i paralelne otpornosti. Na primjeru solarne ćelije R.T.C. France i solarnog modula Solarex MSX – 60 najbolje preklapanje proračunate I-V karakteristike sa mjerenom I-V karakteristikom dobija se primjenom Metode 2 i Metode 3. Kako su obje metode komplementarne i daju približno iste vrijednosti nepoznatih parametara, preporuka je koristiti Metodu 2 zbog jednostavnije primjene u softverima za matematičko modelovanje. Na drugi dio strujno naponske karakteristike veliki uticaj ima faktor idealnosti diode, struja I_0 i serijska otpornost. Najbolje poklapanje drugog dijela I-V karakteristike sa mjerenom I-V karakteristikom daje Metoda 7. Ova metoda je zasnovana na principu minimizacije odstupanja proračunate i mjerene I-V karakteristike. Zbog postojanja velikog broja podataka o drugom dijelu I-V karakteristike, ova metoda daje najpreciznije rezultate.
P-V karakteristika	Posmatranjem P-V karakteristika svih sedam metoda zaključeno je da se dobijaju dovoljno precizni rezultati u odnosu na mjerenu P-V karakteristiku. Od svih sedam metoda izdvajaju se Metoda 1 i Metoda 2 koje najbolje prate tačku maksimalne snage. Metoda 1 zasnovana je na iterativnom postupku čiji je uslov konvergencije minimizacija razlike između proračunate i mjerene tačke maksimalne snage, što opravdava činjenicu da je ova metoda pogodna za praćenje MPP.

ZAKLJUČAK

Solarna energija predstavlja najveći i potencijalno najdostupniji izvor energije na Zemlji. Takođe, može se reći da je ona ključni oslonac u globalnom naporu za tranziciju ka obnovljivim izvorima energije. Smanjenje potrebe za korišćenjem fosilnih goriva, smanjenje negativnih uticaja na životnu sredinu, okretanje ka održivom razvoju, rasterećenje konvencionalnih elektro-energetskih sistema samo su neki od razloga okretanja ka korišćenju solarne energije. Veliki tehnološki razvoj i unapređenja na polju energetike dovela su do opadanja troškova proizvodnje solarnih tehnologija, povećanja efikasnosti rada i proizvodnje električne energije što solarne tehnologije svrstava u dugoročno isplative investicije.

Fotonaponske tehnologije omogućavaju direktnu konverziju solarne energije u električnu energiju. Činjenica da je Sunce neiscrpan izvor energije ih čini održivim rješenjem za proizvodnju električne energije. Ove tehnologije se mogu prilagođavati potrebama i željenim količinama električne energije što im omogućava fleksibilnost za korišćenje u različite svrhe. Osnovu svakog fotonaponskog sistema čini solarna ćelija. Kako bi se povećala efikasnost, radi se na poboljšanju dizajna i performansi solarnih ćelija te one postaju predmet istraživanja u naučnim krugovima. Jedan od ključnih aspekata u primjeni solarnih ćelija predstavlja njihovo modelovanje i određivanje parametara koji opisuju njihov rad.

Pri standardnim test uslovima vrše se određeni eksperimenti nad solarnim ćelijama uz pomoć kojih se određuju ključni parametri za opisivanje rada ovih ćelija, poput struje kratkog spoja, napona praznog hoda i tačke maksimalne snage. Međutim, za tačna predviđanja rada solarne ćelije u različitim uslovima potrebno je obezbijediti dodatne podatke. Zbog toga je neophodno izvršiti estimaciju parametara solarnih ćelija na nekom od tri ekvivalentna kola koja služe za modelovanje solarne ćelije, a to su SDM, DDM i TDM. Estimacija parametara vrši se uz pomoć različitih analitičkih, metaheurističkih ili hibridnih metoda.

U ovom radu predstavljeno je sedam analitičkih metoda za estimaciju parametara na primjeru jednodiodnog modela solarne ćelije/modula. Na osnovu seta tabličnih podataka dobijenih od proizvođača solarne ćelije R.T.C. France i solarnog modula Solarex MSX-60 izvršena je procjena vrijednosti pet nepoznatih parametara: a , I_{pv} , I_0 , R_s i R_p . Na osnovu ovih vrijednosti formirane su I-V i P-V karakteristike i izvršeno je njihovo poređenje sa mjerenim karakteristikama. Međutim, svaka od metoda omogućila je dobijanje rezultata različite preciznosti. Razlog su, prije svega, pristupi estimaciji parametara, uslovi konvergencije iterativnog postupka, ili uvedene aproksimacije u relacijama korišćenim za proračune.

Nakon estimacije vrijednosti pet nepoznatih parametara na primjeru solarne ćelije R.T.C. France i solarnog modula Solarex MSX - 60, izvršena je uporedna analiza rezultata i sinergija predstavljenih analitičkih metoda. Ova analiza je omogućila identifikaciju metoda koje daju najpreciznije vrijednosti za svaki od parametara pojedinačno. Takođe, utvrđeno je koja metoda je najefikasnija za određivanje I-V i P-V karakteristika solarnih ćelija, kao i za praćenje tačke maksimalne snage. Ove informacije su ključne za optimizaciju performansi solarnih sistema, omogućavajući izbor najefikasnijih metoda za tačno modelovanje i poboljšanje efikasnosti sistema u stvarnim uslovima.

Estimacija parametara fotonaponskih ćelija je ključna za pravilno dimenzionisanje, optimizaciju i povećanje efikasnosti kako samih ćelija, tako i solarnih sistema. Analitičke metode, zahvaljujući jednostavnosti primjene i brzim algoritmima, omogućavaju precizno praćenje rada ćelija u realnom vremenu i predviđanje performansi u različitim uslovima. Ipak, ove metode imaju određena ograničenja, kao što su potreba za velikim setom podataka i aproksimacije koje utiču na tačnost rezultata. Korišćenjem podataka dobijenih poređenjem većeg broja analitičkih metoda moguće je napraviti novu, kombinovanu metodu koja će biti još preciznija pri estimaciji vrijednosti nepoznatih parametara. Prevazilaženjem ovih ograničenja i kreiranjem novih analitičkih metoda, mogu se stvoriti moćni alati za praćenje i maksimizaciju potencijala solarne energije. Upravo prethodno navedene konstatacije predstavljaju i smjernice budućih istraživanja.

LITERATURA

- [1] Lo Piano, S., Smith, S.T., 2022. 'Energy demand and its temporal flexibility: Approaches, criticalities and ways forward', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 160, (1364-0321), 112249.
- [2] Qazi, A., Hussain, F., N. ABD. Rahim, Hard, G., Alghazzawi, D., Shaban, K. & Haruna K., 2019. 'Towards Sustainable Energy: A Systematic Review of Renewable Energy Sources, Technologies, and Public Opinions', *IEEE Access*, vol. 7, pp. 63837-63851.
- [3] Hajer, M. A. & Pelzer, P., 2018. 'An Energetic Odyssey: Understanding 'Techniques of Futuring' in the transition towards renewable energy', *Energy research & social science*, vol. 44, pp. 222-231.
- [4] Kholaf, M.M.N.H.K., Xiao, M. & Tang, X., 2022. 'COVID 19's fear uncertainty effect on renewable energy supply chain management and ecological sustainability performance; the moderate effect of big data analytics', *Sustain. Energy Technol.* vol. 53, ISSN 2213-1388, 102622.
- [5] Steffen B. & Patt A., 2022. , 'A historical turning point? Early evidence on how the Russia-Ukraine war changes public support for clean energy policies', *Energy Research & Social Science*, Vol. 91, ISSN 2214-6296.
- [6] Rajesh R. & Mabel C., 2015. 'A comprehensive review of photovoltaic systems', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 51, ISSN 1364 – 0321, pp. 231 – 248.
- [7] Phillips, L., 2019. '9 - Solar energy', in: T. M. Letcher (ed.) *Managing Global Warming*. Academic Press, pp. 317-332.
- [8] Bayod-Rújula, A. A., 2019. 'Chapter 8 - Solar photovoltaics (PV)', in: F. Calise, M. Dentice D'Accadia, M. Santarelli, A. Lanzini & D. Ferrero (eds.) *Solar Hydrogen Production*. Academic Press, pp. 237-295.
- [9] Panwar N.L., Kaushik S.C. & Kothari S., 2011. 'Role of renewable energy sources in environmental protection: A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, ISSN 1364-0321, pp. 1513-1524.
- [10] Kannan N. & Vakeesan D. 2016. 'Solar energy for future world: - A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 62, ISSN 1364-0321, pp. 1092-1105,
- [11] Durgadevi A., Arulselvi S. & Natarajan S. P., 2011. 'Photovoltaic modeling and its characteristics', *International Conference on Emerging Trends in Electrical and Computer Technology*, pp. 469-475.
- [12] Ma, T., Yang, H. & Lu, L., 2014. 'Solar photovoltaic system modeling and performance prediction', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 36, ISSN 1364-0321. pp. 304-315.

- [13] Humada, A. M., Hojabri, M., Mekhilef, S. & Hamada, H. M., 2016. 'Solar cell parameters extraction based on single and double-diode models: A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 56, ISSN 1364-0321, pp. 494-509.
- [14] Rezk, H. & Abdelkareem, M. A., 2022. 'Optimal parameter identification of triple diode model for solar photovoltaic panel and cells', *Energy Reports*, Vol.8(1), ISSN 2352-4847, pp. 1179-1188.
- [15] Er, Z., Rouabah, Z., Kızıllan, G. & Orken, A. T., 2017. 'Standards and Testing Experiments for A Photovoltaic Module', *Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi (Özel Sayı - Special Issue)*, pp. 12-15.
- [16] Shongwe, S. & Hanif, M., 2015. 'Comparative Analysis of Different Single-Diode PV Modeling Methods', *IEEE Journal of Photovoltaics*, Vol. 5(3), pp. 938-946.
- [17] Elbaset, A. A., Ali, H. & Abd-El Sattar, M., 2014. 'Novel seven-parameter model for photovoltaic modules', *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 130, ISSN 0927-0248, pp. 442-455.
- [18] Khanna, V., Das, B. K., Bisht, D., Vandana & Singh, P. K., 2015. 'A three diode model for industrial solar cells and estimation of solar cell parameters using PSO algorithm', *Renewable Energy*, vol. 78, ISSN 0960-1481, pp. 105-113.
- [19] Abbassi, R., Abbassi, A., Jemli, M. & Chebbi, S., 2018. 'Identification of unknown parameters of solar cell models: A comprehensive overview of available approaches', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 90, ISSN 1364-0321., pp. 453-474.
- [20] Chin, J., Salam, Z. & Ishaque, K., 2015. 'Cell modelling and model parameters estimation techniques for photovoltaic simulator application: A review', *Applied Energy*, Vol. 154, ISSN 0306-2619.
- [21] Chen, C. J., 2011. 'The Physics of Solar Energy Conversion', Wiley & Sons.
- [22] Spedding, C.P., Nuttall, W. J., Lim, S., 2022. 'Energy requirements of a thermally processed ISRU radiation shield for a lunar habitat', *Advances in Space Research*, Vol. 65 (11), pp. 2467-2474.
- [23] Hayat, M. B., Ali, D., Monyake, K. C., Alagha, L., & Ahmed, N., 2018. 'Solar energy- A look into power generation, challenges, and a solar-powered future', *International Journal of Energy Research*. Vol/ 43(3), pp. 1049-1067.
- [24] Nwaigwe, K.N., Mutabilwa, P., Dintwa, E., 2019. 'An overview of solar power (PV systems) integration into electricity grids', *Materials Science for Energy Technologies*, Vol. 2(3), ISSN 2589-2991, pp. 629-633.

- [25] Zhang, W., Zhao, Y., Huang, F., Zhong, Y., Yhou, J., 2021. 'Forecasting the Energy and Economic Benefits of Photovoltaic Technology in China's Rural Areas', *Sustainability*, vol. 13(15), 8408.
- [26] Tian, Y., Zhao, C. Y., 2013. 'A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications', *Applied Energy*, vol. 104, ISSN 0306 – 2619, pp. 538 – 553.
- [27] Ganesh, N. S., Srinivas, T., 2012. 'Design and modeling of low temperature solar thermal power station', *Applied Energy*, Vol. 91(1), ISSN 0306-2619, pp. 180 – 186.
- [28] Chaar, L. E., Lamont, L.A., Zein N. E., 2011. 'Review of photovoltaic technologies', vol. 15(5), ISSN 1364 – 0321, pp. 2165 – 2175.
- [29] Lameirinhas, R. A. M., Torres, J. P. N., Cunha J. P. M., 2022. A Photovoltaic Technology Review: History, Fundamentals and Applications, *Energies*, vol. 15(5), 1823.
- [30] Nayak, P.K., Mahesh, S., Snaith, H.J. et al., 2019., 'Photovoltaic solar cell technologies: analysing the state of the art'. *Nat Rev Mater* 4, pp. 269–285.
- [31] Rathore, N. et al. 2019. 'A comprehensive review of different types of solar photovoltaic cells and their applications', *International Journal of Ambient Energy*, 42(10), pp. 1200–1217.
- [32] Durganjali, C. S., Bethanabhotla, S., Kasina, S., Radhika S., 2020., 'Recent Developments and Future Advancements in Solar Panels Technology', *Journal of Physics: Conference Series*, 1495.
- [33] Venkateswari, R., Sreejith, S., 2019. 'Factors influencing the efficiency of photovoltaic system', vol. 101, ISSN 1364 – 0321, pp. 376 – 394.
- [34] Shukla A. K., Sudhakar, K., Baredar, B., 2016. 'A comprehensive review on design of building integrated photovoltaic system', *Energy and Buildings*, vol. 128, ISSN 0378-7788, pp 99 – 110.
- [35] Mansouri, N., Lashab, A., Sera, D., Guerrero, J. M, Cherif A., 2019. ' Large Photovoltaic Power Plants Integration: A Review of Challenges and Solutions', *Enwrgies*, vol 12(19), 2798.
- [36] Bacha, S., Picault, D., Burger, B., Etxeberria-Otadui, I., Martins, J., 2015. 'Photovoltaics in Microgrids: An Overview of Grid Integration and Energy Management Aspects', *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 9 (1), pp. 33-46.
- [37] Sahu, A., Yadav, N., Sudhakar, K., 2016. 'Floating photovoltaic power plant: A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 66, ISSN 1364 – 0321, pp. 815 – 824.

- [38] Salmi, T., Bouzguenda, M., Gastli, A., Masmoudi, M., 2012. ' MATLAB/Simulink Based Modeling of Photovoltaic Cell', International Journal of renewable energy reserch, vol. 2(2).
- [39] Blakers, A., Zin, N., McIntosh, R. M., Fong, K., 2013. 'High Efficiency Silicon Solar Cells', Energy Procedia, vol. 33, ISSN 1876-6102, pp. 1 – 10.
- [40] Ranabhat, K., Patrikeev, L., Antal'evna, A., Andrianov, K., Lapshinsky, V., Sofronova, E., 2016. ' An introduction to solar cell technology', Journal of applied engineering Science, vol. 14 (4).
- [41] Almosni, S., Delamarre, A., Jehl, Z., Suchet, D., Cojocaru, L., Giteau, M., Guillemoles, J. F., 2018. 'Material challenges for solar cells in the twenty-first century: directions in emerging technologies', Science and Technology of Advanced Materials, vol. 19(1), pp. 336–369.
- [42] Miles, R.W., Hynes, K.M., Forbes, I., 2005. 'Photovoltaic solar cells: An overview of state-of-the-art cell development and environmental issues', Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials, vol. 51, ISSN 0960-8974, pp. 1 – 42.
- [43] Yu, X., Yang, D., 2019. 'Growth of Crystalline Silicon for Solar Cells: Czochralski Si', Yang, D. (eds) Handbook of Photovoltaic Silicon. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [44] Srinivas, B., Balaji, S., Nagendra Babu, M., Reddy, Y.S. 2015., 'Review on Present and Advance Materials for Solar cells', International Journal of Engineering Research-Online, vol.3, pp.178-182.
- [45] Sharma, S., Jain, K., Sharma, A., 2015. 'Solar cells: In research and Application- A Review', Materials Sciences and Applications, vol. 6(12) , pp. 1145-1155.
- [46] Liu, J., Yao, Y., Xiao, S., Gu X., 2018. 'Review of status developments of high-efficiency crystalline silicon solar cells', Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 51(12).
- [47] Chopra, K.L., Paulson, P.D., Dutta, V. 2004. 'Thin-film solar cells: an overview'. Progress in Photovoltaics: Research and Application, vol.12, pp.69-92.
- [48] Fathi, M., Abderrezek, M., Djahli, F., Ayad, M., 2015. 'Study of thin film solar cells in high temperature condition', Energy Procedia, vol. 74, pp.1410 – 1417.
- [49] Green, M.A., Ho – Baille, A., Snaith, H.J., 2014., 'The emergence of perovskite solar cells', Nature Photonics, vol. 8(7).
- [50] Rappaport, P., 1959. 'The photovoltaic effect and its utilization', Solar Energy, vol 3(4), ISSN 0038 – 092X, pp. 8 – 18.
- [51] Gray, J.L., 2010. The Physics of the Solar Cell. In: A. Luque and S. Hegedus, eds. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. 2nd ed. Chichester: Wiley

- [52] Cotter, J. E., Guo, J. H., Cousins, P. J., M. D. Abbott, M. D., Chen, F. W., Fisher, K. C., 2006. 'P-Type Versus n-Type Silicon Wafers: Prospects for High-Efficiency Commercial Silicon Solar Cells', IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 53(8), pp. 1893-1901.
- [53] Abdullah, K.A., Bakour, B., 2011 'Influence of depletion region width on performance of solar cell under sunlight concentration', Energy Procedia, vol. 6, ISSN 1876-6102, pp. 36 – 45.
- [54] Jordehi, A.R., 2016. 'Parameter estimation of solar photovoltaic (PV) cells: A review', Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 61, ISSN 1364-0321, pp. 354 – 371.
- [55] Azzouzi, M., Popescu, D., Bouchahdane, M., 2016. 'Modeling of Electrical Characteristics of Photovoltaic Cell Considering Single-Diode Model', Journal of Clean Energy Technologies vol. 4, pp. 414-420.
- [56] Ahmed, M. T., Gonçalves, T., Tlemcani, M., 2016. 'Single diode model parameters analysis of photovoltaic cell', International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), pp. 396-400.
- [57] Bayhan, M., Bayhan, H., 2011. 'A simple approach to determine the solar cell diode ideality factor under illumination', Solar Energy, vol. 85(5), ISSN 0038-092X, pp. 769-775.
- [58] Handy, R.J., 1967, 'Theoretical analysis of the series resistance of a solar cell', Solid-State Electronics, vol. 10(8), ISSN 0038-1101, pp. 765 – 775.
- [59] Zhe, L., Yang, J., Dezfuli, P. A. N., 2021. 'Study on the Influence of Light Intensity on the Performance of Solar Cell', International Journal of Photoenergy, vol. 2021(1), ISSN 1110-662X.
- [60] Proctor, C. M., Nguyen, T.Q., 2015. 'Effect of leakage current and shunt resistance on the light intensity dependence of organic solar cell', Applied Physics Letters, vol. 106(8).
- [61] Muñoz-García, M.A., Marin, O., Alonso-Garcia, M.C., Chenlo, F. 2012. 'Characterization of thin film PV modules under standard test conditions: Results of indoor and outdoor measurements and the effects of sunlight exposure', Solar Energy, vol. 86(10), ISSN 0038-092X, pp. 3049-3056.
- [62] Venkateswari, R., Rajasekar, N., 2021. 'Review on parameter estimation techniques of solar photovoltaic systems', International Transactions on Electrical Energy Systems, vol. 31(11), ISSN 2050-7038.
- [63] Wolf, P., Benda, V., 2013. 'Identification of PV solar cells and modules parameters by combining statistical and analytical methods', Solar Energy, vol. 93, vol. 93, ISSN 0038-092X, pp. 151-157.

- [64] Fahrim, S. R., Hasanien, H. M., Turkey, R. A., Aleem, S. H. E. A., Calasan, M., 2022 'A Comprehensive Review of Photovoltaic Modules Models and Algorithms Used in Parameter Extraction', vol.15, 8940.
- [65] Abdulrazzaq, A. K., Bognár, G., Plesz, B., 2022. 'Accurate method for PV solar cells and modules parameters extraction using I–V curves', Journal of King Saud University - Engineering Sciences, vol. 34(1), pp. 46-56.
- [66] Orioli, A., Di Gangi, A. A., 2013. ' Procedure to calculate the five parameter model of crystalline silicon photovoltaic modules on the basis of the tabular performance data', Applied Energy, vol. 102, 1160–1177. [CrossRef].
- [67] Appelbaum, J., Peled, A., 2014. 'Parameters extraction of solar cells – A comparative examination of three methods', Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 122, ISSN 0927 – 0248, pp. 164 – 173.
- [68] Et-torabi, K., Nassar-eddine, I., Obbadi, A., Errami, Y., Rmailly, R., Sahnoun, S., El Fajri, A., Agunaou, M., 2017. 'Parameters estimation of the single and double diode photovoltaic models using a Gauss–Seidel algorithm and analytical method: A comparative study', Energy Conversion and Management, vol.148, ISSN 0196-8904, pp. 1041-1054.
- [69] Ibrahim, H., Anani, N., 'Evaluation of Analytical Methods for Parameter Extraction of PV modules', Energy Procedia, vol. 134, ISSN1876-6102, pp. 69 – 78.
- [70] DeSoto, W., Klein, S.A., Beckman, W.A., 2006. 'Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance', Solar Energy, vol. 80, pp. 78–88.
- [71] Lyden, S., Haque, M.E., 2015. ' Maximum Power Point Tracking techniques for photovoltaic systems: A comprehensive review and comparative analysis', Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 52, ISSN 1364-0321, pp. 1504-1518.
- [72] Subudhi, B., Pradhan, R., 2013. 'A Comparative Study on Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Power Systems', IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 4(1), pp. 89-98.
- [73] Villalva, M.G., Gazoli, J.R., Filho, E.R., 2009. 'Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays', IEEE Trans. Power Electron. Vol. 24, pp. 1198–1208.
- [74] Carrero, C., Amador, J., Arnaltes, S., 2007 'A single procedure for helping PV designers to select silicon PV module and evaluate the loss resistances', Renewable Energy, vol. 32(15), pp. 2579–2589.
- [75] Walker, G., 2001. 'Evaluating MPPT converter topologies using a matlab PV model' J. Elect. Electron. Eng., vol. 21(1), pp. 45–55.

[76] Celik, A.N., Acikgoz, N., 'Modelling and experimental verification of the operating current of mono crystalline photovoltaic modules using four and five parameter models', *Applied Energy* 2007, vol. 84, pp. 1–15.

[77] DeBlas, M.A., Torres, J.L., Prieto, E., Garcia, A., 2002. 'Selecting a suitable model for characterizing photovoltaic devices', *Renewable Energy*, vol. 25, pp. 371–380.

[78] Phang JCH, Chan DSH, Phillips JR., 1984. 'Accurate analytical method for the extraction of solar cell model parameters', *Electron Lett*, vol. 20(10).

[79] Brano, V.L., Orioli, A., Ciulla, G., Di Gangi, A., 2010 'An improved five parameter model for photovoltaic module'. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 94, pp. 1358–1370.

[80] Chatterjee, A., Keyhani, A., Kapoor, D., 2011. 'Identification of photovoltaic source models', *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 26, pp. 883–889.

[81] Sera, D., Teodorescu, R., Rodriguez, P., 2007. 'PV panel model based on datasheet values', In *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 2392–2396.

[82] Lineykin, S., Averbukh, M., Kuperman, A., 2014. 'An improved approach to extract the single diode equivalent circuit parameters of a photovoltaic cell/panel' *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2014, vol. 30, pp. 282–289.

[82] Calasan, M., Abdel Aleem, S. H. E, Zobaa, A. F, 2020. '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 Conversion and Management*, vol. 210, ISSN 0196-8904.

[83] Cubas, J., Pindado, S., Sorribes, F. 2017. 'Analytical Calculation of Photovoltaic Systems Maximum Power Point (MPP) Based on the Operation Point', *Applied Sciences*, vol. 7.