



UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

MILICA SOŠIĆ

**MATEMATIČKO MODELOVANJE I ESTIMACIJA
PARAMETARA GORIVNIH ĆELIJA SA PROTONSKI
PROVODLJIVOM MEMBRANOM**

- MASTER RAD -

Podgorica, 2025. godine

PODACI I INFORMACIJE O KANDIDATU

Ime i prezime: Milica Sošić

Datum i mjesto rođenja: 05.01.2000. godine, Podgorica, Crna Gora

Naziv završenog osnovnog studijskog programa i godina završetka studija: Energetika i automatika, 2022. godine

INFORMACIJE O MASTER RADU

Naziv master studija: Studijski program Elektroenergetski sistemi

Naslov master rada: Matematičko modelovanje i estimacija parametara gorivnih ćelija sa protonski provodljivom membranom

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

UDK, OCJENA I ODBRANA MASTER RADA

Datum prijave master rada: 11.06.2024.

Datum sjednice Vijeća na kojoj je prihvaćena tema: 16.09.2024.

Mentor: Prof. dr Martin Čalasan

Komisija za ocjenu/ odbranu teme rada:

prof. dr Martin Čalasan, mentor,

prof. dr Vesna Rubežić, predsjednik,

prof. dr Snežana Vujošević, član,

prof. dr Vladan Radulović, član,

prof. dr Veselinka Grudić, član.

Datum odbrane: 20.02.2025.

Datum promocije:

Ime i prezime autora: Milica Sošić, BSc

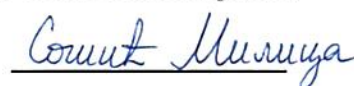
ETIČKA IZJAVA

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

"Matematičko modelovanje i estimacija parametara gorivnih ćelija sa protonski provodljivom mebranom"

moje originalno djelo.

Podnosilac izjave,



Milica Sošić, BSc

U Podgorici, dana 19.11.2024. godine

REZIME

U svjetlu globalnih napora za smanjenje emisije štetnih gasova i tranzicije ka obnovljivim izvorima energije (OIE), gorivne ćelije sa protonski provodljivom membranom (engl. *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* - PEMFC) predstavljaju ključnu komponentu buduće energetske infrastrukture. Kao jedan od najefikasnijih sistema za konverziju vodonika u električnu energiju, PEMFC se smatra revolucionarnim rješenjem za izazove energetske tranzicije, zbog svoje visoke efikasnosti, ekološke prihvatljivosti, mogućnosti skladištenja električne energije i sposobnosti integracije sa OIE. Ova tehnologija ne samo da nudi mogućnost smanjenja zavisnosti od fosilnih goriva, već i značajno doprinosi smanjenju emisija ugljen-dioksida (CO₂).

Motiv za istraživanje matematičkog modelovanja i estimacije parametara PEMFC-a potiče iz potrebe za boljim, tačnijim i efikasnijim opisivanjem ovih uređaja. Razumijevanje osnovnih parametara i principa rada PEMFC-a ključno je za postizanje visokih performansi i efikasnosti ovih ćelija. Optimizacija rada ovih ćelija je od suštinskog značaja za njihovu širu primjenu u transportu, stacionarnim energetske sistemima i u sistemima za skladištenje električne energije. Estimacija parametara ovih ćelija podrazumijeva složene analize i primjenu različitih matematičkih modela, koji omogućavaju precizno određivanje ključnih karakteristika i ponašanja sistema pod različitim uslovima rada. U ovom radu je fokus na primjeni optimizacionih tehnika, konkretno hibridnih varijanti metaheurističkog algoritma – optimizacionog algoritma morževa, za procjenu nepoznatih parametara PEMFC. Ovo istraživanje ima za cilj da doprinese unapređenju znanja o radu ćelija i da omogući inženjerima alate za optimizaciju i efikasnije upravljanje ovim tehnologijama.

S obzirom na to da proizvođači često daju samo osnovne podatke, dublje analize su neophodne kako bi se osiguralo razumijevanje svih faktora koji utiču na efikasnost i dugotrajnost ovih gorivnih ćelija. Estimacija parametara gorivnih ćelija podrazumijeva određivanje sedam parametara iz poznatih ulaznih podataka, kao i određivanje strujno-naponskih karakteristika, a sve uz pomoć metaheurističkih algoritama. Kroz komparativnu analizu rezultata dobijenih različitim metodama estimacije, ovaj rad ima za cilj da pruži pregled dostupnih istraživanja u oblasti PEMFC-a, ukazujući na najbolje tehnike estimacije.

S obzirom na značaj istraživanja gorivnih ćelija (engl. *Fuel Cells* - FCs), očekuje se da će rezultati ovog rada doprinijeti razvoju efikasnijih i pouzdanijih modela PEMFC. Ovi rezultati otvaraju nove pravce za dalja istraživanja i primjene u industriji, poput razvoja inovativnih membrana i katalitičkih materijala. Ovo istraživanje može doprinijeti daljem razvoju tehnologije gorivnih ćelija i njihovoj primjeni u realnim uslovima kako bi se osigurala komercijalizacija vodonika kao održivog goriva.

IZVOD RADA

Gorivne ćelije sa protonski provodljivom membranom će predstavljati glavni izvor „zelene“ električne energije u budućnosti zbog njihove značajne uloge u skladištenju električne energije. Stoga, aktuelne teme naučnih istraživanja su matematičko modelovanje, estimacija parametara i analiza rada PEMFC. Predmet istraživanja ovog rada je određivanje ključnih parametara PEMFC i poređenje proračunatih i mjerenih vrijednosti struje. Cilj je da se utvrdi tačnost estimacije ovih parametara korišćenjem različitih metaheurističkih algoritama za dvije literaturno poznate PEMFC – BCS 500 W i Ballard-Mark-V 5 kW.

Izvođenje novog matematičkog modela struje PEMFC u zavisnosti od napona predstavlja izazov zbog kompleksnosti fizičkih i hemijskih procesa unutar ćelije. Kompleksnost izvođenja novog modela zahtijeva upotrebu iterativne Lambert W funkcije i iterativne numeričke metode Regula Falsi. Efikasnost i preciznost predloženog matematičkog modela je provjerena upoređivanjem vrijednosti *RMSE* za struje i *RMSE* za napone proračunatih za iste estimirane parametre. Postupak određivanja parametara se svodi na minimizaciju srednje kvadratne greške struje (engl. *Root Mean Square Error* - *RMSE*). U ovom radu, za estimaciju parametara upotrijebljene su tri hibridne varijante (adaptivna, haotična i varijanta sa simuliranim kaljenjem) optimizacionog algoritma morževa (engl. *Walrus Optimization Algorithm* - *WaOA*). Analizom i prikazom rezultata svake od hibridnih varijanti upotrijebljenog algoritma predstavljene su njihove prednosti i nedostaci. Komparativnom analizom tri hibridne varijante se određuje koja varijanta daje najbolju vrijednost funkcije cilja i koja varijanta najbrže konvergira ka optimalnoj vrijednosti.

Tačnost estimacije sedam nepoznatih parametara upotrebom hibridnih varijanti optimizacionog algoritma morževa provjerena je upoređivanjem *RMSE* struje dobijene ovim hibridnim varijantama i *RMSE* struje dobijene drugim literaturno dostupnim metodama estimacije.

Ovaj rad ukazuje na efikasnost i tačnost estimacije parametara PEMFC upotrebom optimizacionog algoritma morževa. Dobijeni rezultati se smatraju značajnim za unapređenje tehnologije gorivnih ćelija i njihovu integraciju u praksi.

Ključne riječi: optimizacioni algoritam morževa, srednja kvadratna greška struje, gorivne ćelije, hibridne varijante algoritma

ABSTRACT

Proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) are expected to become the primary source of “green” electricity in the future due to their significant role in energy storage. The subject of this study is the determination of key PEMFC parameters and the comparison of calculated and measured current values. The aim of this study is to evaluate the accuracy of parameter estimation using various metaheuristic algorithms for two well-known PEMFCs - BCS 500 W and Ballard-Mark-V 5 kW.

The development of a new mathematical model for PEMFC current as a function of voltage is challenging due to the complexity of the physical and chemical processes within the cell. This complexity of new mathematical model requires the use of Lambert W function and Regula Falsi method. The efficiency and accuracy of the proposed mathematical model are validated by comparing the *RMSE* values for currents and voltages calculated using the same estimated parameters. The parameter estimation process is focused on minimizing the *RMSE* of the current. In this study, three hybrid variants (adaptive, chaotic, and simulated annealing) of walrus optimization algorithm were utilized for parameter estimation. The presentation and analysis of the results for each hybrid variant highlight their advantages and disadvantages. A comparative analysis of the three hybrid variants determines which variant provides the best objective function value and which converges most rapidly to the optimal objective function value.

The accuracy of estimating seven unknown parameters using hybrid variants of the walrus optimization algorithm is verified by comparing the *RMSE* for currents obtained from these hybrid variants with those derived from other literature-available estimation methods.

This study demonstrates the efficiency and accuracy of parameter estimation for PEMFC using the walrus optimization algorithm. The obtained results are considered significant for advancing fuel cell technology and its practical integration.

Keywords: walrus optimization algorithm, root mean square error of current, fuel cells, hybrid variants of the algorithm

LISTA SKRAĆENICA

OIE - obnovljivi izvori energije
PEMFC - gorivne ćelije sa protonski provodljivom membranom (engl. *Proton Exchange Membrane Fuel Cell*)
CO₂ - ugljen-dioksid
FCs - gorivne ćelije (engl. *Fuel Cells*)
WaOA - optimizacioni algoritam morževa (engl. *Walrus Optimization Algorithm*)
RMSE - srednja kvadratna greška struje (engl. *Root Mean Square Error*)
RMSE_v - srednja kvadratna greška napona (engl. *Root Mean Square Error of Voltage*)
RMSE_i – srednja kvadratna greška struje (engl. *Root Mean Square Error of Current*)
CSA - algoritam pretrage kruga (engl. *Circle Search Algorithm*)
SCA - sinusno - kosinusni algoritam (engl. *Sine Cosine Algorithm*)
GWO-CS - algoritam optimizacije sivih vukova - algoritam pretrage kukavice (engl. *Grey Wolf Optimization-Cuckoo Search Algorithm*)
GWO - optimizacija sivih vukova (engl. *Grey Wolf Optimization*)
CMOA - haotični algoritam optimizacije vodenih cvjetova (engl. *Chaotic Mayfly Optimization Algorithm*)
NNA - algoritam neuralnih mreža (engl. *Neural Network Algorithm*)
FOA - algoritam optimizacije svitaca (engl. *Firefly Optimization Algorithm*)
ICA - imperijalistički kompetitivni algoritam (engl. *Imperialist-Competitive Algorithm*)
SFLA - algoritam skakanja žaba (engl. *Shuffled Frog-Leaping Algorithm*)
MPA - algoritam morskog predatora (engl. *Marine-Predator Algorithm*)
HGSA - algoritam pretrage igara gladi (engl. *Hunger Games Search Algorithm*)
MRFO - algoritam optimizacije ishrane manta raža (engl. *Manta-Rays Foraging Optimizer*)
WOA - algoritam optimizacije kitova (engl. *Whale Optimization Algorithm*)
GOA - algoritam optimizacije skakavaca (engl. *Grasshopper Optimizer Algorithm*)
ERWCA - algoritam kruženja vode u prirodi zasnovan na stopi isparavanja (engl. *Evaporation-Rate Water Cycle Algorithm*)
P2G - postrojenja u kojim se pomoću energije dobijene iz OIE vrši elektroliza vode pomoću koje se izdvaja vodonik (engl. *Power to Gas - P2G*)
EES – elektroenergetski sistem
SSE - suma kvadrata grešaka (engl. *Sum of Squared Errors*)
SSE_v - suma kvadrata grešaka napona (engl. *Sum of Squared Errors of Voltage*)
SSE_i - suma kvadrata grešaka struje (engl. *Sum of Squared Errors of Current*)
WEC - Svjetski savjet energetike (engl. *World Energy Council*)
IEA - međunarodna agencija za energetiku (engl. *International Energy Agency*)
GEA - Globalne studije izazova iz oblasti energetike (engl. *Global Energy Assessment*)
SOEC - elektrolizatori sa čvrstim oksidom kao elektrolitom (engl. *Solid Oxide Electrolysis Cells*)
PEM – protonski provodna membrana (engl. *Proton Exchange Membrane*)
DC/DC konvertor – pretvarač jednosmjernog napona (engl. *Direct Current/Direct Current Converter*)
AC/DC konvertor – pretvarač naizmjeničnog u jednosmjerni napon (engl. *Alternating Current/Direct Current Converter*)
HTEL - visokotemperaturna elektroliza (engl. *High-Temperature Electrolysis*)
FCEV - Električno vozilo na gorivne ćelije (engl. *Fuel Cell Electric Vehicle*)

SAD – Sjedinjene Američke države
EMS - sistem za upravljanje energijom (engl. *Energy Managemenet System*)
MicroCHP - mikro kombinovani sistem za proizvodnju toplote i energije (engl. *Micro Combined Heat and Power Systems*)
MEA - sklop membrana - elektrode (engl. *Membrane Electrode Assembly*)
GDL - gasno - difuzioni sloj (engl. *Gas Diffusion Layer*)
BP - bipolarne ploče (engl. *Bipolar Plates*)
H⁺ - pozitivno naelektrisan proton
ICR - međupovršinski kontakti otpor (engl. *Interfacial Contact Resistance*)
PFSA - perfluorosulfonska kiselina
LT-PEMFC - PEMFC koje rade na niskim temperaturama (engl. *Low-Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell*)
IT-PEMFC - PEMFC koje rade na srednjim temperaturama (engl. *Intermediate-Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell*)
HT-PEMFC - PEMFC koje rade na visokim temperaturama (engl. *High-Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell*)
SPEEK - sulfonovani poli eter eter keton
PBI - polibenzimidazol
Pt - platina
H₂ - vodonik
e⁻ - negativno naelektrisani elektroni
O₂ - kiseonik
LB - donja granica (engl. *Lower Bound*)
UB - gornja granica (engl. *Upper Bound*)
HWaOA – haotična varijanta WaOA
SAWaOA - modifikacija WaOA upotrebom algoritma simuliranog kaljenja
AWaOA - adaptivna modifikacija WaOA
RFM - Regula falsi metoda

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. GORIVNE ĆELIJE SA PROTONSKI PROVODLJIVOM MEMBRANOM	4
2.1 Značaj i primjena gorivnih ćelija	5
2.2 Primjena PEMFC u P2G sistemima	6
2.2.1 PEMFC u vozilima	8
2.2.2 Ostala upotreba	11
2.3 Opis gorivnih ćelija vodonika	11
2.3.1 Bipolarna ploča	13
2.3.2 Sklop membrana - elektrode	13
2.3.3 Membrana za razmjenu protona	14
2.3.4 Sloj katalizatora	15
2.3.5 Sloj za difuziju gasa	15
2.4 Princip rada gorivnih ćelija vodonika	15
2.5 Napon - struja modelovanje PEM gorivne ćelije	16
3. OPTIMIZACIONI ALGORITAM MORŽEVA.....	20
3.1 WaOA algoritam	20
3.2 Haotična modifikacija WaOA algoritma	25
3.3 Modifikacija WaOA algoritma upotrebom algoritma simuliranog kaljenja	26
3.4 Adaptivna modifikacija WaOA algoritma	26
4. STRUJA – NAPON MODELOVANJE PEM GORIVNE ĆELIJE	28
5. REZULTATI ESTIMACIJE PARAMETARA PEMFC	32
5.1 Pregled literature <i>PEMFC</i> sklopa <i>Ballard-Mark-V</i> 5 kW	32
5.2 Pregled literature za <i>PEMFC</i> sklop <i>BCS</i> 500 W	38
5.3 Estimacija parametara <i>PEMFC</i> sklopa <i>BCS</i> 500 W	44
5.3.1 Estimacija parametara upotrebom <i>AWaOA</i>	44
5.3.2 Estimacija parametara upotrebom <i>HWaOA</i>	48
5.3.3 Estimacija parametara upotrebom <i>SAWaOA</i>	54
5.3.4 Poređenje hibridnih varijanti <i>WaOA</i> za <i>PEMFC</i> sklop <i>BCS</i> 500 W	56
5.4 Estimacija parametara <i>PEMFC</i> sklopa <i>Ballard-Mark-V</i> 5 kW	58
5.4.1 Estimacija parametara upotrebom <i>AWaOA</i>	58
5.4.2 Estimacija parametara upotrebom <i>HWaOA</i>	63
5.4.3 Estimacija parametara upotrebom <i>SAWaOA</i>	64
5.4.4 Poređenje hibridnih varijanti <i>WaOA</i> za <i>PEMFC</i> sklop <i>Ballard-Mark-V</i> 5kW	70
6. ZAKLJUČAK.....	72
LITERATURA.....	74

1. UVOD

Gorući problemi u svijetu su globalno zagrijavanje, klimatske promjene, epidemije, nestašica energije i visoke cijene goriva i gasa usljed ratova. Ovi problemi su ubrzali potrebu za korišćenjem OIE bez emisija CO₂, kao što su fotonaponske ćelije [1] i tehnologije za skladištenje energije (posebno baterije [2]), kako bi se poboljšala energetska efikasnost i energetska tranzicija ka elektroenergetskim sistemima (EES) bez emisija CO₂ [3].

Najnovija tehnologija koja podržava energetska tranziciju ka "čistim" izvorima energije je tehnologija PEMFC [4]. U PEMFC, hemijska energija vodonika se pretvara u električnu energiju kroz elektrohemijsku reakciju sa kiseonikom, pri čemu se kao jedini nusproizvod stvara voda¹. Značaj pomenutih gorivnih ćelija se ističe kroz mogućnost skladištenja električne energije, što u kombinaciji sa OIE olakšava upravljanje EES-om u odsustvu izvora koji koriste fosilna goriva. Uz skladištenje električne energije preko skladištenja vodonika kao goriva, stvara se bezbjedniji i sigurniji EES koji u mnogo manjoj mjeri zavisi od fosilnih goriva [5]. Kao tehnologije bez emisije CO₂, ove ćelije značajno smanjuju negativne uticaje na životnu sredinu u poređenju sa fosilnim gorivima. Zamjenom fosilnih goriva obnovljivim izvorima do 2050. godine, možemo obezbijediti mnogo sigurniju budućnost [6].

Gorivne ćelije predstavljaju jedan od najreprezentativnijih ekološki prihvatljivih izvora čiste energije [7]. Na tržištu postoji mnogo vrsta gorivnih ćelija, ali se PEMFC posebno izdvajaju u različitim primjenama [8], a naročito zahvaljujući svojoj visokoj efikasnosti (od 30–60%) u širokom temperaturnom opsegu, dosta niskoj temperaturi rada, radu pri smanjenom pritisku [9], kao i izuzetno jednostavnim održavanjem i eksploataciji [10]. Zbog svih dobrih strana primjene ovih ćelija, PEMFC se danas primjenjuju kao distribuirani izvori električne energije [11], u transportu [12], u domaćinstvima [13], u električnim vozilima [14] i za skladištenje električne energije [15].

Gorivne ćelije sa protonski provodljivom membranom predmet su istraživanja naučnika koji se bave njihovom konstrukcijom, hemijskim procesima koji se u njima odvijaju i primjenama u inženjerskoj praksi. Iz tog razloga su analiza rada, matematičko modelovanje, utvrđivanje parametara i praktična primjena PEMFC popularne istraživačke teme poslednjih godina [16]. U svim dosadašnjim istraživanjima, procjena parametara gorivne ćelije zasniva se na minimizaciji zbira kvadrata grešaka između izmjerenih i procijenjenih vrijednosti napona ovih ćelija [17, 18].

Modeli gorivnih ćelija se mogu podijeliti na statičke i dinamičke modele [19]. Cilj oba modela je da se izmjereni rezultati potpuno „poklope“ sa simuliranim rezultatima dobijenim primjenom statičkog ili dinamičkog modela [19]. Bez obzira na to koji se pristup koristi, mora se koristiti jedna od tehnika za estimaciju parametara ćelije. Svi pristupi koji se koriste za procjenu parametara gorivnih ćelija mogu se podijeliti u dvije klase [18] – tradicionalne [20] i metaheurističke [21, 22] metode optimizacije.

Stare tradicionalne metode imaju brojne nedostatke. Jedan od nedostataka je što se ove metode uglavnom zasnivaju na iterativnim postupcima ili primjeni raznih numeričkih

¹<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cells>,
<https://www.fsec.ucf.edu/en/consumer/hydrogen/basics/fuelcells.htm>

metoda [18, 20, 21]. Zbog toga one zavise od koraka iteracije, početnih uslova i složenosti primjene.

S druge strane, metaheuristički optimizacioni algoritmi oslanjaju se na brzinu i snagu procesora računara na kojem se vrši proces utvrđivanja parametara. Zbog toga se metaheuristički algoritmi sve više koriste danas [23–26], pa su našli značajno mjesto u brojnim naučnim oblastima [24, 25]. Dobra strana primjene metaheurističkih algoritama je to što oni ne zavise od početnih uslova i mogu brzo pretražiti prostor potencijalnih rješenja. Međutim, glavni nedostatak je moguća divergencija od optimalnog rješenja ako je određen mali broj iteracija. Stoga je popularno razvijanje brojnih hibridnih varijanti metaheurističkih algoritama, čime se nastoji obezbijediti najprikladnije rješenje za mali broj iteracija [27]. Metaheuristički algoritmi se vrlo efikasno primjenjuju kod određivanja parametara solarnih ćelija [24], električnih mašina [25], optimalnih tokova snaga u elektroenergetskim sistemima [26] i slično.

Različiti metaheuristički algoritmi su do sada korišteni za određivanje parametara gorivnih ćelija. Neki od njih su:

- algoritam kruženja vode u prirodi zasnovan na stopi isparavanja (engl. *Evaporation-Rate Water Cycle Algorithm* – ERWCA) [27],
- algoritam pretrage kruga (engl. *the Circle Search Algorithm* - CSA) [28],
- sinusno - kosinusni algoritam (engl. *Sine Cosine Algorithm* - SCA) [28],
- algoritam optimizacije sivih vukova - algoritam pretrage kukavice (engl. *Grey Wolf Optimization-Cuckoo Search Algorithm* - GWO-CS) [29],
- optimizacija sivih vukova (engl. *Grey Wolf Optimization* - GWO) [28],
- haotični algoritam optimizacije vodenih cvjetova (engl. *Chaotic Mayfly Optimization Algorithm* - CMOA) [29],
- algoritam neuralnih mreža (engl. *Neural Network Algorithm* - NNA) [28,30],
- algoritam optimizacije svitaca (engl. *Firefly Optimization Algorithm* - FOA) [31],
- imperijalistički kompetitivni algoritam (engl. *Imperialist-Competitive Algorithm* - ICA) [31],
- algoritam skakanja žaba (engl. *Shuffled Frog-Leaping Algorithm* - SFLA) [31],
- algoritam morskog predatora (engl. *Marine-Predator Algorithm* - MPA) [32],
- algoritam pretrage igara gladi (engl. *Hunger Games Search Algorithm* - HGSA) [33],
- algoritam optimizacije ishrane manta raža (engl. *Manta-Rays Foraging Optimizer* - MRFO) [34],
- algoritam optimizacije kitova (engl. *Whale Optimization Algorithm* - WOA) [35],
- algoritam optimizacije skakavaca (engl. *Grasshopper Optimizer Algorithm* - GOA) [36] i drugi.

Ideja za izradu ovog master rada je proistekla iz želje da se da doprinos razvoju i unapređenju matematičkog modela, kao i poboljšanju tačnosti estimacije parametara PEMFC. U tom cilju je u ovom radu prvi put u literaturi izveden matematički model struje

PEMFC u zavisnosti od napona, i to preko iterativnih metoda - Lambert W funkcije i Regula Falsi iterativne metode. Izvođenje izraza za struju u zavisnosti od napona predstavlja veoma kompleksan zadatak jer je sama funkcija napona u zavisnosti od struje [27] nelinearna transcendentna jednačina (sastavljena od logaritamske, linearne i eksponencijalne funkcije). U dosadašnjoj literaturi, obično je estimacija parametara PEMFC određena prema matematičkom modelu napon – struja. U ovom radu će biti sprovedeno poređenje literaturno poznatih rezultata estimacije parametara sa aspekta naponske i strujne greške.

Za optimalno određivanje parametara ćelija sa ciljem minimizacije razlike između izmjerenih i simuliranih vrijednosti struje za različite vrijednosti napona, u ovom master radu se, po prvi put u literaturi, primjenjuje metaheuristički algoritam WaOA i njegove hibridne varijante:

- adaptivna,
- haotična i
- sa simuliranim kaljenjem.

U ovom radu je izvršena analiza i komparacija srednjih kvadratnih greški između izmjerenih i procijenjenih vrijednosti struje i napona, korišćenjem parametara dobijenih primjenom mnogih metaheurističkih metoda optimizacije za dvije literaturno poznate ćelije – *Ballard-Mark-V* 5 kW [36] i *BCS* 500 W [30]. Takođe, u radu su upoređene hibridne varijante WaOA algoritma sa aspekta brzine konvergencije i tačnosti dobijenih parametara. Takođe, sprovedeno je poređenje tačnosti estimacije parametara pomenutih gorivnih ćelija dobijenih primjenom predloženog algoritma sa rezultatima iz literature koji su dobijeni primjenom brojnih drugih metaheurističkih algoritama.

Ovaj rad je organizovan u 5 poglavlja.

U **drugom poglavlju** je razmatrana potreba za smanjenjem zavisnosti od fosilnih goriva i većom upotrebom ekološki prihvatljivijih tehnologija za proizvodnju i skladištenje energije. Istaknut je značaj i primjena PEMFC u EES-u, konkretno u vozilima, kao i u postrojenjima u kojim se pomoću energije dobijene iz OIE vrši elektroliza vode pomoću koje se izdvaja vodonik (engl. *Power to Gas* - P2G). U drugom poglavlju je, takođe, dat detaljan opis svih komponenti PEMFC, princip rada ovih ćelija i opis matematičkog modela koji je najčešće korišten u literaturi (napon – struja karakteristika).

U **trećem poglavlju** je dat opis WaOA algoritma i njegovih hibridnih varijanti.

U **četvrtom poglavlju** je izveden matematički model struje u zavisnosti od napona i dat opis iterativnih metoda upotrijebljenih u matematičkom modelu.

Peto poglavlje je posvećeno pregledu rezultata iz dostupne literature, poređenju tih rezultata sa estimiranim parametrima preko različitih varijanti WaOA algoritma, kao i poređenju hibridnih varijanti sa aspekta brzine konvergencije i tačnosti estimacije.

U **zaključku** je dat sažetak rezultata istraživanja u ovom radu, kao i smjernice za buduća istraživanja.

2. GORIVNE ĆELIJE SA PROTONSKI PROVODLJIVOM MEMBRANOM

U bliskoj prošlosti su fosilna goriva bili glavni resursi za zadovoljenje globalnih energetske potreba. Danas postoji velika težnja čovječanstva da smanji zavisnost od fosilnih goriva. Ta težnja se javlja zbog:

- povećanja zagađenja prirode,
- povećanja koncentracije štetnih gasova,
- degradacije ozonskog omotača,
- pojave klimatskih promjena,
- globalnog zagrijavanja,
- neobnovljivosti fosilnih izvora,
- stalnog porasta potražnje za energijom i
- pojave ratova.

Napredak u prirodnim i društvenim naukama, kao i sam napredak tehnologije doveli su do poboljšanja kvaliteta života ljudi, pa i do povećanja potreba ljudi što je rezultiralo većom potražnjom za električnom energijom. Danas se sve više pažnje usmjerava ka OIE, među kojima vodeću ulogu imaju gorivne ćelije sa protonski provodljivom membranom [37]. Na slici 2.1 su prikazani grafici prognoze globalne energetske potrošnje do 2050. godine i prognoze globalne emisije CO₂ do 2060. godine. Ovi grafici su napravljeni na osnovu podataka:

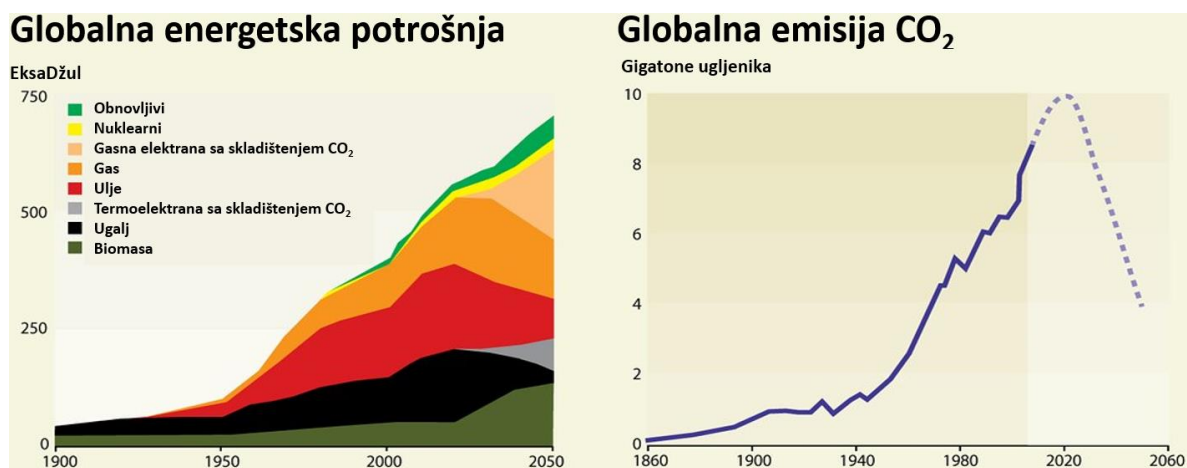
- sa Svjetskog savjeta energetike (*engl. WEC, World Energy Council*), 1998. godine,
- Međunarodne agencije za energetiku (*engl. IEA, International Energy Agency*), 2012. godine i
- iz Globalne studije izazova iz oblasti energetike (*engl. GEA, Global Energy Assessment*), 2012. godine.

Prikazani podaci ukazuju da se potražnja za energijom neprekidno povećava od 1950. godine ².

Od izuzetne važnosti je da čovječanstvo uloži napore kako bi i buduće generacije mogle imati sigurno i energetski efikasno snabdijevanje električnom energijom. Bitno je sačuvati dovoljne rezerve fosilnih goriva, jer zapravo te rezerve omogućavaju raznovrstan energetski miks i u budućnosti, a poznato je da postojanje izvora na fosilna goriva omogućava stabilnije upravljanje EES-om, zbog same inercije sistema [38]. Inercija u elektroenergetskom sistemu se odnosi na sposobnost sistema da održi stabilnost frekvencije nakon naglih promjena u proizvodnji ili potrošnji energije. Visoka inercija pomaže u stabilizaciji sistema jer kinetička energija rotirajućih masa (poput turbina u elektranama na fosilna goriva, nuklearnim elektranama) djeluje kao amortizer protiv brzih fluktuacija energije. Kada dođe do naglih promjena u opterećenju ili proizvodnji, kinetička energija ovih rotirajućih masa može privremeno nadoknaditi razliku, dajući sistemu vrijeme da se prilagodi [39]. Vodonik može poslužiti kao zamjena za fosilna goriva sa

² <https://www.grida.no/resources/6626>

aspekta održavanja stabilnosti EES-a, što se postiže skladištenjem energije u obliku vodonika [37, 40].



Slika 2.1. Grafici prognoze globalne energetske potrošnje do 2050. godine i prognoze globalne emisije CO₂ do 2060. godine

2.1 Značaj i primjena gorivnih ćelija

Jedan od glavnih izazova kod OIE je njihova nepredvidiva proizvodnja. Periodi kada ovi izvori proizvode najviše energije često ne odgovaraju periodima kada je potrošnja iste najveća, pa se u sistemu dešava preopterećenje tokom popodnevni sati, a noću podopterećenje [41]. Zelena električna energija dobijena iz OIE se može koristiti kako bi se vodonik izdvojio iz vode, u časovima kada imamo veliku proizvodnju iz OIE, a malu potražnju za električnom energijom. Taj izdvojeni vodonik bi se skladištio i koristio kao rezerva u časovima kada je mala proizvodnja, a velika potražnja za električnom energijom. Na taj način bi vodonik pomagao EES-u u očuvanju nominalne frekvencije [42]. Gorivne ćelije sa protonski provodljivom membranom mogu pružiti rješenje za skladištenje električne energije i prevazilaženje gore navedenih problema [37, 43].

U odsustvu fosilnih goriva, vodonik kao alternativno gorivo bi moglo da zadovolji buduće energetske potrebe, posebno za sektor transporta, koji troši oko 60% globalne energije i samim tim predstavlja jedan od glavnih zagađivača. Laganom automobilu je dovoljno 6kg vodonika da se može voziti na putu dugačkom 500 km. Ova tvrdnja je bazirana na efikasnosti vodoničnih gorivnih ćelija, koje su veoma efikasne u pretvaranju hemijske energije vodonika u električnu energiju. Vodonik ima vrlo visok energetski sadržaj po jedinici mase (oko 120 MJ/kg) [44]. To znači da mala količina vodonika može proizvesti mnogo energije [37, 45].

Vodeće energetske kompanije smatraju da je vodonik kao gorivo najmanje opasan po energetski sistem [46]. U budućnosti, EES koji se oslanja na “zelene tehnologije” proizvodnje električne energije sa nultom emisijom CO₂ treba da snabdijeva transportni sektor [47], sektor za grijanje i elektrifikaciju domaćinstava [48], industriju [49]. Poznato je da ovi sektori zajedno čine dvije trećine globalnih CO₂ emisija [37].

Vodonik se smatra gorivom budućnosti zbog male atomske mase, nultih emisija i zbog svoje ogromne energetske vrijednosti [44]. Pri visokim temperaturama,

sagorijevanjem nafte nastaju oksidi azota koji zagađuju atmosferu. Kako vodonik ima veću energiju po jedinici mase od nafte, vodonik predstavlja efikasan izvor energije za automobile, prenosive elektronske uređaje i slično [37, 50].

2.2 Primjena PEMFC u P2G sistemima

Gahleitner [51] je u svom radu analizirao pilot projekte za proizvodnju vodonika iz električne energije u postrojenjima za tu namjenu. U P2G postrojenju se pomoću energije dobijene iz OIE vrši elektroliza vode pomoću koje se izdvaja vodonik. Vodonik se koristi kao gorivo za PEMFC i u trenucima kad je to potrebno proizvodi se električna energija. Ovo postrojenje se sastoji iz sljedećih komponenti [51]:

- obnovljivi izvor električne energije,
- elektrolizator,
- baterije,
- konvertor,
- rezervoari za skladištenje vodonika i
- gorivne ćelije sa protonski provodljivom membranom.

Elektrolizator je uređaj koji koristi električnu energiju za razlaganje vode (H_2O) na vodonik (H_2) i kiseonik (O_2). Postoje različite vrste elektrolizatora [44]:

- alkalni elektrolizatori,
- elektrolizatori sa protonski provodljivom membranom (engl. *Proton Exchange Membrane - PEM*) i
- elektrolizatori sa čvrstim oksidom kao elektrolitom (engl. *Solid Oxide Electrolysis Cells - SOEC*).

Alkalni elektrolizatori koriste 20% do 30% koncentracioni vodeni rastvor ($KOH/NaOH$) kao elektrolit. Alkalna elektroliza se vrši na nižim temperaturama, od 30–80°C [44]. Alkalni elektrolizatori se uglavnom koriste za proizvodnju vodonika, jer su komercijalno dostupni. Iako je njihov pouzdan rad prepoznat u nekoliko projekata [51], javljaju se problemi sa nečistoćom vodonika i degradacijom elektrolizatora. Alkalna elektroliza ima negativne aspekte kao što su ograničene gustine struje (ispod 400 mA/cm²), nizak radni pritisak i niska energetska efikasnost [44]. Životni vijek alkalnih elektrolizatora je duži, a godišnji troškovi održavanja su niži u poređenju sa PEM elektrolizatorom [52].

PEM elektrolizatori se sve češće koriste od 2003. godine, jer su bolje prilagođeni za fluktuirajuće izvore energije, kao što su OIE, i zato što postižu veći stepen čistoće vodonika i imaju jednostavniji dizajn [51]. Ovi elektrolizatori koriste ovlaženu polimernu membranu kao elektrolit i plemenite metale poput platine i iridijum oksida kao elektrokatalizatore. Ovaj elektrolizator radi na temperaturama od 50 do 80°C i radnim pritiscima do 30 bara. Ovi elektrolizatori se često koriste za dinamičan rad zbog kratkog vremena pokretanja i širokog raspona fleksibilnosti opterećenja [52]. Tehnologija PEM elektrolize vode veoma je slična tehnologiji PEM gorivnih ćelija, kod kojih se koriste čvrste polisulfonatne membrane, poput Nafiona kao elektrolit (provodnik protona). Neke od

prednosti ovih membrana za razmjenu protona su niska propustljivost za gasove i visoka provodljivost protona. PEM elektroliza vode se izdvaja kao jedna od najefikasnijih metoda za pretvaranje obnovljive energije u visokokvalitetni vodonik [44].

SOEC elektrolizatori koriste čvrsti oksid kao elektrolit. Isti rade na visokim temperaturama i mogu biti efikasniji, ali nisu često korišćeni u pilot projektima [51]. Ova elektroliza je takođe poznata kao visokotemperaturna elektroliza (engl. *High-Temperature Electrolysis* - HTEL) ili parna elektroliza, jer se voda pretvara u vodonik i kiseonik na temperaturama između 700 i 900°C. Pored toga, korozivno svojstvo elektrolizatora zahtijeva dalji razvoj i unapređenje materijala ovog elektrolizatora [52].

Baterije se koriste za kratkotrajno skladištenje viška električne energije kada je velika proizvodnja iz OIE, a potrošnja energije mala. U periodu niske potrošnje iz OIE, što je obično period noćnih sati, baterije mogu osloboditi skladištenu električnu energiju i samim tim spriječiti isključenje elektrolizatora. S druge strane, u periodu visoke potrošnje iz OIE, baterije mogu skladištiti višak električne energije kako bi omogućili elektrolizatoru da nastavi normalno da radi, bez isključenja. Baterije omogućuju elektrolizatorima da rade u optimalnom režimu, smanjuju potrebu za čestim uljučivanjem i isključivanjem elektrolizatora zbog promjena u potrošnji i proizvodnji električne energije, odnosno imaju značajnu ulogu u smanjenju ciklusa elektrolizatora [53]. Svaki put kada se elektrolizator uključi i isključi, komponente unutar uređaja doživljavaju termički i mehanički stres, što vremenom može dovesti do degradacije i smanjenja efikasnosti uređaja [54].

Teškoće u usklađivanju rada elektrolizatora i OIE, u većini sistema, mogu se riješiti upotrebom DC/DC pretvarača. Rad uz DC/DC pretvarač omogućava svakom uređaju da radi u svom optimalnom opsegu snage [53]. Primjena DC/DC pretvarača omogućava elektrolizatoru da funkcioniše i pri brzim promjenama opterećenja, da radi pri visokim strujama, a isti štiti uređaj od brzih promjena napona. Nedostatak koji se javlja prilikom instalacije DC/DC pretvarača je smanjenje efikasnosti. S obzirom na to da postoji značajan energetska gubitak kada se koriste pretvarači, važno je koristiti one sa visokom efikasnošću [51].

AC/DC konvertori pretvaraju naizmjeničnu struju koju proizvode vjetroelektrane u jednosmjernu struju koja se može koristiti za elektrolizu vode i skladištenje u baterijama. Oni se takođe koriste kada P2G sistem koristi energiju iz javne mreže [55].

U P2G sistemima, vodonik se može skladištiti na nekoliko načina kako bi se osigurala efikasna i sigurna upotreba. Glavne metode skladištenja vodonika uključuju upotrebu visokopritisnih rezervoara, kriogeno skladištenje i skladištenje preko metal hidrida [51]. Za razliku od skladištenja električne energije u bateriji, vodonik je teško skladištiti i transportovati [56]. Skladištenje vodonika zahtijeva posebne mjere obazrivosti i sigurnosti, jer je visoko zapaljiv i lako se oksiduje u kontejnerima i cjevovodima [37].

Vodonik se skladišti najčešće korišćenjem visokopritisnih rezervoara, zato što je taj način komercijalno najzastupljeniji [51]. Obično je potreban rezervoar visokog pritiska za skladištenje vodonika u gasovitom stanju (pritisak rezervoara 350–700 bara) [57]. Zbog visokog pritiska, čvrstoća rezervoara predstavlja problem. Čelik visoke čvrstoće je pogodan materijal za rezervoare zbog visoke efikasnosti, ali postoje problemi sa vezivanjem vodonika [37]. Kod skladištenja vodonika pod visokim pritiskom, vodonik može izazvati krhkost ili oslabiti materijal rezervoara zbog svoje sposobnosti da prodiere u strukturu materijala [58]. Druge opcije za materijale uključuju nerđajući čelik ili kompozitne cilindre [37]. Skladištenje pod visokim pritiskom zahtijeva rad hidrogenskog kompresora, što smanjuje efikasnost cjelokupnog sistema [51].

Najveći problem sa skladištenjem vodonika u tečnom obliku je održavanje kriogenih temperatura (20,28 K ili $-252,87^{\circ}\text{C}$) [59]. Postoje dobro izolovani kontejneri, ali vremenom, tečni vodonik dolazi u dodir sa toplotom, pretvara se u gas i mora se osloboditi kako bi se izbjegao prekomjerni pritisak [60]. Tečni vodonik zauzima mnogo manju zapreminu u poređenju sa vodonikom u gasovitom stanju, odnosno ima znatno veću gustinu od gasovitog vodonika (približno 848 puta veću gustinu od gustine gasovitog vodonika). Skladištenje i transport na tako niskim temperaturama zahtijevaju specijalizovanu opremu i infrastrukturu, što može biti skupo i tehnički izazovno [61].

Vodonik se skladišti u čvrstom stanju kao dio hemijske veze. Za skladištenje vodonika u čvrstom stanju su istraživani različiti materijali kao što su složeni metalni hidridi, aktivni ugljenici i drugi porozni materijali. Materijali poput kompozita koji se koriste za rezervoare, za skladištenje vodonika u gasovitom stanju, stvaraju probleme u pogledu bezbjednosti i težine rezervoara, i čvrstoće materijala, dok problemi povezani sa skladištenjem tečnog vodonika uključuju gubitke energije zbog curenja. Rješenje za gore pomenute probleme je skladištenje vodonika u čvrstom stanju, u kojem se vodonik fizički ili hemijski miješa sa određenom supstancom, a vodonik se može odvojiti u bilo kom trenutku putem termalne katalize [62]. U slučaju fizički vezanog vodonika, gasoviti vodonik se zadržava na materijalima kao što su složeni metalni hidridi, koji stabilizuju vodonik zahvaljujući svojim hemijskim svojstvima [63].

Za proizvodnju električne energije se obično koriste gorivne ćelije vodonika, posebno u periodima kada je potražnja za električnom energijom visoka i kada proizvodnja iz obnovljivih izvora nije dovoljna [54].

Rezultati razmatranja u radu [51] ukazuju na to da je mnogo veća količina energije proizvedena uz postojanje ovih postrojenja koja koriste vodonik kao gorivo, nego u slučaju kada imamo samo proizvodnju iz OIE. Ključni razlog za efikasnost ovih postrojenja je njihova sposobnost skladištenja električne energije u vidu vodonika kao goriva koje se može koristiti za proizvodnju električne energije kada je to potrebno, odnosno kada je potražnja za električnom energijom mnogo veća. U trenucima kada imamo veliku proizvodnju iz OIE, a s druge strane imamo malu potražnju od strane konzuma, dešavaju se zagušenja prenosnih kapaciteta, pa je veliki izazov izbalansirati takav sistem i operatori prenosnog sistema moraju biti prinuđeni da isključe neke OIE da bi se održala stabilnost sistema. Sa aspekta troškova, takva akcija predstavlja veliki energetska i ekonomski gubitak. Stoga, postrojenja za skladištenje vodonika i elektrane za proizvodnju električne energije iz gorivnih ćelija vodonika pomažu u tim kritičnim situacijama da se sistem održi u ravnoteži, ali i da se ostvari profit [51].

Što je više koraka uključeno u dobijanje energije iz vodonika, efikasnost procesa opada. Proizvodnja, upotreba i skladištenje su tri glavna koraka u eksploataciji vodonika. Trenutno, maksimalna efikasnost postignuta procesom elektrolize vode iznosi 86%, uključujući proces recikliranja toplote [64]. Gorivna ćelija sa protonskom membranom ima efikasnost oko 60%, što je više od efikasnosti baterije [37].

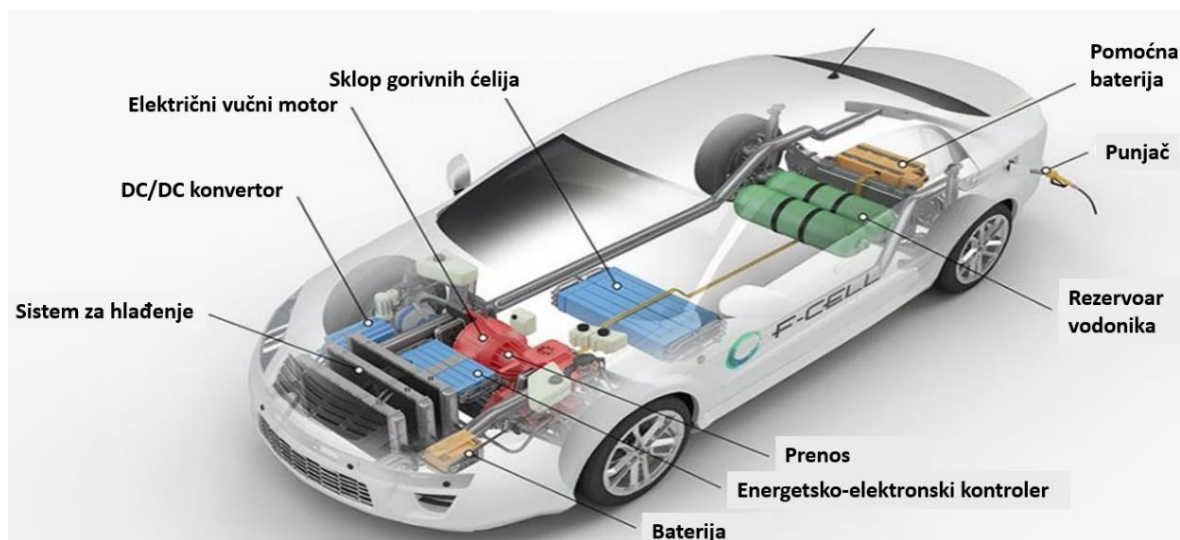
2.2.1 PEMFC u vozilima

Ugljen-dioksid koji emituju vozila na fosilna goriva ozbiljno ugrožava životnu sredinu i direktno utiče na klimu. U izvještaju 2020. godine Evropska agencija za životnu sredinu je zaključila da više od 70% emisija uzrokuju vozila. Shodno tome, vlasti većine razvijenih zemalja podstiču kroz razne zakone i subvencije upotrebu različitih vrsta električnih vozila (električna vozila sa gorivnim ćelijama, električna vozila sa baterijama, hibridna vozila,

vozila sa baterijom i motorom sa unutrašnjim sagorijevanjem) kako bi se smanjile emisije CO₂. Smanjenje upotrebe vozila na fosilna goriva još uvijek se suočava sa problemima, kao što je relativno visoka cijena električnih vozila i nepostojanje stanica za punjenje [65].

Električna vozila na vodonik se pune za manje od 10 minuta, što je mnogo manje u poređenju sa brzinom punjenja električnih vozila i predstavlja njihovu značajnu prednost [66]. Pored toga, vozila na vodonik su mnogo lakša u poređenju sa vozilima na baterije, što je korisno za teška vozila kao što su kamioni i autobusi. Gorivne ćelije sa protonski provodljivom membranom nalaze primjenu u brodovima. Baterija je sastavljena od vrlo opasnih materijala kao što su kobalt, olovo i litijum, koji nisu ekološki prihvatljivi. PEMFC se uglavnom sastoji od polimera i grafita, koji su ekološki prihvatljivi i lako dostupni [37].

Električno vozilo na gorivne ćelije (engl. *Fuel Cell Electric Vehicle* - FCEV) sa slike 2.2 koristi električni motor kojeg napaja električna energija dobijena kombinacijom gorivne ćelije i baterije. Gorivna ćelija koristi vodonik za generisanje električne energije. Baterije u ovim vozilima prikupljaju energiju pri kočenju (regenerativno kočenje), čime obezbjeđuju dodatnu energiju tokom ubrzanja [37]. Pošto je primarno gorivo vodonik, količina energije koju FCEV može da isporuči je određena zapreminom rezervoara za vodonik dostupnog u vozilu [65].

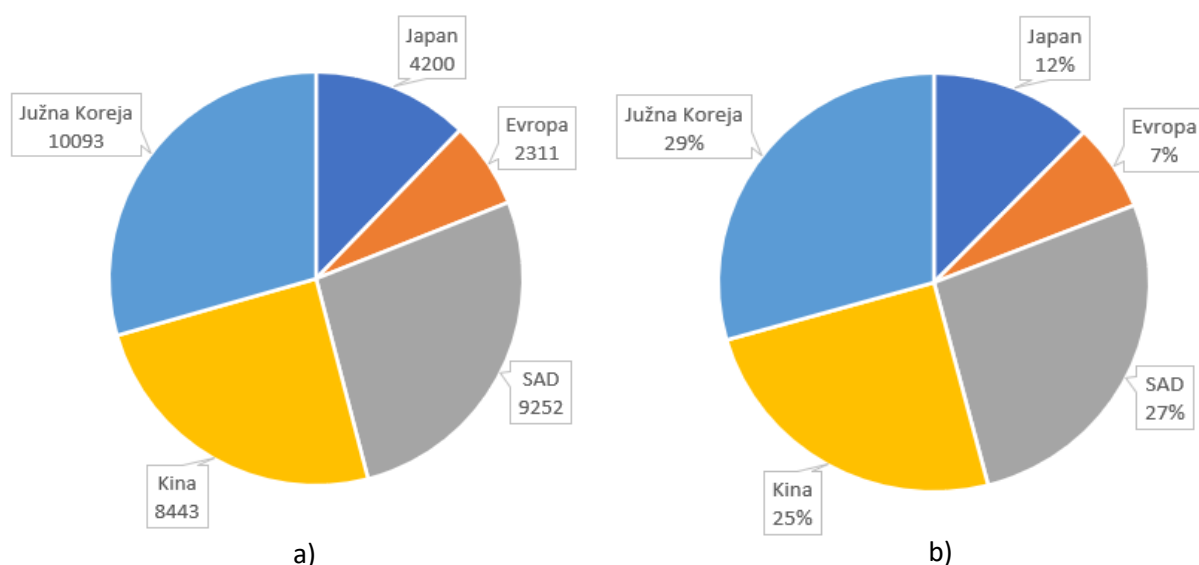


Slika 2.2. Komponente FCEV

Kod FCEV vozila je količina vodonika u vozilu mnogo lakša od baterijskog paketa za ostale vrste vozila sa baterijama. Vodonik koji koriste FCEV ima znatno veću specifičnu energiju – oko 120 MJ/kg, u poređenju sa približno 44 MJ/kg kod benzina [67]. Značajne prepreke za brzu penetraciju FCEV-ova su visoki troškovi i nedostatak infrastrukture za punjenje [65, 68].

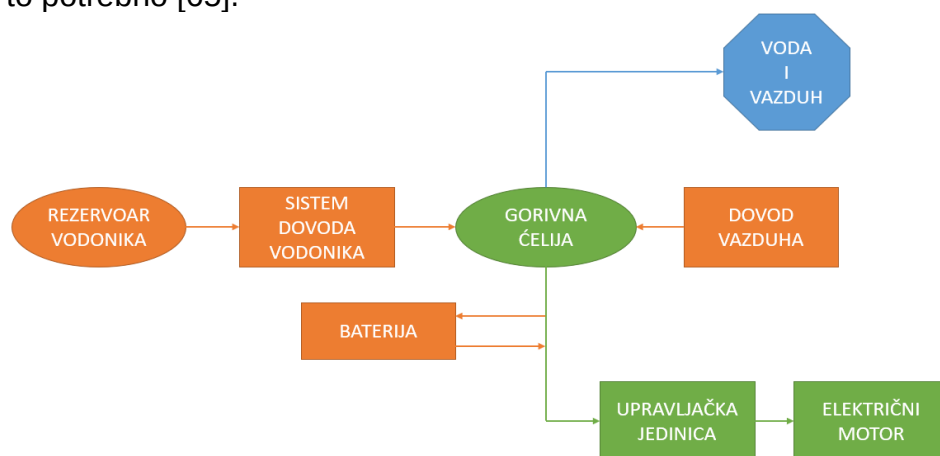
Upotreba vozila na gorivne ćelije (FCEV) u transportnom sektoru je, u koraku sa tehnološkim napretkom, porasla širom svijeta, dostigavši skoro 35000 FCEV-ova, dok je do kraja 2020. godine otvoreno skoro 600 stanica za punjenje vodonika. Na slici 2.3 a) i b) je prikazana raspodjela FCEV-ova u razvijenim zemljama na kraju 2020. godine. Na osnovu pomenutih slika se može primijetiti da Južna Koreja prednjači u primjeni FCEV-ova, praćena Kinom, SAD-om, Japanom i Evropom [69, 70]. Može se zaključiti da 66% FCEV-ova trenutno cirkuliše u Aziji, dok je u SAD-u 27%, a u Evropi samo 7%. Između

2017. i 2020. godine, broj FCEV-ova povećan je pet puta, sa 7186 FCEV-ova u 2017. na skoro 35000 FCEV-ova u 2020 [65, 69].



Slika 2.3 Upotreba FCEV vozila u svijetu **a)** u brojkama, **b)** u procentima

Kod vozila sa gorivnim ćelijama, sistem se sastoji od sklopa gorivnih ćelija i pridruženih podsistema. Kao što se vidi na slici 2.4, sklop gorivnih ćelija vodonika je centralni dio koji pretvara hemijsku energiju u električnu koja služi za napajanje električnog motora. Baterija, kao drugi izvor energije, može i da akumulira i da isporučuje energiju. Svaka akcija je kontrolisana putem upravljačke jedinice, odnosno sistema za upravljanje energijom (*engl. EMS – Energy Management System*). Dodatna četiri podsistema uključuju dovod vazduha, dovod vodonika, upravljanje toplotom i upravljanje vodom. Primarna funkcija sistema za dovod vodonika je usmjeravanje vodonika iz rezervoara do sklopa gorivnih ćelija. Istovremeno, kiseonik se dovodi do sklopa PEMFC iz sistema za dovod vazduha, koji se sastoji od filtera za vazduh, ovlaživača i kompresora za vazduh. U međuvremenu, osnovna funkcija sistema za upravljanje toplotom i vodom je da odvaja vodu i reciklira toplotu koja se može koristiti za zagrijavanje kabine vozila kada je to potrebno [65].



Slika 2.4. Podsistemi FCEV-a

Iako se FCEV čine kao najbolja alternativa vozilima na fosilna goriva, i dalje postoji prostor za poboljšanje. Glavni nedostatak koji usporava penetraciju FCEV-a je njihova niska brzina reakcije. Ovaj problem bi mogao biti riješen kombinovanjem superkondenzatora, baterije i gorivnih ćelija u vozilu. Taj sistem je poznat kao sistem gorivne ćelije-baterije-superkondenzator (engl. *Fuel Cells-Battery-Supercapacitor*, FC-BAT-SCAP), gdje gorivne ćelije ostaju glavni izvor energije za vozilo. Superkondenzator se aktivira pri pokretanju vozila radi bržeg odziva snage, a zatim se vozilo prebacuje na napajanje iz gorivnih ćelija. U radovima [71, 72], autori su predložili kombinaciju FC-BAT-SCAP. Predviđeno je da DC-AC inverter kontroliše i usklađuje SCAP i električni motor [65].

2.2.2 Ostala upotreba

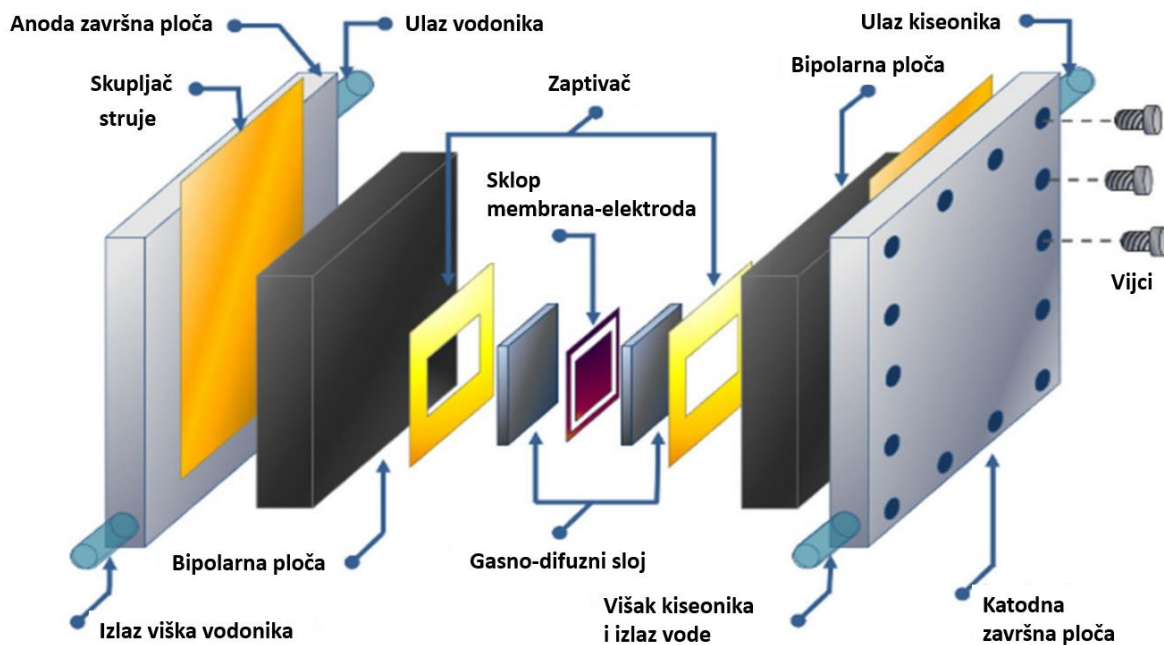
Za komercijalnu, rezidencijalnu, rezervnu proizvodnju energije i industrijsku upotrebu koriste se stacionarne gorivne ćelije. Na udaljenim lokacijama, gorivne ćelije su veoma korisne kao izvori energije za meteorološke stanice, komunikacione centre, vojne aplikacije itd. Gorivne ćelije koje koriste vodonik su kompaktne i lagane, jer u gorivnim ćelijama nema pokretnih djelova. Efikasnost stacionarnih gorivnih ćelija se kreće između 40% i 60%. Kogeneracioni sistemi gorivnih ćelija, uključujući mikro-kombinovane sisteme za proizvodnju toplote i energije (engl. *Micro Combined Heat and Power Systems* - MicroCHP), koriste se za fabrike i domove. Sistem generiše električnu energiju, a istovremeno proizvodi toplotu i vodu. Efikasnost kogeneracionog sistema može biti do 85%. Gorivna ćelija koja generiše manje od 5 kW može se nazvati prenosivom gorivnom ćelijom. Mikro-gorivna ćelija se može upotrijebiti u laptopovima i telefonima. Ista može biti vrlo efikasna i ekološki prihvatljiva alternativa litijum-jonskim baterijama. Jedini nedostatak mikro gorivne ćelije je više elemenata u njenom sistemu (ćelija, neophodno gorivo i periferni priključci) što dovodi do povećanja težine. Intenzivna istraživanja na smanjenju težine sistema gorivnih ćelija sprovode se širom svijeta [37].

2.3 Opis gorivnih ćelija vodonika

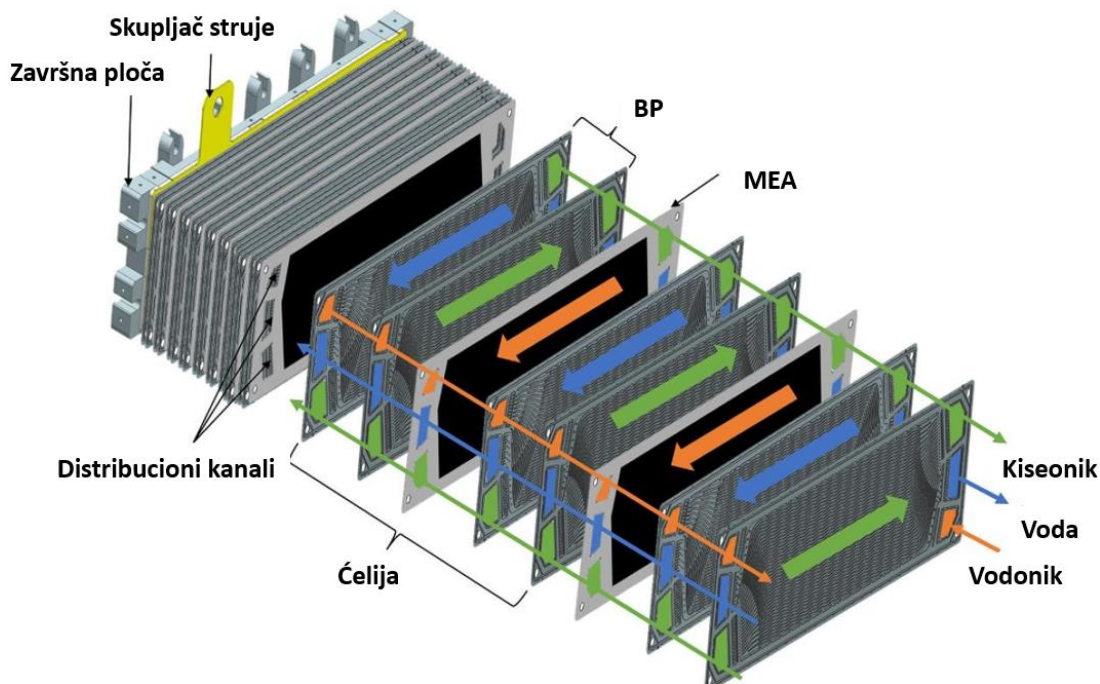
Značajne prednosti PEMFC su: niske radne temperature, visoka efikasnost, minimalno održavanje, dug vijek trajanja i kompaktnost. Pored toga, nepostojanje pokretnih djelova kod gorivnih ćelija omogućava nečujan rad. Pojedinačne gorivne ćelije su sposobne da proizvode električni potencijal manji od 1 V. Kada je potrebna mnogo veća snaga, odgovarajući broj pojedinačnih ćelija se serijski povezuje i formira se PEMFC sklop.

Slika 2.5 prikazuje različite komponente jedne PEMFC. Jezgro PEMFC-a je sklop membrana - elektrode (engl. *Membrane Electrode Assembly* – MEA), koji se sastoji od anodne i katodne elektrode, od katalitičkih materijala, kao i od polimerne membrane koja razdvaja anodu i katodu. Sa obje strane MEA se nalazi gasno – difuzioni sloj (engl. *Gas Diffusion Layer* - GDL). Oko GDL-a se nalaze zaptivači koji sprečavaju curenje gasova. Oko njih su bipolarne ploče (engl. *Bipolar Plates* - BP). Nakon bipolarnih ploča su kolektori struje, a nakon kolektora struje, i sa anodne i sa katodne strane su završne ploče ćelije. Konverzija energije se vrši putem dvije reakcije: reakcije oksidacije vodonika i reakcije redukcije kiseonika [73]. Na slici 2.6 je prikazan dio sklopa gorivnih ćelija koji je sastavljen

od naizmjenično složenih MEA, GDL, BP i zaptivača, sa kolektorima struje i završnim pločama postavljenim na oba kraja pod određenim pritiskom [74].



Slika 2.5. Komponente gorivne ćelije vodonika



Slika 2.6. Dio PEMFC sklopa

PEMFC mora obavljati sledeće zadatke:

- dovod vodonika i kiseonika do odgovarajućih elektroda,
- uklanjanje nusproizvoda,

- prenos elektrona do spoljašnjeg opterećenja,
- transport H^+ jona kroz membranu,
- kontrola vlažnosti membrane,
- održavanje temperature na optimalnom nivou, itd³.

2.3.1 Bipolarna ploča

Jedna od osnovnih komponenti PEMFC je BP, koja čini oko 80% mase gorivne ćelije. BP ima sljedeće funkcije: razdvajanje vodonika, kiseonika, obezbjeđivanje kanala za anodne i katodne reakcije gasove, otpornost na koroziju PEMFC-a, disipaciju toplote i ispuštanje reakcione vode. Trenutno je ključni problem u materijalima za bipolarne ploče kako postići visoku otpornost na koroziju i osigurati dugotrajnost cijelog sistema uz razumnu provodljivost. BP-ovi za vodonične gorivne ćelije su dostupni u različitim materijalima na tržištu: grafit, metal i kompozit više materijala [74].

Grafit je najčešće korišćen materijal za BP, pokazuje izvrsnu hemijsku stabilnost. Međutim, grafit ima visoku poroznost, nisku mehaničku čvrstoću i veliku krhkost. Zato grafitni BP obično mora biti debeo da bi se spriječila penetracija radnog gasa i da bi se zadovoljili zahtjevi mehaničkih svojstava, što dovodi do velike zapremine i mase. Iako su nedavno proizvedeni grafitni BP-ovi sa poboljšanim mehaničkim svojstvima i smanjenim troškovima [75], oni i dalje ne ispunjavaju željene zahtjeve i stoga su ograničeni u primjeni.

Metali se mogu lako obraditi u izuzetno tanke BP za PEMFC i nude nekoliko prednosti, kao što su visoka čvrstoća, dobra toplotna provodljivost i niski troškovi. Usled promjena napona PEMFC i dugotrajne izloženosti korozivnim elektrolitima, metalni BP može korodirati. Štaviše, neki metalni BP mogu formirati oksidni sloj, što značajno povećava međupovršinski kontaktni otpor (engl. *Interfacial Contact Resistance* - ICR) između metalnog BP i GDL. Metalni joni nastali korozijom metala mogu kontaminirati MEA i smanjiti efikasnost gorivne ćelije. Stoga, površinska modifikacija metalnog BP je neophodna kako bi se izbjegla korozivnost gorivnih ćelija. Zanimljivo je da su površinski modifikovani metali pokazali bolju otpornost na koroziju i niži ICR od neprevučenih metala [74].

Kompozitni BP-ovi su sastavljeni od dva ili više materijala, pokazujući sinergijski efekat otpornosti na koroziju grafita i visoke čvrstoće metala, optimizujući time mehanička svojstva BP-a. Ovi kompozitni BP-ovi mogu biti bazirani na ugljeniku ili metalu. Međutim, metalno - kompozitne BP je teško masovno proizvoditi zbog složene strukture i procesa pripreme, što povećava troškove proizvodnje [74].

2.3.2 Sklop membrana - elektrode

MEA je najvažnija komponenta gorivne ćelije, koja funkcioniše kao interfejs za prenos gasova i mjesto elektrohemijske reakcije. MEA se uglavnom sastoji od elektroda, katalitičkog sloja (engl. *catalyst layer* - CL) i PEM-a. Između katode i anode se nalazi PEM. Membrana sadrži u sebi kanale za prenos protona od anode do katode. Da bi se smanjio otpor pri prenosu protona (H^+), potrebno je formirati efikasne jonske kanale u sloju katalizatora. To se postiže dodavanjem Nafiona (polimerni materijal), koji je poznat po

³ <https://home.iitk.ac.in/~kamalkk/fuelcell.htm>

svojoj sposobnosti da provodi protone, čime se omogućava bolji protok protona kroz čvrsti elektrolit [76].

2.3.3 Membrana za razmjenu protona

Protonski provodljiva membrana je čvrsta elektrolitna membrana i ključna komponenta gorivne ćelije. Funkcija polimerne elektrolitne membrane je transport protona od anode do katode. Njene glavne funkcije su razdvajanje gasova reakcije - vodonika i kiseonika, provođenje protona i nemogućnost provođenja elektrona. Membrana provodi isključivo H^+ jone. U cilju postizanja dobrih performansi, membrana treba da posjeduje sljedeće karakteristike [73]:

- visoku protonsku provodljivost,
- dobru hemijsku stabilnost za poboljšanje životnog vijeka ćelije,
- dobre termičke karakteristike, otporne na degradaciju pri visokim temperaturama,
- dobre mehaničke osobine kako bi se osigurale minimalne ili nikakve promjene oblika pri prelasku između suve i vlažne faze tokom rada gorivne ćelije,
- nisku propustljivost gasova,
- nisku cijenu, itd.

Kod PEMFC postoje tri tipa membrana: perfluorisani PEM-ovi, djelimično fluorisani polimerni PEM-ovi i nefluorisani polimerni PEM-ovi. Trenutno je perfluorisana PEM najrasprostranjenija. Membrane zasnovane na perfluorosulfonskim kisjelinama (PFSA), kao što je Nafion, najčešće se koriste zbog svoje visoke provodljivosti i dobrih hemijskih i mehaničkih osobina. Membrane zasnovane na PFSA se koriste na temperaturama ispod $90^{\circ}C$ i u uslovima visoke relativne vlažnosti. Kod PEMFC sa Nafion membranom, koje rade na niskim temperaturama (engl. *Low-Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell*, LT-PEMFC), je glavni nedostak snažan pad provodljivosti protona na temperaturama iznad $90^{\circ}C$, zbog gubitka molekula vode. Ova praktična ograničenja su podstakla pojavu PEMFC koje rade na srednjim temperaturama (engl. *Intermediate-Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell*, IT-PEMFC) i visokim temperaturama (engl. *High-Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell*, HT-PEMFC). One rade, redom, na temperaturama između $100-150^{\circ}C$ i $120-200^{\circ}C$. Osim gore navedenog nedostatka, LT-PEMFC ima sljedeće mane: visoke troškove materijala, proces pripreme i odlaganje otpada PFSA membrane izazivaju zagađenje životne sredine [73].

Kod PEMFC koje rade na srednjim temperaturama obično se koriste SPEEK (sulfonovani polietereketon) membrane jer imaju dovoljnu stabilnost da rade na srednjim temperaturama. Ograničavajući faktor koji je smanjio upotrebu SPEEK membrana u poređenju sa membranama baziranim na perfluorisanim polimerima je vijek trajanja membrane, jer je njegov radni vijek inferioran u odnosu na Nafion u sličnim uslovima rada gorivne ćelije [73, 77].

Dobre performanse u PEMFC pokazuju novi tipovi razgranatih polimera baziranih na PBI (polibenzimidazol). Generalno, polimeri bazirani na PBI imaju odličnu termičku i mehaničku stabilnost. S obzirom na njihovu visoku termičku stabilnost, PBI polimeri i njihovi derivati su se pojavili kao potencijalni kandidati za upotrebu u HT-PEMFC. Uprkos svojoj izuzetnoj termičkoj i mehaničkoj stabilnosti, provodljivost PBI-a je niska i ove

membrane zahtijevaju dopiranje sa neorganskim kisjelinama. Kada se PBI dopira kisjelinom, provodljivost oko 0.1 S/cm se lako postiže, čak i u suvim uslovima. Vrijednost provodljivosti je najveća sa fosfornom kiselinom [73].

2.3.4 Sloj katalizatora

Gas se prenosi kroz kanale, zbog čega materijal katalitičkog sloja mora biti porozan kako bi se postigla bolja efikasnost reakcija u gorivnoj ćeliji. Nusproizvod reakcije, voda, mora biti efikasno uklonjena kako bi se izbjeglo potapanje CL-a u vodu, što bi uzrokovalo nemogućnost prolaza gasa. Trenutno su katalitički slojevi PEMFC-ova bazirani na platini (Pt) i zato su skupi. Platinski katalizatori i njihove legure obično pokazuju visoke katalitičke aktivnosti, stabilnost i dugotrajnost. Uloženi su veliki naponi u razvoj jeftinih, efikasnih, visoko aktivnih, ekološki prihvatljivih i stabilnih elektrokatalizatora, jer je elektrokatalizator ključna komponenta za funkcionisanje PEMFC. Novi elektrokatalitički materijali, kao što su metali, metalni oksidi i nemetali, široko su testirani za upotrebu. Naučnici se fokusiraju na poboljšanje efikasnosti materijala koji bi imali visoku katalitičku aktivnost, u cilju smanjenja upotrebe skupe platine u PEM gorivnim ćelijama [73].

2.3.5 Sloj za difuziju gasa

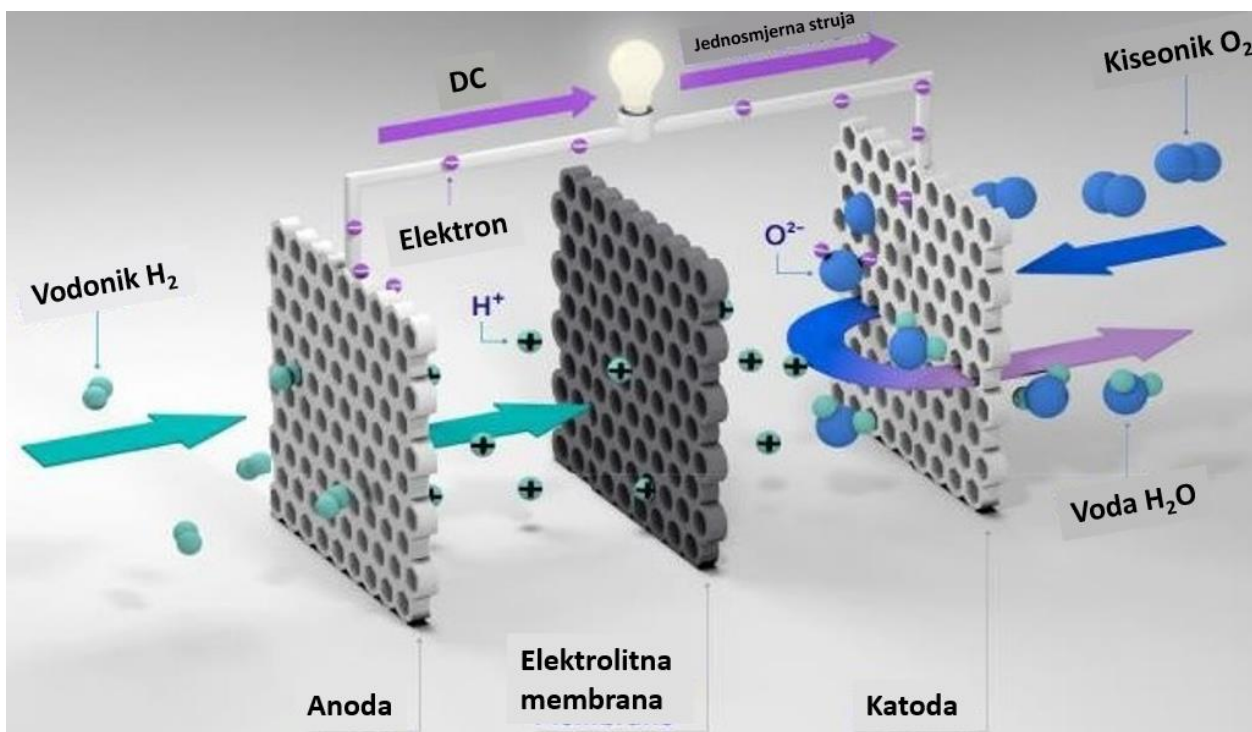
Gasno-difuzioni sloj je sastavljen od ugljenika i koristi se sa obje strane anode i katode gorivne ćelije. GDL ima važnu ulogu u ravnomjernoj raspodjeli gasa, kontroli količine vlažnosti membrane, provodljivosti elektrona i toplote. GDL je dizajniran da bude porozan kako bi mogao da obavlja ove funkcije. Pore u GDL-u regulišu prenos reaktanata u jednom smjeru i vode kao nusproizvoda u suprotnom smjeru, dok čvrsta struktura GDL-a omogućava prenos elektrona i toplote. GDL je direktno povezan sa kanalom za protok na bipolarnoj ploči kako bi mehanički podržao provodljivost elektrona, difuziju gasova reakcije i odvod vode [74].

2.4 Princip rada gorivnih ćelija vodonika

Princip rada PEMFC-a je sljedeći: gorivo (vodonik - H_2) dolazi do anode, odnosno do površine anodnog katalizatora difuzijom i razlaže se na pozitivno naelektrisane protone (H^+) i negativno naelektrisane elektrone (e^-), pod dejstvom anodnog katalizatora. Protoni dolaze do katode kroz protonski provodnu membranu, a elektroni teku do katode kroz opterećenje duž spoljašnjeg kola. U isto vrijeme, kiseonik (O_2) dolazi do površine katodnog katalizatora difuzijom. Pod dejstvom katodnog katalizatora, elektroni, protoni i kiseonik prolaze kroz reakciju redukcije kiseonika i formiraju vodu⁴.

Slikoviti prikaz principa rada PEMFC dat je na slici 2.7 [78].

⁴ <https://cheersonic-liquid.com/en/operating-principle-of-pemfc>



Slika 2.7. – Princip rada PEMFC

Za optimalan rad ćelije potrebno je da membrana provodi jone vodonika (protone), ali ne i elektrone, jer bi provođenje elektrona kroz membranu izazvalo kratak spoj u gorivnoj ćeliji. Membrana ne smije dozvoliti prelazak gasova (vodonika ili kiseonika) s jedne strane ćelije na drugu. Veoma je bitno da ne dođe do prelaska gasova sa jedne strane na drugu, jer bi to moglo narušiti efikasnost i sigurnost gorivne ćelije. Ako bi došlo do prelaska gasova sa jedne strane na drugu, moglo bi doći do neželjenih reakcija koje bi mogle smanjiti performanse ćelije ili izazvati njeno oštećenje [78].

2.5 Napon - struja modelovanje PEM gorivne ćelije

U ovom podpoglavlju je opisan matematički model koji je korišten u dosadašnjoj literaturi za estimaciju parametara PEMFC - model zavisnosti napona od struje ($U=f(I)$ model) [27-36].

Izlazni napon gorivne ćelije (V_{sklopa}) je predstavljen na sljedeći način [79]:

$$V_{sklopa} = N_{ćelija} \cdot (E_{Nernst} - V_{akt} - V_{\Omega} - V_{konc}), \quad (1)$$

gdje je:

- $N_{ćelija}$ - broj serijski povezanih gorivnih ćelija,
- E_{Nernst} - reverzibilni termodinamički potencijal ćelije,
- V_{akt} - aktivacioni prenapon (dodatni potencijal) ćelije,
- V_{Ω} - pad napona na ćeliji i

- V_{konc} - koncentracioni prenapon ćelije.

E_{Nernst} se može izračunati iz Nernstove relacije, na sledeći način [30, 31, 32]:

$$E_{Nernst} = 1.229 - 0.85 \cdot 10^{-3} \cdot (T_{fc} - 298.15) + 4.3085 \cdot 10^{-5} \cdot T_{fc} \cdot \log(P_{H_2} \cdot \sqrt{P_{O_2}}), \quad (2)$$

gdje je:

- T_{fc} - radna temperature ćelije,
- P_{H_2} - parcijalni pritisak vodonika u atmosferama i
- P_{O_2} - parcijalni pritisak kiseonika u atmosferama.

Nernstova jednačina predstavlja odnos između idealnog standardnog potencijala za reakciju gorivne ćelije i idealnog ravnotežnog potencijala pri drugim temperaturama i pritiscima reagensa i proizvoda. Kada je poznat idealni potencijal u standardnim uslovima, idealni napon se može odrediti na drugim temperaturama i pritiscima korišćenjem ovih jednačina. Prema Nernstovoj jednačini za oksidaciju vodonika, idealni potencijal ćelije pri određenoj temperaturi može se povećati radom ćelije pri višim pritiscima reagensa⁵.

V_{akt} predstavlja aktivacioni prenapon ćelije koji je potreban za aktivaciju elektroda. Isti je predstavljen sledećim matematičkim izrazom [27,28,30-36,79]:

$$V_{akt} = -[\xi_1 + \xi_2 \cdot T_{fc} + \xi_3 \cdot T_{fc} \cdot \log(C_{O_2}) + \xi_4 \cdot T_{fc} \cdot \log(I_{fc})], \quad (3)$$

gdje je:

- C_{O_2} – koncentracija kiseonika u mol/cm³,
- ξ_1, ξ_2, ξ_3 i ξ_4 su poluempirijski koeficijenti zasnovani na teorijskim jednačinama sa kinetičkim, termodinamičkim i elektrohemijskim osnovama [12].

Koncentracija kiseonika se dobija iz izraza [27]:

$$C_{O_2} = \left(\frac{P_{O_2}}{5.08 \cdot 10^6} \right) \cdot e^{\frac{498}{T_{fc}}}. \quad (4)$$

V_{Ω} predstavlja pad napona usljed otpora pri prolasku elektrona kroz provodne ploče i elektrode, kao i usljed otpora pri prolasku protona kroz membranu. Pomenuti pad napona se može proračunati iz izraza za otpornost ćelije [27, 28, 30-36, 79, 80]:

$$V_{\Omega} = I_{fc} \cdot (R_m + R_c), \quad (5)$$

gde je:

- R_m - otpornost membrane (Ω),
- R_c - ekvivalentna otpornost kontakata pri provođenju elektrona (Ω) i
- I_{fc} – struja gorivne ćelije.

⁵ <https://wme-z1.pwr.edu.pl/wp-content/uploads/2017/05/thermodynamics-of-fuel-cell-1.pdf>

Otpornost membrane je izražena preko sljedeće relacije [27, 28, 30-36, 79]:

$$R_m = \frac{\rho_m \cdot l}{M_A}, \quad (6)$$

gdje je:

- ρ_m – specifična otpornost membrane ($\Omega \cdot \text{cm}$),
- l – debljina membrane (cm) i
- M_A – površina membrane (cm^2).

Specifična otpornost membrane je izražena preko izraza [27, 28, 30-36, 79]:

$$\rho_m = \frac{181.6 \cdot \left[1 + 0.03 \cdot \left(\frac{I_{fc}}{M_A} \right) + 0.062 \cdot \left(\frac{T_{fc}}{303} \right)^2 \cdot \left(\frac{I_{fc}}{M_A} \right)^{2.5} \right]}{\left(\lambda - 0.634 - 3 \cdot \frac{I_{fc}}{M_A} \right) \cdot e^{4.18 \cdot \frac{T_{fc} - 303}{T_{fc}}}}, \quad (7)$$

gdje je λ podesivi parametar koji ukazuje na sadržaj vode u membrani. On je funkcija relativne vlažnosti i stehiometrijskog odnosa anodnog gasa [14]. Procjena sadržaja vode u PEM membrani je izazovna. Pored toga, njen sadržaj varira tokom rada sklopa [36].

Pad napona usljed koncentracije V_{konc} nastaje usljed prenosa mase unutar ćelije i isti utiče na koncentraciju vodonika i kiseonika tako da se smanjuje parcijalni pritisak ovih gasova. Pad pritiska vodonika i kiseonika zavisi od struje ćelije i fizičkih karakteristika sistema. Da bi se odredila jednačina za ovaj pad napona, potrebno je poznavati maksimalno dozvoljenu gustinu struje [14]. Naime, što je veća I_{fc} , više vode se proizvodi i prolazi kroz membranu, koja postaje sve više i više ovlažena. Sa porastom struje, otpornost membrane opada [36]. V_{konc} se izražava preko sljedeće relacije [27, 28, 30-36, 79]:

$$V_{konc} = -\beta \cdot \log \left(1 - \frac{J}{J_{max}} \right), \quad (8)$$

gdje je:

- β - koeficijent koji zavisi od ćelije i njenog radnog stanja,
- J - označava stvarnu gustinu struje (A/cm^2) i
- J_{max} – predstavlja maksimalnu vrijednost gustine struje (A/cm^2).

Iz opisanog matematičkog modela može se vidjeti da imamo vrlo kompleksnu zavisnost napona od struje. Takođe, jasno je da je mnogo parametara uključeno u precizno definisanje i karakterisanje rada PEMFC sklopa. Shodno tome, estimaciju ovih parametara treba pažljivo odraditi kako bi se obezbijedilo tačno modelovanje PEMFC-a.

U većini radova iz dostupne literature [28-36] je upotrijebljen ovaj matematički model kako bi se proračunala greška između mjerenih i proračunatih vrijednosti napona. Glavni cilj primjene optimizacionih algoritama jeste proračun optimalnih parametara, i to ξ_1 , ξ_2 , ξ_3 , ξ_4 , β , R_c i λ , preko minimizacije funkcije cilja - sume kvadrata grešaka - SSE_V (engl. *Sum of Squared Errors of Voltage*) [27]:

$$SSE_V = \sum_{i=1}^{N_m} (V_i^{mjer} - V_i^{pror})^2, \quad (9)$$

gdje je:

- V_i^{mjer} – i-ta vrijednost mjerenog napona i
- V_i^{pror} – i-ta vrijednost proračunatog napona.

Takođe, kriterijumska funkcija, odnosno funkcija cilja koja se može primijeniti i minimizovati je srednja kvadratna greška napon – $RMSE_V$ (engl. *Root Mean Square Error of Voltage*). Ova relacija ima sledeći oblik [27]:

$$RMSE_V = \sqrt{\frac{1}{N_m} \sum_{i=1}^{N_m} (V_i^{mjer} - V_i^{pror})^2}, \quad (10)$$

gdje je N_m broj koji ukazuje koliko puta je vršeno mjerenje napona.

3. OPTIMIZACIONI ALGORITAM MORŽEVA

U ovom radu je za estimaciju parametara upotrijebljen optimizacioni algoritam morževa. Morž je morski sisar sa velikim perajima koji nastanjuje Arktički ocean i subarktičke djelove sjeverne hemisfere oko Sjevernog pola. Odrasli morževi su lako prepoznatljivi po svojim velikim brkovima i kljovama. Morževi su socijalne životinje koje većinu svog vremena provode na morskom ledu, tražeći hranu. Najistaknutija fizička karakteristika ovih životinja su dugačke kljove koje posjeduju i mužjaci i ženke. Najmišićaviji mužjak sa najdužim kljovama dominira nad ostalim članovima grupe i vodi ih. Kada dođe toplo vrijeme i led se topi krajem ljeta, morževi preferiraju migraciju ka stjenovitim plažama [87].

Prema njihovom društvenom životu i ponašanju, može se reći da su morževi inteligentne životinje. Od njegovih inteligentnih načina ponašanja, tri su najistaknutija [87]:

- usmjeravanje pojedinaca da se hrane pod vođstvom člana sa najdužim kljovama,
- migracija morževa ka stjenovitim plažama i
- borba ili bježanje od predatora.

3.1 WaOA algoritam

Matematičko modelovanje prirodnog ponašanja morževa je primarna inspiracija za razvoj metaheurističkog algoritma WaOA [87, 88].

Matematički, populacija WaOA se sastoji od članova pretraživača - morževa. Konkretno, svaki morž predstavlja potencijalno rješenje za optimizacioni problem. Svaki morž iz populacije je zapravo vektor koji se sastoji od m varijabli, gdje m predstavlja dimenziju optimizacionog problema. Populacija morževa može se matematički modelovati pomoću takozvane matrice populacije. Dakle, populacija od N morževa opisana je matricom X , čije su dimenzije $N \times m$ [87]:

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_i \\ \vdots \\ X_N \end{bmatrix}_{N \times m} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & \cdots & x_{1,j} & \cdots & x_{1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i,1} & \cdots & x_{i,j} & \cdots & x_{i,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N,1} & \cdots & x_{N,j} & \cdots & x_{N,m} \end{bmatrix}_{N \times m}, \quad (1)$$

gdje je:

- X_i predstavlja i -tog morža u populaciji i
- $X_{i,j}$ je vrijednost j -te optimizacione varijable koju predlaže i -ti morž.

Kvalitet svakog potencijalnog rješenja (svakog morža iz populacije) mjeri se vrijednošću funkcije cilja $F_i = F(X_i)$,

$$F = \begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_i \\ \vdots \\ F_N \end{bmatrix}_{N \times 1} = \begin{bmatrix} F(X_1) \\ \vdots \\ F(X_i) \\ \vdots \\ F(X_N) \end{bmatrix}_{N \times 1}, \quad (2)$$

gdje F označava funkciju cilja [87].

Vrijednost funkcije cilja predstavlja najbolju mjeru kvaliteta rješenja. Potencijalno rješenje koje daje najbolju vrijednost funkcije cilja naziva se najboljim članom. S druge strane, potencijalno rješenje koje rezultira najlošijom vrijednošću funkcije cilja naziva se najlošiji član. U skladu sa ažuriranjem vrijednosti funkcije cilja u svakoj iteraciji, najbolji i najlošiji članovi se takođe ažuriraju [87].

Prije nego što započne iterativni postupak, početna populacija morževa se nasumično inicijalizuje između donje granice (engl. *Lower Bound*, LB) i gornje granice (engl. *Upper Bound*, UB) optimizacionih promjenjivih,

$$X_i = LB + rand \cdot (UB - LB), \quad (3)$$

gdje je $rand$ vektor nasumičnih brojeva između 0 i 1, generisan zasebno za svakog morža [87].

Proces ažuriranja pozicije morževa u WaOA modeluje se u tri različite faze, zasnovane na prirodnim ponašanjima ove životinjske vrste. Prva faza algoritma prikazuje globalnu pretragu cijelog pretraživačkog prostora, tzv. **eksploraciju (istraživanje)**. Ova faza se naziva **strategija ishrane**. Prema prirodnom ponašanju morževa, najsnažniji morž sa najdužim kljovima vodi druge morževe u grupi ka pronalaženju hrane. Dužina kljova kod morževa ekvivalentna je kvalitetu vrijednosti funkcije cilja potencijalnih rješenja. Stoga, najjači morž u grupi predstavlja najbolje potencijalno rješenje sa najboljom, odnosno najnižom vrijednošću funkcije cilja. Ovakvom pretragom morževi istražuju različita područja pretraživačkog prostora, što poboljšava moć WaOA u globalnoj pretrazi [87].

Matematički, ova faza se modeluje ažuriranjem pozicije svakog morža $X_{i,j}^{P1}$ na sljedeći način [88]:

$$x_{i,j}^{P1} = x_{i,j} + rand_{i,j} \cdot (SW_j - I_{i,j} \cdot x_{i,j}), \quad (4)$$

gdje je:

- $x_{i,j}^{P1}$ je j -ta dimenzija novo generisane pozicije i -tog morža,
- SW je najbolji morž u populaciji i
- $I_{i,j}$ su cijeli brojevi koji mogu uzeti vrijednost 1 ili 2.

Ako se dobije poboljšana vrijednost funkcije cilja, tada se stara pozicija zamjenjuje novo generisanom, na sljedeći način [88]:

$$X_i = \begin{cases} X_i^{P1}, & F_i^{P1} < F_i, \\ X_i, & \text{else,} \end{cases} \quad (5)$$

gdje je:

- x_i^{P1} je nova generisanana pozicija i -tog morža u toku prve faze i

- F_i^{P1} je njegova vrijednost funkcije cilja.

Druga faza se koristi za opis **migracije morževa** ka stijenama ili stjenovitim plažama, uzrokovane podizanjem temperature krajem ljeta. Ovaj proces migracije se koristi u WaOA kako bi se morževi usmjerili ka otkrivanju pogodnih oblasti u pretraživačkom prostoru. Tokom ove faze, pretpostavlja se da svaki morž migrira ka drugom moržu nasumično izabranom iz populacije. Matematička formulacija za ažuriranje pozicije svakog morža $X_{i,j}^{P2}$ data je na sljedeći način [87]:

$$x_{i,j}^{P2} = \begin{cases} x_{i,j} + rand_{i,j} \cdot (x_{k,j} - l_{i,j} \cdot x_{i,j}), & F_k < F_i, \\ x_{i,j} + rand_{i,j} \cdot (x_{i,j} - x_{k,j}), & else, \end{cases} \quad (6)$$

gdje je:

- X_k ($k \neq i$) nasumično izabrani morž i
- F_k njegova vrijednost funkcije cilja.

Slično kao u prvoj fazi, potrebno je provjeriti da li novo generisana pozicija pruža bolju vrijednost funkcije cilja od stare. Ako ova nova pozicija poboljšava vrijednost funkcije cilja, ona zamjenjuje prethodnu poziciju morža [88]:

$$X_i = \begin{cases} X_i^{P2}, & F_i^{P2} < F_i, \\ X_i, & else, \end{cases} \quad (7)$$

gdje je:

- x_i^{P2} je nova generisana pozicija i-tog morža u toku druge faze i
- F_i^{P2} je njegova vrijednost funkcije cilja.

Morževi su uvijek izloženi napadima polarnog medvjeda i orke. U trećoj fazi je predstavljen **bijeg** morževa i njihova **borba** protiv predatora. Strategija koja se koristi za bjekstvo i pronalaženje predatora dovodi do promjene pozicije morževa, ali samo u blizini pozicije u kojoj su se prethodno nalazili. Simulacija ovog prirodnog ponašanja morževa poboljšava eksploatacionu moć WaOA u lokalnoj pretrazi prostora rješenja oko potencijalnih rješenja. Iz susjedstva svakog morža se prvo nasumično generiše nova pozicija svakog morža X_i^{P3} na sljedeći način [87]:

$$x_{i,j}^{P3} = x_{i,j} + \frac{LB_j}{t} + \frac{UB_j}{t} - rand \cdot \left(\frac{LB_j}{t} \right), \quad (8)$$

gdje je t broj trenutne iteracije.

Pored toga, ako je nova pozicija bolja od stare (ako se vrijednost funkcije cilja poboljša), morž zauzima sljedeću poziciju [88]:

$$X_i = \begin{cases} X_i^{P3}, & F_i^{P3} < F_i, \\ X_i, & else, \end{cases} \quad (9)$$

gdje je:

- x_i^{P3} je nova generisana pozicija i-tog morža u toku treće faze i

- F_t^{P3} je njegova vrijednost funkcije cilja.

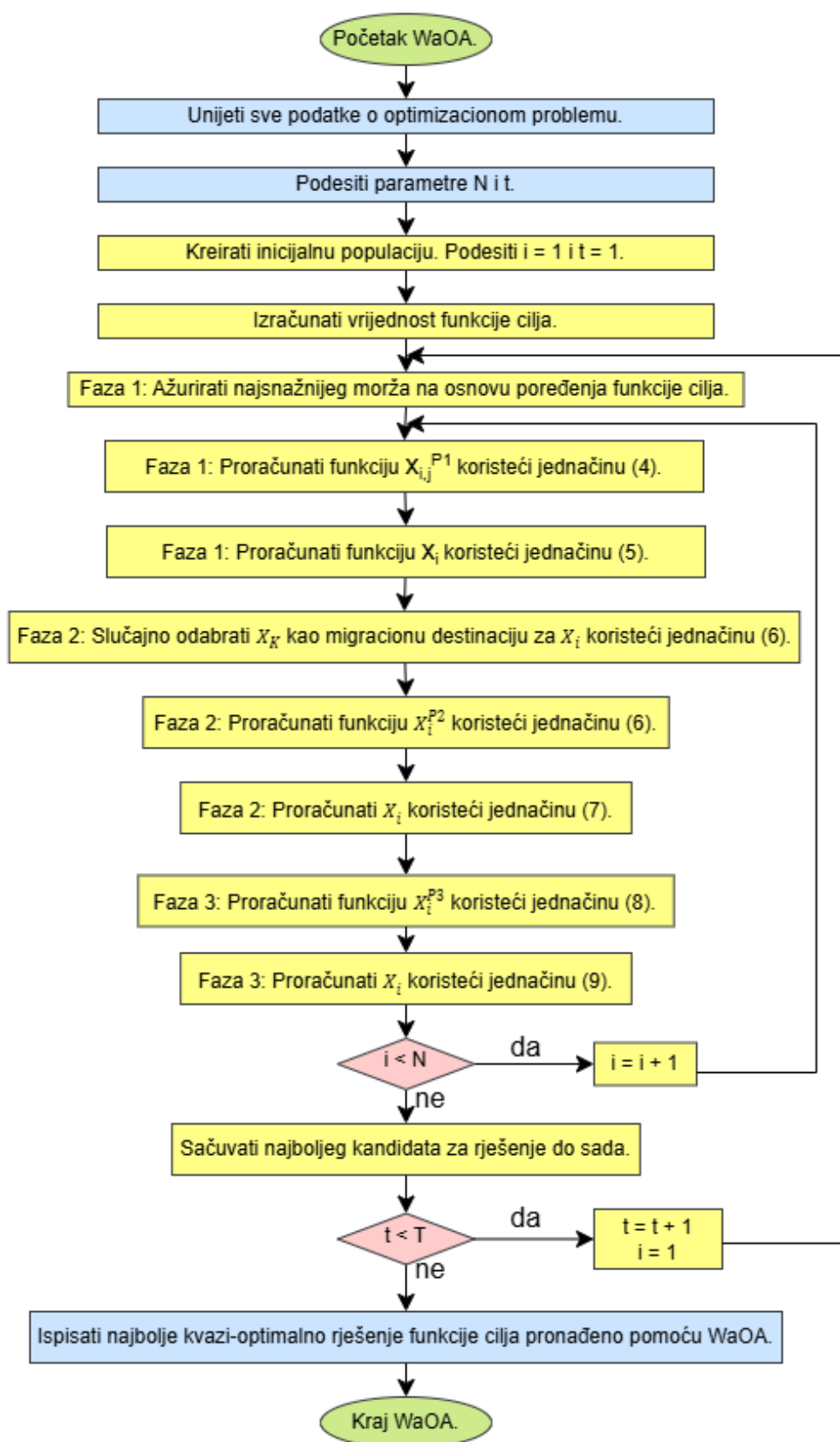
Nakon završetka treće faze, jedna iteracija WaOA je završena. Pored toga, opisani iterativni postupak se ponavlja sve dok se ne dostigne unaprijed definisan maksimalni broj iteracija. Ažuriranje i poboljšavanje potencijalnih rješenja ponavlja se na osnovu koraka WaOA prema jednačinama (4) do (9), sve do poslednje iteracije. Na kraju, optimalno rješenje optimizacionog problema predstavlja najbolji morž, tj. morž sa najboljom vrijednošću funkcije cilja [87].

U nastavku je dat pseudo-kod opisanog algoritma radi sumiranja koraka procedure [87].

Pseudo - kod algoritma WaOA

- 1: Unos informacija o problemu optimizacije
- 2: Unesi veličinu populacije N i maksimalan broj iteracija t_{max}
- 3: Inicijalizuj početnu populaciju nasumično
- 4: **For** $t = 1$ do t_{max}
- 5: Ažuriraj najjačeg morža na osnovu vrijednosti funkcije cilja
- 6: **For** $i = 1$ do N
- 7: **Primijeni fazu 1 – Strategija ishrane**
- 8: Proračunaj poziciju j-tog morža X_{ij}^{P1}
- 9: Ažuriraj i-tu poziciju morža
- 10: **Primijeni fazu 2 – Migracija**
- 11: Proračunaj imigracionu poziciju i-tog morža X_i^{P2}
- 12: Proračunaj novu lokaciju j-tog morža
- 13: Ažuriraj poziciju i-tog morža
- 14: **Primijeni fazu 3 – Bijeg i borba sa predatorom**
- 15: Proračunaj novu poziciju u susjedstvu i-tog morža X_i^{P3}
- 16: Ažuriraj i-tu poziciju morža
- 17: **endfor**
- 18: Sačuvaj najboljeg morža do sada
- 19: **endfor**
- 20: Globalno optimalno rješenje je morž sa najboljom vrednošću funkcije cilja

U nastavku je dat blok dijagram WaOA algoritma [87]:



Slika 3.1. Blok dijagram WaOA algoritma

3.2 Haotična modifikacija WaOA algoritma

WaOA algoritam ima jedan nedostatak, a to je nasumična inicijalizacija populacije. Haotičnom modifikacijom se izbjegava nasumična inicijalizacija primjenom logističkih haotičnih mapa za inicijalizovanje populacije. Prema tome, haotični algoritam se koristi za inicijalizaciju populacije, čime se obezbjeđuje visok kvalitet početne populacije. Prema predloženom pristupu, populacija se inicijalizuje na sljedeći način [88]:

$$\begin{aligned} Y_i &= rand, \\ Y_{i+1} &= 4 \cdot Y_i \cdot (1 - Y_i), \\ X_i &= LB + Y_i \cdot (UB - LB), \\ i &= 1, 2, \dots, N - 1. \end{aligned} \quad (10)$$

Nakon što je inicijalizacija završena, proces ažuriranja pozicija morževa se sprovodi kako je opisano u podpoglavlju 3.1. Tako dobijena haotična verzija WaOA naziva se haotična WaOA ili HwaOA [88]. Pseudo-kod ovog algoritma je prikazan u nastavku:

Pseudo - kod haotičnog WaOA algoritma
--

- 1: Unos informacija o problemu optimizacije
- 2: Unesi veličinu populacije N i maksimalan broj iteracija t_{max}
- 3: Inicijalizuj početnu populaciju prema (10)
- 4: **For** $t = 1$ do t_{max}
- 5: Ažuriraj najjačeg morža na osnovu vrijednosti funkcije cilja
- 6: **For** $i = 1$ do N
- 7: **Primijeni fazu 1 – Strategija ishrane**
- 8: Proračunaj poziciju j -tog morža X_{ij}^{P1}
- 9: Ažuriraj i -tu poziciju morža
- 10: **Primijeni fazu 2 – Migracija**
- 11: Proračunaj imigracionu poziciju i -tog morža X_i^{P2}
- 12: Proračunaj novu lokaciju j -tog morža
- 13: Ažuriraj poziciju i -tog morža
- 14: **Primijeni fazu 3 – Bijeg i borba sa predatorom**
- 15: Proračunaj novu poziciju u susjedstvu i -tog morža X_i^{P3}
- 16: Ažuriraj i -tu poziciju morža
- 17: **endfor**
- 18: Sačuvaj najboljeg morža do sada
- 19: **endfor**
- 20: Globalno optimalno rješenje je morž sa najboljom vrednošću funkcije cilja

3.3 Modifikacija WaOA algoritma upotrebom algoritma simuliranog kaljenja

Simulirano kaljenje (engl. *SA - Simulated annealing*) je jedna od najpoznatijih metoda za hibridizaciju metaheurističkih algoritama, čija je glavna inspiracija proces kaljenja metala. Tokom ovog procesa, čvrsta supstanca se stavlja u toplotnu kupku, a temperatura se neprekidno povećava dok se čvrsta supstanca ne otopi. Čvrsti djelovi su fizički razdvojeni ili nasumično raspoređeni. Sa tako visokog energetskeg nivoa, toplotna kupka se polako hladi kako temperatura opada, omogućavajući djelovima da se poravnaju i formiraju regularnu kristalnu rešetku [87].

Drugi pristup predstavljen u radu [88] je razvoj hibridnog SAWaOA algoritma, u kojem se poznati algoritam simuliranog kaljenja (SA) koristi za inicijalizaciju populacije. Ovaj pristup je veoma sličan prethodnom, ali je haotični algoritam zamijenjen SA algoritmom. Značajna razlika između ova dva algoritma je njihov tip - haotični algoritam se zasniva na populaciji, dok se SA algoritam zasniva na jednom rješenju. Stoga, razvijeni SA-WaOA algoritam koristi SA algoritam za inicijalizaciju populacije, umesto nasumične inicijalizacije kao što je opisano u poglavlju 3.1. SA algoritam je opisan sljedećim pseudokodom [88]:

Pseudo - kod SA algoritma

```
1: Ulazni podaci:  $k = 0$ ,  $c_k = c_0$ ,  $L_k = L_0$ 
2: Nasumično inicijalizuj svakog člana populacije
3: For svakog člana populacije
4:   while  $c_k > 0$ 
5:     For  $L = 0$  do  $L_k$ 
6:       Generiši rješenje  $x_j$  iz okoline trenutnog rješenja  $x_i$ 
7:       if  $f(p_j) < f(p_i)$  then  $p_i = p_j$ 
8:       else  $p_j$  postaje trenutno rješenje sa vjerovatnoćom  $\exp((f(p_i) - f(p_j))/c_k)$ 
9:       end if
10:    end for
11:     $k = k + 1$ 
12:    Ažuriraj vrijednosti  $L_k$  i  $c_k$ 
13:  end while
14: end for
```

3.4 Adaptivna modifikacija WaOA algoritma

Treća modifikovana varijanta WaOA algoritma je adaptivna modifikacija (AWaOA). Naime, dobro je poznato da se optimalne performanse bilo kog metaheurističkog algoritma postižu kada se globalna pretraga (eksploracija) primjenjuje u ranim iteracijama,

dok se lokalna pretraga oko postojećeg optimalnog rješenja (eksploatacija) izvodi u kasnijim iteracijama. Parametar „ I “ se koristi za balansiranje između eksploracije i eksploatacije. Potpuno je nepredvidivo kako će se algoritam ponašati u svakoj iteraciji. Drugim riječima, ne može se znati da li će podržati lokalnu ili globalnu pretragu. Veće vrijednosti ovog parametra ukazuju na to da je algoritam fokusiran na globalnu pretragu, dok niže vrijednosti uzrokuju da algoritam vrši lokalnu pretragu. U radu [88] se predlaže adaptivna promjena ovog parametra. Tačnije, početna vrijednost parametra „ I “ je postavljena na 2, i algoritam tada sprovodi globalnu pretragu. Nakon toga, tokom iteracija, ovaj parametar se linearno smanjuje i u poslednjoj iteraciji pada na 1, što znači da je fokus na lokalnoj pretrazi. Na taj način se osigurava optimalan balans između globalne i lokalne pretrage. Matematički, adaptivno pravilo za promjenu parametra „ I “ je dato sljedećim izrazom [88]:

$$I = 2 - \frac{t - 1}{t_{max} - 1} \quad (11)$$

U nastavku je dat pseudo kod adaptivnog algoritma [88]:

Pseudo - kod adaptivnog algoritma
--

- 1: Unos informacija o problemu optimizacije
- 2: Unesi veličinu populacije, granice, maksimalan broj iteracija
- 3: Inicijalizuj početnu populaciju nasumičnim vrijednostima unutar granica
- 4: Postavi početnu vrijednost parametra $I = 2$.
- 5: **For** $t = 1$ do maksimalnog broja iteracija
- 6: Ažuriraj najbolju poziciju morža na osnovu vrijednosti funkcije cilja
- 7: **For** $i = 1$ do N
- 8: **Primijeni fazu 1 – Strategija ishrane**
- 9: Izračunaj poziciju $X_{i,j}^{P1}$
- 10: Ažuriraj poziciju svakog morža
- 11: **Primijeni fazu 2 – Migracija**
- 12: Proračunaj imigracionu poziciju i -tog morža X_i^{P2}
- 13: Ažuriraj poziciju svakog morža
- 14: **Primijeni fazu 3 – Bijeg i borba sa predatorom**
- 15: Proračunaj novu poziciju u susjedstvu i -tog morža X_i^{P3}
- 16: Ažuriraj poziciju svakog morža
- 17: **endfor**
- 18: Sačuvaj najboljeg morža do sada
- 19: Ažuriraj vrijednost parametra I prema formuli (11)
- 20: **endfor**
- 21: Globalno optimalno rješenje je morž sa najboljom vrijednošću funkcije cilja

4. STRUJA – NAPON MODELOVANJE PEM GORIVNE ČELIJE

U ovom poglavlju, po prvi put u literaturi, izvedena je originalna inverzna struja – napon relacija za PEMFC. Važno je naglasiti da ova zavisnost ima važan smisao i primjenjivost.

Matematički model PEMFC-a sastavljen je od nelinearnih i transcendentnih jednačina. Iz tog razloga je jedini način za rješenje takve jednačine i izražavanje struje u zavisnosti od napona preko iterativnih i numeričkih metoda. Pošto se ova komplikovana matematička relacija ne može riješiti algebarski, za njeno rješenje je predložena primjena Lambert W funkcije u kombinaciji sa numeričkom metodom Regula Falsi.

Osnovna napon – struja jednačina (jednačina (1) iz podpoglavlja 2.5) PEMFC [28] se transformiše u sledeću jednačinu:

$$\theta \cdot e^{\theta} = \frac{a_4}{b_1 \cdot g} \cdot \left[\frac{(1 - m \cdot I_{fc})^{\beta \cdot (g - h \cdot I_{fc})} \cdot I_{fc}^{b_1 \cdot h \cdot I_{fc}}}{e^{(a_3 + a_5 \cdot I_{fc}^2 + a_6 \cdot I_{fc}^{3.5})}} \right]^{\frac{1}{b_1 \cdot g}}. \quad (1)$$

Ova jednačina je dobijena uvođenjem smjene:

$$\theta = \frac{a_4}{b_1 \cdot g} \cdot I_{fc}. \quad (2)$$

Koeficijenti a , a_2 , a_3 , a_4 , a_5 , a_6 , b , b_1 , c , d , ee , f , g , h i m su uvedeni radi lakšeg zapisa jednačine i izvođenja izraza pogodnog za Lambert W funkciju. Vrijednosti ovih koeficijenata su sledeći:

$$a = \xi_1 + \xi_2 \cdot T_{fc} + \xi_3 \cdot T_{fc} \cdot \log(C_{O_2}),$$

$$a_2 = \frac{V_{sklopa}}{N} - E_{Nernst} - a,$$

$$b = \xi_4 \cdot T_{fc},$$

$$b_1 = -b,$$

$$c = R_c,$$

$$d = \frac{l \cdot 181.6}{M_A},$$

$$ee = -\frac{0.03}{M_A},$$

$$f = 0.062 \cdot \left(\frac{T_{fc}}{303} \right)^2 \cdot \left(\frac{1}{M_A} \right)^{2.5},$$

$$\begin{aligned}
g &= (\lambda - 0.634) \cdot e^{\frac{4.18 \cdot T_{fc} - 303}{T_{fc}}}, \\
h &= \frac{3}{M_A} \cdot e^{\frac{4.18 \cdot T_{fc} - 303}{T_{fc}}}, \\
m &= \frac{1}{M_A \cdot J_{max}}, \\
a_3 &= a_2 \cdot g, \\
a_4 &= c \cdot g + d - a_2 \cdot h, \\
a_5 &= d \cdot ee - c \cdot h, \\
a_6 &= f \cdot d.
\end{aligned} \tag{3}$$

Izraz sa desne strane jednakosti jednačine (1) može se označiti sa Z , pa jednačina (1) postaje:

$$\theta \cdot e^\theta = Z. \tag{4}$$

Rješavanjem jednačine (4) se može odrediti struja - napon karakteristika ćelije. Jednačina se rješava iterativnom metodom. Prvo se pretpostavi početna vrijednost struje $I_{fc(0)}$. Ta početna vrijednost struje se iskoristi da se izračuna početna vrijednost varijable Z , označena sa $Z_{(0)}$, kao što slijedi:

$$Z_{(0)} = \frac{a_4}{b_1 \cdot g} \cdot \left[\frac{(1 - m \cdot I_{fc(0)})^{\beta \cdot (g - h \cdot I_{fc(0)})} \cdot I_{fc(0)}^{b_1 \cdot h \cdot I_{fc(0)}}}{e^{(a_3 + a_5 \cdot I_{fc(0)}^2 + a_6 \cdot I_{fc(0)}^{3.5})}} \right]^{\frac{1}{b_1 \cdot g}}. \tag{5}$$

Sledeća vrijednost varijable θ se računa iz jednačine:

$$\theta_{(1)} \cdot e^{\theta_{(1)}} = Z_{(0)}. \tag{6}$$

Jednačina (6) predstavlja Lambert W jednačinu [81-84]. Jednačina (6) se rješava preko relacije:

$$\theta_{(1)} = \text{lambertw}(Z_{(0)}). \tag{7}$$

$\text{Lambertw}(Z_{(0)})$ je ugrađena funkcija u softverskom paketu MATLAB kojom se automatski određuje $\theta_{(1)}$. Zatim se računa nova vrijednost varijable Z , označena sa $Z_{(1)}$ na sledeći način:

$$Z_{(1)} = \frac{a_4}{b_1 \cdot g} \cdot \left[\frac{(1 - m \cdot I_{fc(1)})^{\beta \cdot (g - h \cdot I_{fc(1)})} \cdot I_{fc(1)}^{b_1 \cdot h \cdot I_{fc(1)}}}{e^{(a_3 + a_5 \cdot I_{fc(1)}^2 + a_6 \cdot I_{fc(1)}^{3.5})}} \right]^{\frac{1}{b_1 \cdot g}}. \tag{8}$$

Apsolutna vrijednost razlike između trenutne $Z_{(1)}$ i prethodne vrijednosti $Z_{(0)}$ se računa u svakoj iteraciji:

$$\varepsilon = |Z_{(1)} - Z_{(0)}|. \quad (9)$$

Izraz (9) predstavlja kriterijum za zaustavljanje iterativne metode i podešava se da ima veoma malu vrijednost (npr. 10^{-5}). Ako uslov (9) nije zadovoljen, odnosno ako greška nije manja od ε , tada se ažurira vrijednost struje, $I_{fc(0)}$ postaje $I_{fc(1)}$, koja se računa kao:

$$I_{fc(1)} = \frac{b_1 \cdot g}{a_4} \cdot \theta_{(1)}. \quad (10)$$

Čitav proces se iterativno ponavlja sve dok kriterijum (9) bude zadovoljen.

Za n-tu iteraciju važi:

$$\theta_{(n)} = \text{lambertw}(Z_{(n-1)}), \quad (11)$$

tj. važi:

$$\theta_{(n)} = \text{lambertw} \left[\frac{a_4}{b_1 \cdot g} \cdot \left[\frac{(1 - m \cdot I_{fc(n-1)})^{\beta \cdot (g - h \cdot I_{fc(n-1)})} \cdot I_{fc(n-1)}^{b_1 \cdot h \cdot I_{fc(n-1)}}}{e^{(a_3 + a_5 \cdot I_{fc(n-1)}^2 + a_6 \cdot I_{fc(n-1)}^{3.5})}} \right]^{\frac{1}{b_1 \cdot g}} \right], \quad (12)$$

dok je

$$I_{fc(n)} = \frac{b_1 \cdot g}{a_4} \cdot \theta_{(n)}. \quad (13)$$

Tokom iteracija struja PEM gorivne ćelije može biti veća od maksimalno dozvoljene I_{max} , što znači da vrijednost promjenjive Z može biti kompleksan broj. Zbog toga je preporučivo primijeniti iterativne metode kao što su Regula Falsi i Newton-Raphson metoda [85,86]. Konkretno, u ovom radu je upotrijebljena Regula Falsi iterativna metoda.

Regula falsi metoda (RFM), poznata i kao metoda lažnog položaja, je stara iterativna tehnika za rješavanje nelinearnih jednačina. Ova metoda je slična tehnici „pokušaja i greške“, gdje se koristi testna („lažna“) vrijednost za promjenjivu, koja se zatim prilagođava u zavisnosti od rezultata. Iterativna formula za RFM glasi [85]:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{x_n - x_0}{f(x_n) - f(x_0)} \cdot f(x_n), \quad (14)$$

gdje je:

- x_n vrijednost x u trenutnoj iteraciji,
- x_{n+1} vrijednost x u narednoj iteraciji i
- x_0 početna vrijednost.

Može se primijetiti da razlika u imeniocu može brzo postati veoma mala, odnosno približiti se nuli. Zbog toga se ovaj „rizični“ korak dijeljenja brojevima bliskim nuli može izbjeći tako što se jedna početna tačka zadrži kroz cio iterativni proces [85].

U ovom radu, vrijednosti x_n i x_0 se inicijalizuju prije početka petlje. Dodijeljene su im vrijednosti:

$$x_0 = -0.99 \cdot I_{max}, \quad (15)$$

$$x_n = 0.99 \cdot I_{max}. \quad (16)$$

Njima se u svakoj petlji mijenja vrijednost tako što promjenjivoj x_0 dodijeli vrijednost x_n , a promjenjivoj x_n vrijednost x_{n+1} . U svakoj iteraciji se računa greška i provjerava je li greška manja od ε . Greška (error) je vrijednost koja se računa prema sljedećem izrazu:

$$error = \left| \frac{a_4 \cdot x_{n+1}}{b_1 \cdot g} \cdot e^{\frac{a_4 \cdot x_{n+1}}{b_1 \cdot g}} - \frac{a_4}{b_1 \cdot g} \cdot \left[\frac{(1 - m \cdot x_{n+1})^{\beta \cdot (g - h \cdot x_{n+1})} \cdot x_{n+1}^{b_1 \cdot h \cdot x_{n+1}}}{e^{(a_3 + a_5 \cdot x_{n+1}^2 + a_6 \cdot x_{n+1}^{3.5})}} \right]^{\frac{1}{b_1 \cdot g}} \right|. \quad (17)$$

U svakoj iteraciji provjerava se da li je ta greška manja od ε (npr. $\varepsilon = 10^{-5}$). Ako jeste, onda se završava iterativna procedura. Ako nije, onda se u novoj iteraciji računa novo x_{n+1} , uvrsti se u (17), opet se provjerava kriterijum. Ovi koraci se iterativno ponavljaju sve dok ne bude zadovoljen uslov iz petlje, odnosno dok se ne dobije tačno rješenje.

5. REZULTATI ESTIMACIJE PARAMETARA PEMFC

U ovom poglavlju dati su rezultati estimacije parametara dvije PEMFC ćelije - Ballard-Mark-V 5 kW i BCS500 W. Za estimaciju parametara ove dvije ćelije, i to ξ_1 , ξ_2 , ξ_3 , ξ_4 , β i λ , upotrijebljene su hibridne varijante WaOA algoritma. Rezultati predložene metodologije su upoređeni sa rezultatima dobijenim različitim metodama iz literature [28-36]. Prema tome, predmet ovog poglavlja je analiza srednjih kvadratnih greški između izmjerenih i procijenjenih vrijednosti struje, korišćenjem parametara dobijenih primjenom mnogih metaheurističkih metoda optimizacije za pomenute, literaturno poznate, ćelije.

Cilj estimacije parametara PEMFC ćelije jeste da bude minimalno odstupanje proračunatih vrijednosti struja od mjerenih. Dakle, funkcija cilja, odnosno kriterijumska funkcija algoritma je srednja kvadratna greška struje - $RMSE_I$ (engl. *Root Mean Square Error of Current*) koja ima sledeću formulaciju:

$$RMSE_I = \sqrt{\frac{1}{N_m} \sum_{i=1}^{N_m} (I_i^{mjer} - I_i^{pror})^2}, \quad (1)$$

gdje je:

- N_m - broj mjerenih tačaka,
- I_i^{mjer} – i-ta vrijednost mjerene struje i
- I_i^{pror} – i-ta vrijednost estimirane struje.

Drugi parametar koji se može koristiti za ocjenu tačnosti estimacije parametara je suma kvadratnih grešaka struje (engl. *Sum of Squared Errors of Current*, SSE_I):

$$SSE_I = \sum_{i=1}^{N_m} (I_i^{mjer} - I_i^{pror})^2 \quad (2)$$

Svi proračuni u ovom poglavlju su odrađeni u programskom paketu MATLAB (verzija – R2021a).

5.1 Pregled literature PEMFC sklopa Ballard-Mark-V 5 kW

U literaturi su poznata mjerenja napona i struje PEMFC sklop-a Ballard-Mark V, proizvedene od strane kanadske kompanije Ballard (u Burnabi, gradu u Britanskoj Kolumbiji), što omogućava poređenje rezultata simulacija sa praktičnim mjerenjima [89]. Nominalna snaga Ballard Mark V sklopa je 5 kW, a maksimalna vrijednost nominalne struje iznosi 70 A. Membrana u ovom PEMFC sklopu je Nafion 117. Tehnička specifikacija ovog PEMFC sklopa je sljedeća [36]:

- $N_{ćelija} = 35$, predstavlja broj ćelija povezanih u sklopu,
- $M_A = 50.6 \text{ cm}^2$, predstavlja površinu membrane,

- $l = 178$ mm, predstavlja dužinu ćelije,
- $T_{fc} = 343$ K, predstavlja temperaturu gorivne ćelije,
- $J_{max} = 1.5$ A/cm², predstavlja maksimalnu gustinu struje.
- $P_{O_2} = 1$ atm, predstavlja operativni parcijalni pritisak kiseonika u ćeliji,
- $P_{H_2} = 1$ atm, predstavlja operativni parcijalni pritisak vodonika u ćeliji.

Različiti metaheuristički algoritmi su nedavno upotrijebljeni za određivanje parametara PEMFC steka Ballard Mark V 5 kW, kao što su sinusno-kosinusni algoritam (SCA) [28], algoritam optimizacije sivih vukova (GWO) [28], algoritam neuralnih mreža (NNA) [28,30], algoritam morskog predatora (MPA) [32], algoritam pretrage igara gladi (HGSA) [33], algoritam optimizacije ishrane manta raža (MRFO) [34], algoritam optimizacije kitova (WOA) [35], algoritam optimizacije skakavaca (GOA) [36].

U Tabeli 5.1 je dat pregled parametara PEMFC steka Ballard Mark V 5 kW koji su određeni upotrebom prethodno pomenutih metaheurističkih algoritama. Na osnovu optimalnih parametara za svaku metodu iz Tabele 5.1, proračunati su *SSE* i *RMSE* za napone prema relacijama iz podpoglavlja 2.5. Takođe, proračunati su *SSE* i *RMSE* za struje prema relacijama iz poglavlja 4. Rezultati proračuna *SSE* i *RMSE* za napone i struje, opisani jednačinama (9) i (10) iz podpoglavlja 2.5, i jednačinama (1) i (2) iz poglavlja 5 dati su u Tabeli 5.2. Za Ballard Mark V 5 kW PEMFC, minimalne vrijednosti *SSE* i *RMSE*, izražene i za napone i za struje, dobijene su ako su parametri određeni metodom 5 - MPA, kao što je prikazano u Tabeli 5.2. Dakle, metaheuristički algoritam MPA daje najtačniju estimaciju parametara. Na osnovu toga se može doći do zaključka da su oba matematička modela (napon – struja i struja – napon) ravnopravna i da daju iste najbolje rezultate prilikom estimacije parametara.

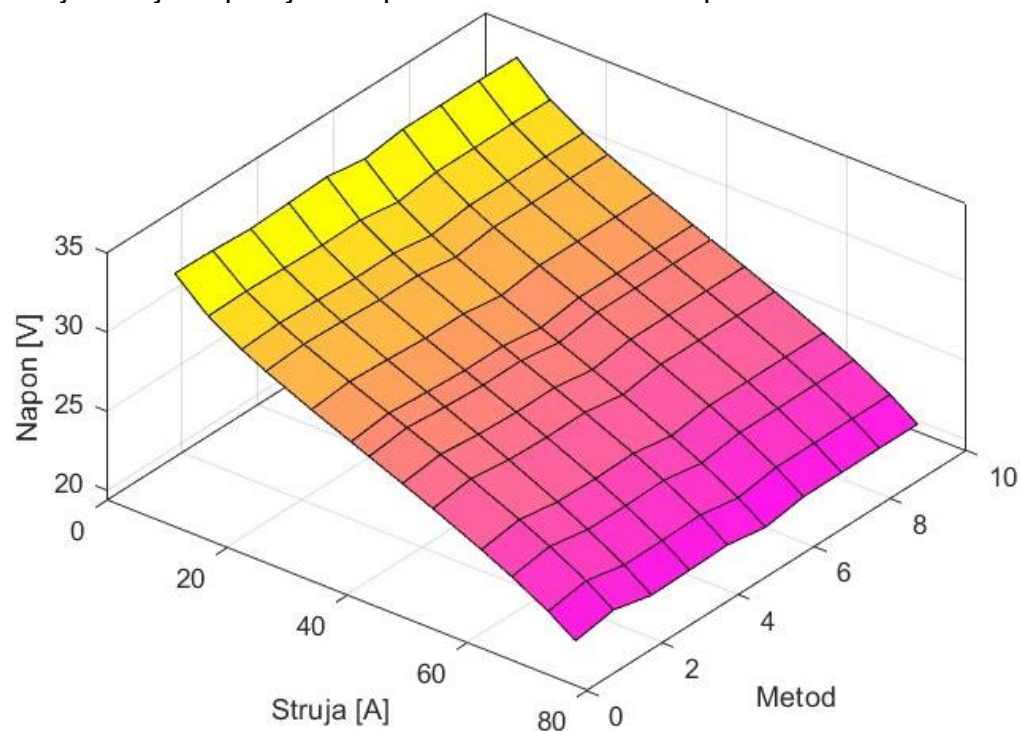
Tabela 5.1. Optimalni parametri PEMFC steka Ballard Mark V 5 kW u odabranoj literaturi

Metod	god.	Algoritam	Ref.	ξ_1	$\xi_2 \cdot 10^{-3}$	$\xi_3 \cdot 10^{-3}$	$\xi_4 \cdot 10^{-3}$	λ	Rc (m Ω)	β
1	2022	CSA	[28]	-1.181342405	3.569096	3.9929	-16.2830	23	0.1	0.0136
2	2022	NNA	[28]	-1.159421713	3.604278	4.926	-14.7034	23	0.1	0.01361446
3	2022	GWO	[28]	-0.904692414	2.870928	5.2237	-13.0626	23	0.509417	0.013643745
4	2022	SCA	[28]	-0.891394545	2.651533	3.6	-15.6624	23	0.178197	0.0136
5	2021	MPA	[32]	-1.0793	3.8868	8.3282	-16.7251	24	0.1	0.0159
6	2021	HGSA	[33]	-0.991	3.7	9.1	-16.35	22.87	0.1	0.0135
7	2020	MRFO	[34]	-1.0898	3.8249	7.7306	-16.2830	23	0.1	0.0136
8	2019	WOA	[35]	-1.1978	4.4183	9.7214	-16.2730	23	0.1002	0.0136
9	2019	NNA	[30]	-0.979	3.694	9.087	-16.28	23	0.1	0.0136
10	2017	GOA	[36]	-0.853	3.417	9.8	-15.95	22.84	0.1	0.0136

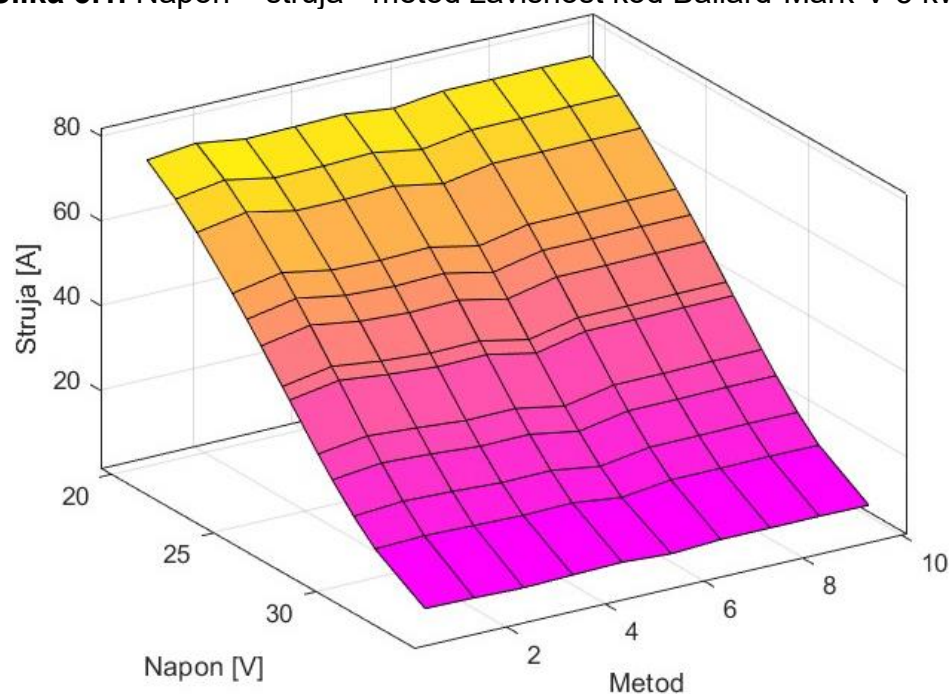
Tabela 5.2. Proračunate vrijednosti *RMSE* i *SSE* PEMFC steka Ballard Mark V 5 kW za metode iz Tabele 5.1.

Metod	Algoritam	$SSE_i (A^2)$	$SSE_v (A^2)$	$RMSE_i$	$RMSE_v$
1	CSA	23.548886960800552	0.853607546581976	1.345902241300795	0.256246207714074
2	NNA	56.571712346939165	2.081763815520830	2.086065718172316	0.400169561707268
3	GWO	28.527774397048315	1.163259364752509	1.481365648443467	0.299134567705484
4	SCA	24.731609266881868	0.933531087627972	1.379286584458733	0.267974035428230
5	MPA	22.977565970494897	0.813963431406278	1.329475488549320	0.250225042005465
6	HGSA	78.185656190363829	2.824387193430035	2.452403157193491	0.466112168196425
7	MRFO	23.547099601342829	0.853660762162336	1.345851163371882	0.256254195036932
8	WOA	23.535982735566364	0.853766238081463	1.345533429695518	0.256270025571206
9	NNA	23.869085838021725	0.863696549253894	1.355021596138479	0.257756078679928
10	GOA	23.681666490129977	0.874273416970947	1.349691317704505	0.259329522626055

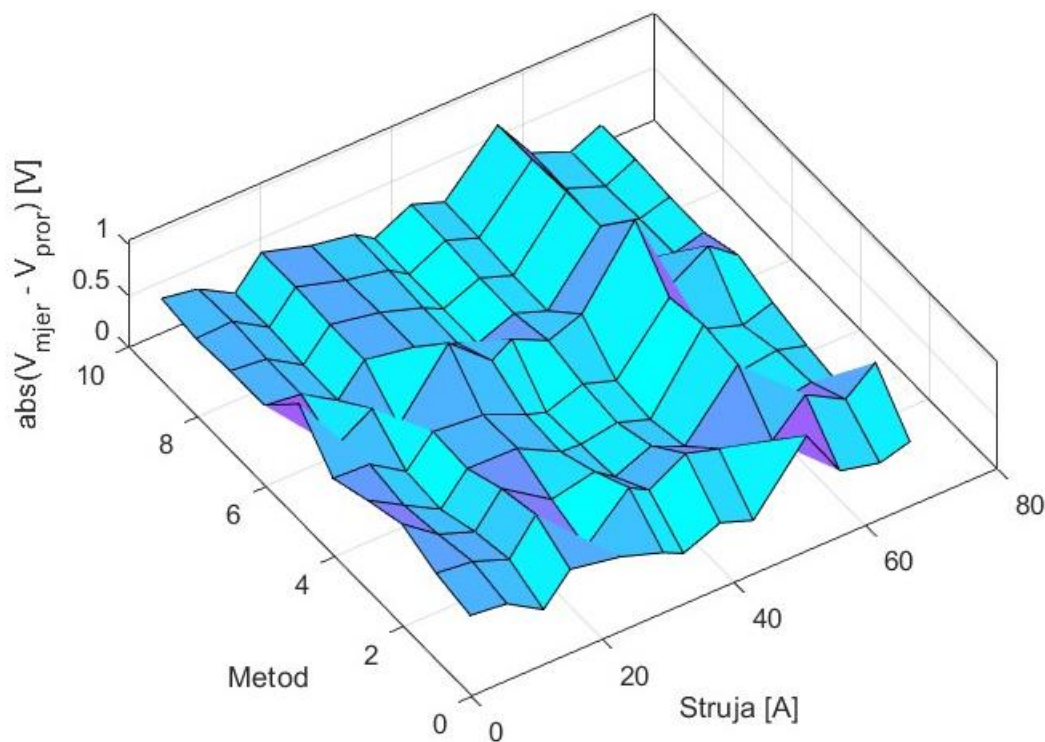
Na slikama 5.1 i 5.2 su date: 3D grafička zavisnost napon – struja - metod (izračunata pomoću jednačine (1) iz podpoglavlja 2.5) i 3D grafička zavisnost struja – napon - metod (izračunata pomoću jednačine (4) iz poglavlja 4). Komparacijom rezultata prikazanih na slikama 5.1 i 5.2 može se doći do zaključka da bez obzira na upotrijebljen matematički model, vrijednosti napona i struja su vrlo slične za parametre estimirane preko iste metode. Slike 5.3 i 5.4 prikazuju 3D zavisnost greške napona, odnosno greške proračuna struje dobijene primjenom parametara za svaki ispitivani metod.



Slika 5.1. Napon – struja - metod zavisnost kod Ballard-Mark-V 5 kW ćelije



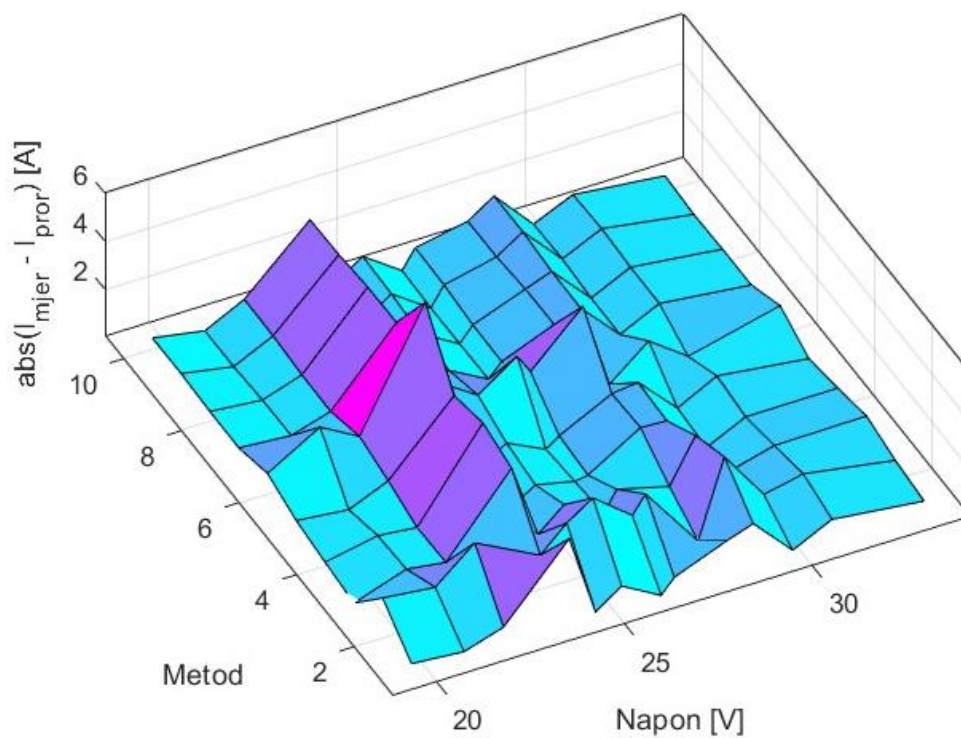
Slika 5.2. Struja – napon - metod zavisnost kod Ballard-Mark-V 5 kW ćelije



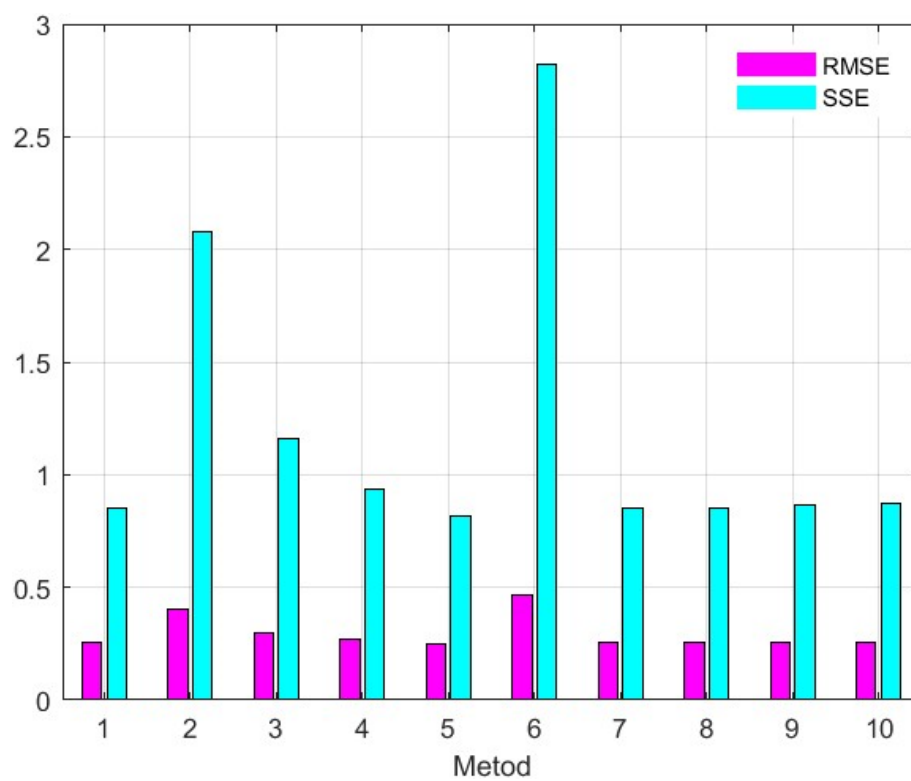
Slika 5.3. Greška napona – struja - metod zavisnost kod Ballard-Mark-V 5 kW ćelije

Poređenjem grafika 5.3 i 5.4, može se primijetiti da su 3D krive za napon – struja - metod, kao i za struja – napon - metod dobijene upotrebom predloženog inverznog matematičkog modela, veoma bliske. Ovo potvrđuje tačnost inverznog postupka za računanje struje PEMFC-a. Sa grafika 5.3 se može uočiti da je kod Ballard Mark V 5 kW PEMFC-a, najveće odstupanje između mjerenih i simuliranih vrednosti napona dobijeno primjenom parametara određenih metodom 6 (HGSA). Taj rezultat potvrđuju vrijednosti *RMSE* i *SSE* napona koje su date u Tabeli 5.2. Sa grafika 5.4 se može vidjeti da je kod Ballard Mark V 5 kW PEMFC-a, najveće odstupanje između mjerenih i simuliranih vrijednosti struje takođe dobijeno primjenom parametara određenih metodom 6 (HGSA). Kod oba matematička modela najveće odstupanje pojavljuje se kod iste metode – HGSA. Sa grafika 5.3 se može uočiti da je kod Ballard Mark V 5 kW PEMFC-a, najmanje odstupanje između mjerenih i simuliranih vrednosti napona dobijeno primjenom parametara određenih metodom 5 (MPA). Metoda MPA daje najtačniju estimaciju parametara kod matematičkog modela napon – struja. Sa grafika 5.4 se može vidjeti da je kod Ballard Mark V 5 kW PEMFC-a, najmanje odstupanje između mjerenih i simuliranih vrijednosti struje takođe dobijeno primjenom parametara određenih metodom 5 (MPA). Dakle, MPA daje najtačniji rezultat estimacije parametara za matematički model struja – napon zavisnosti.

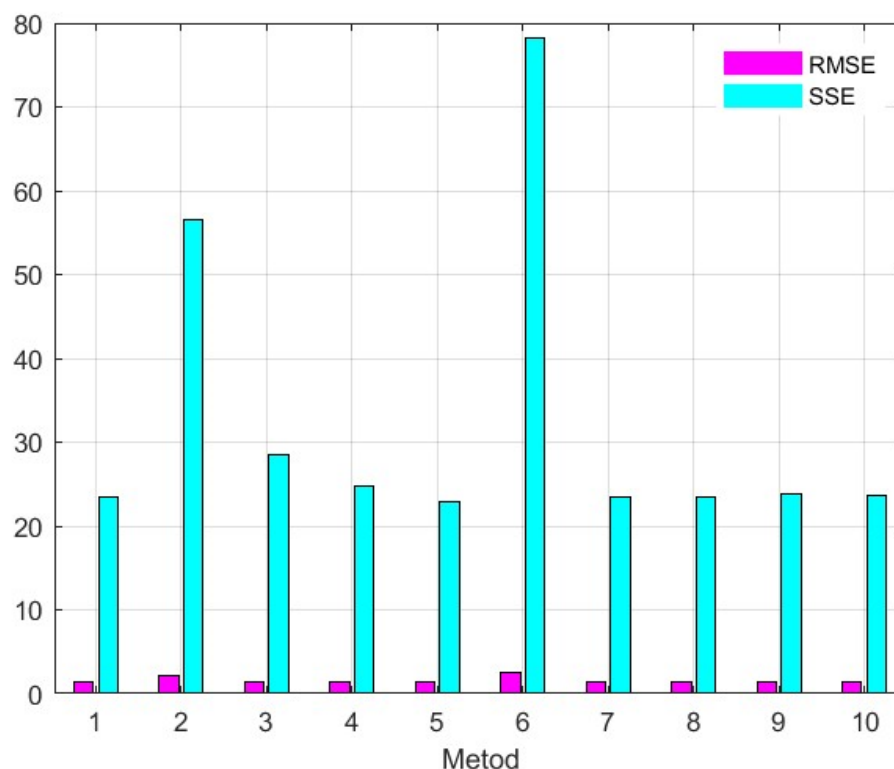
Grafički prikaz *SSE* i *RMSE* vrijednosti, izračunatih za napone i struje, dati su na slikama 5.5 i 5.6 za Ballard-Mark-V 5 kW PEMFC.



Slika 5.4. Greška struje - napon - metod zavisnost kod Ballard-Mark-V 5 kW ćelije



Slika 5.5. Vrijednosti *RMSE* i *SSE* bazirane na vrijednostima napona kod Ballard-Mark-V 5 kW ćelije



Slika 5.6. Vrijednosti *RMSE* i *SSE* bazirane na vrijednostima struje kod Ballard-Mark-V 5 kW ćelije

5.2 Pregled literature za *PEMFC* sklop *BCS 500 W*

U literaturi su poznata mjerenja napona i struje PEMFC sklop-a BCS 500W [30]. Nominalna snaga BCS 500W sklopa je 500 W, a maksimalna vrijednost nominalne struje iznosi 30 A. Tehnička specifikacija ovog PEMFC sklopa je sljedeća [30]:

- $N_{\text{ćelija}} = 32$, predstavlja broj ćelija povezanih u sklopu,
- $M_A = 64 \text{ cm}^2$, predstavlja površinu membrane,
- $l = 178 \text{ mm}$, predstavlja dužinu ćelije,
- $T_{fc} = 333 \text{ K}$, predstavlja temperaturu gorivne ćelije,
- $J_{\text{max}} = 0.469 \text{ A/cm}^2$, predstavlja maksimalnu gustinu struje.
- $P_{O_2} = 1 \text{ atm}$, predstavlja operativni parcijalni pritisak kiseonika u ćeliji,
- $P_{H_2} = 0.2075 \text{ atm}$, predstavlja operativni parcijalni pritisak vodonika u ćeliji.

Različiti metaheuristički algoritmi su nedavno upotrijebljeni za određivanje parametara BCS 500W PEMFC sklopa, kao što su algoritam pretrage kruga (CSA) [28], sinusno-kosinusni algoritam (SCA) [28], algoritam optimizacije sivih vukova – algoritam pretrage kukavice (GWO-CS) [29], optimizacija sivih vukova (GWO) [28], haotični algoritam optimizacije vodenih cvjetova (CMOA) [29], algoritam neuralnih mreža (NNA)

[28,30], algoritam optimizacije svitaca (FOA) [31], imperijalistički kompetitivni algoritam (ICA) [31], algoritam skakutanja žaba (SFLA) [31] i drugi.

U Tabeli 5.3 je prikazan pregled parametara PEMFC steka BCS 500 W koji su određeni upotrebom prethodno pomenutih metaheurističkih algoritama. Na osnovu optimalnih parametara za svaku metodu iz Tabele 5.3, proračunati su *SSE* i *RMSE* za napone prema relacijama (9) i (10) iz poglavlja 2.5. Takođe, proračunati su *SSE* i *RMSE* za struje prema relacijama (1) i (2) iz poglavlja 5. Rezultati proračuna *SSE* i *RMSE* za napone i struje dati su u Tabeli 5.4. Za BCS 500 W PEMFC, minimalne vrijednosti *SSE* i *RMSE* za napone dobijene su ako su parametri određeni metodom 7 - NNA, kao što je prikazano u Tabeli 5.4. Dakle, metaheuristički algoritam NNA daje najtačniju estimaciju parametara sa aspekta napona. Minimalne vrijednosti *SSE* i *RMSE* za struje dobijene su ako su parametri određeni metodom 6 - CMOA, kao što je prikazano u Tabeli 5.4. Može se primijetiti da su *RMSE* i *SSE* za struje za ova dva metoda vrlo sličnih vrijednosti. Isti zaključak po pitanju grešaka važi i za napone. Na osnovu toga se može doći do zaključka da su oba matematička modela (napon – struja i struja – napon) ravnopravna i da daju tačne i vjerodostojne rezultate prilikom estimacije parametara.

Na slikama 5.7 i 5.9 su date: 3D grafička zavisnost napon – struja - metod (izračunata pomoću jednačine (1) iz podpoglavlja 2.5) i 3D grafička zavisnost struja – napon - metod (izračunata pomoću jednačine (4) iz poglavlja 4). Sličnost grafika sa slika 5.7 i 5.9 dokazuje efikasnost izvedenog matematičkog modela u poglavlju 4. Dakle, može se zaključiti da su matematički modeli napon – struja i struja – napon jednako vjerodostojni i pouzdani. Slike 5.8 i 5.10 prikazuju 3D zavisnost greške napona, odnosno greške proračuna struje dobijene primjenom parametara za svaki ispitivani metod. Na osnovu grafika grešaka, tj. razlike između mjerenih i simuliranih vrijednosti, u BCS 500 W PEM sklopu, najveće odstupanje napona je kod parametara određenih metodom 4 (SCA), što je u skladu sa rezultatima prikazanim u Tabeli 5.4. Za BCS 500 W, najveće odstupanje između mjerenih i simuliranih vrijednosti struje dobijeno je primjenom parametara određenih metodom 4 (SCA). Ta kompatibilnost rezultata potvrđuje vjerodostojnost predloženog modela za određivanje vrijednosti struje PEMFC u zavisnosti od napona.

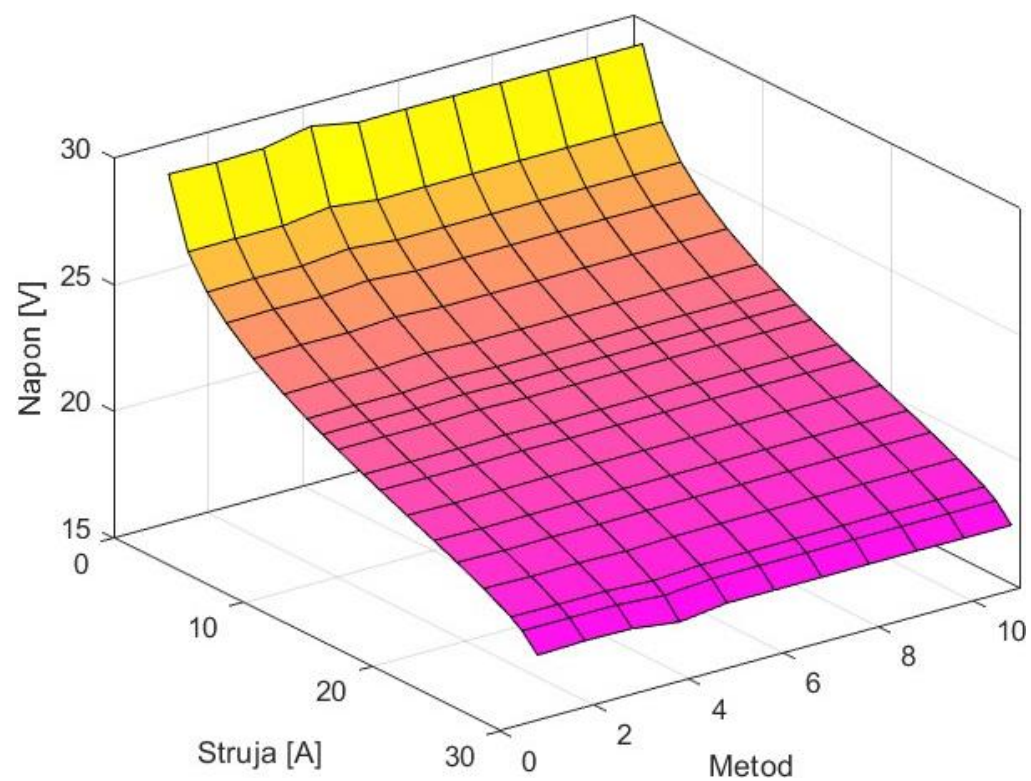
Grafički prikaz *SSE* i *RMSE* vrijednosti, izračunatih za napone i struje, dati su na slikama 5.11 i 5.12 za BCS 500 W PEMFC.

Tabela 5.3. Optimalni parametri PEMFC sklopa BCS 500 W u odabranoj literaturi

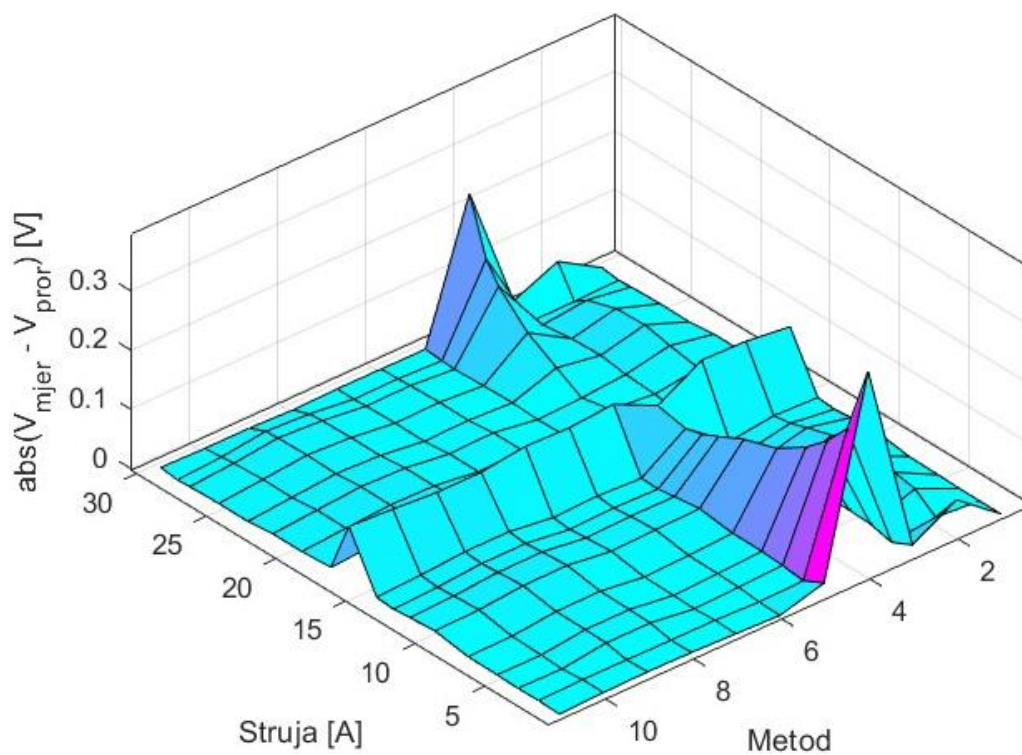
Metod	god.	Algoritam	Ref.	ξ_1	$\xi_2 \cdot 10^{-3}$	$\xi_3 \cdot 10^{-5}$	$\xi_4 \cdot 10^{-3}$	λ	Rc (m Ω)	β
1	2022	CSA	[28]	-1.176591336	3.496528	5.8319	-19.2897	21.324205865	0.146406	0.016140539
2	2022	NNA	[28]	-0.872909631	3.189571	9.7398	-18.5976	22.99629125	0.8	0.013630041
3	2022	GWO	[28]	-1.195202326	3.627031	6.3151	-19.12	19.262620378	0.116867	0.014900638
4	2022	SCA	[28]	-0.867565778	2.527557	5.3856	-20.1822	23	0.164497	0.018910432
5	2021	GWO-CS	[29]	-1.04401	3.251	6.82	-19.118	22.48551	0.362	0.015624
6	2021	CMOA	[29]	-0.85321	3.141	9.8	-19.2993	20.86005	0.1	0.016117
7	2019	NNA	[30]	-1.0596	3.7435	9.6902	-19.302	20.8772	0.1	0.0161
8	2019	SFLA	[31]	-0.96574	3.08	7.2236	-19.3	20.88622	0.1	0.016126
9	2019	ICA	[31]	-0.908643	2.4798	4.4583194	-19.3	22.66264	0.246	0.016238
10	2019	FOA	[31]	-0.992829	2.621	3.74636	-19.3	21.101126	0.1	0.016269

Tabela 5.4. Proračunate vrijednosti *RMSE* i *SSE* PEMFC sklopa BCS 500 W za metode iz Tabele 5.3.

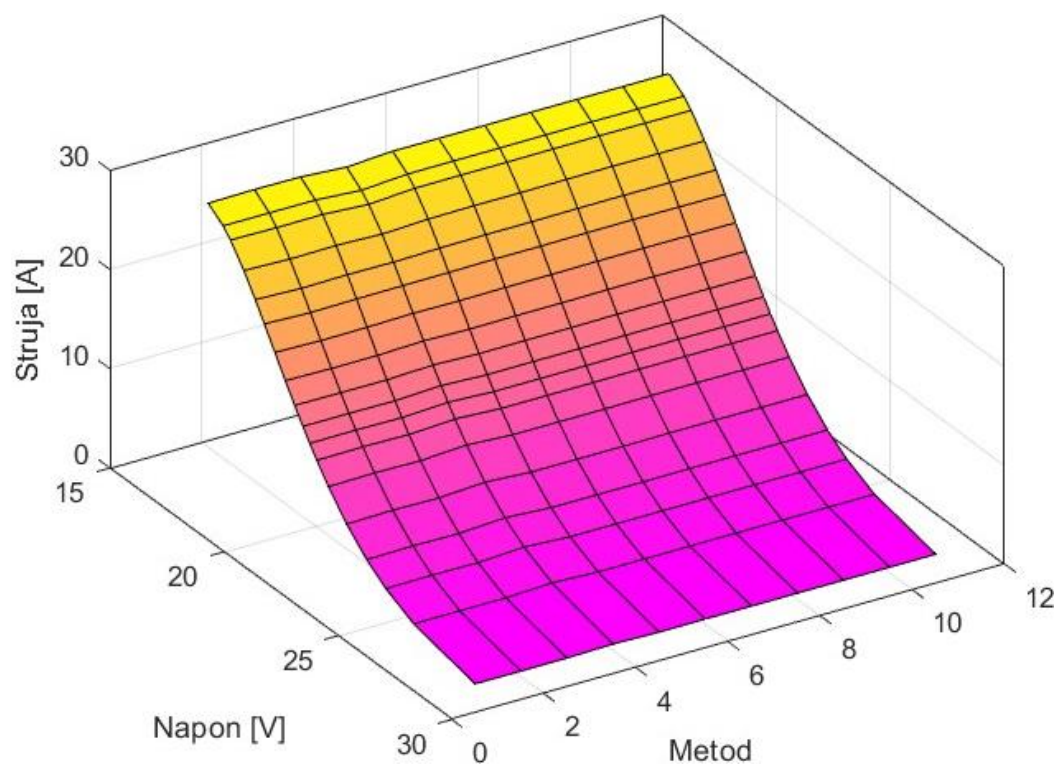
Metod	Algoritam	$SSE_i (A^2)$	$SSE_v (V^2)$	$RMSE_i$	$RMSE_v$
1	CSA	0.213603497765414	0.011736199110239	0.108935122834499	0.025534507273099
2	NNA	0.345523079118625	0.030298224780015	0.138548643507258	0.041027243509659
3	GWO	0.254625912431341	0.015070061926183	0.118936470537692	0.028934852039810
4	SCA	1.115213928571142	0.365310876170716	0.248910283767191	0.142460691687745
5	GWO-CS	0.220853729250544	0.012933936856469	0.110768459522692	0.026805821151042
6	CMOA	0.213426224085352	0.011782301354312	0.108889909767555	0.025584610559119
7	NNA	0.214106230484519	0.011709627830430	0.109063241206528	0.025505585260258
8	SFLA	0.229028490943649	0.013357560086108	0.112799845090430	0.027241267801820
9	ICA	0.238446251570965	0.014026608036396	0.115095673142672	0.027915157209337
10	FOA	0.217527261118590	0.012017338267595	0.109931104969984	0.025838535247867



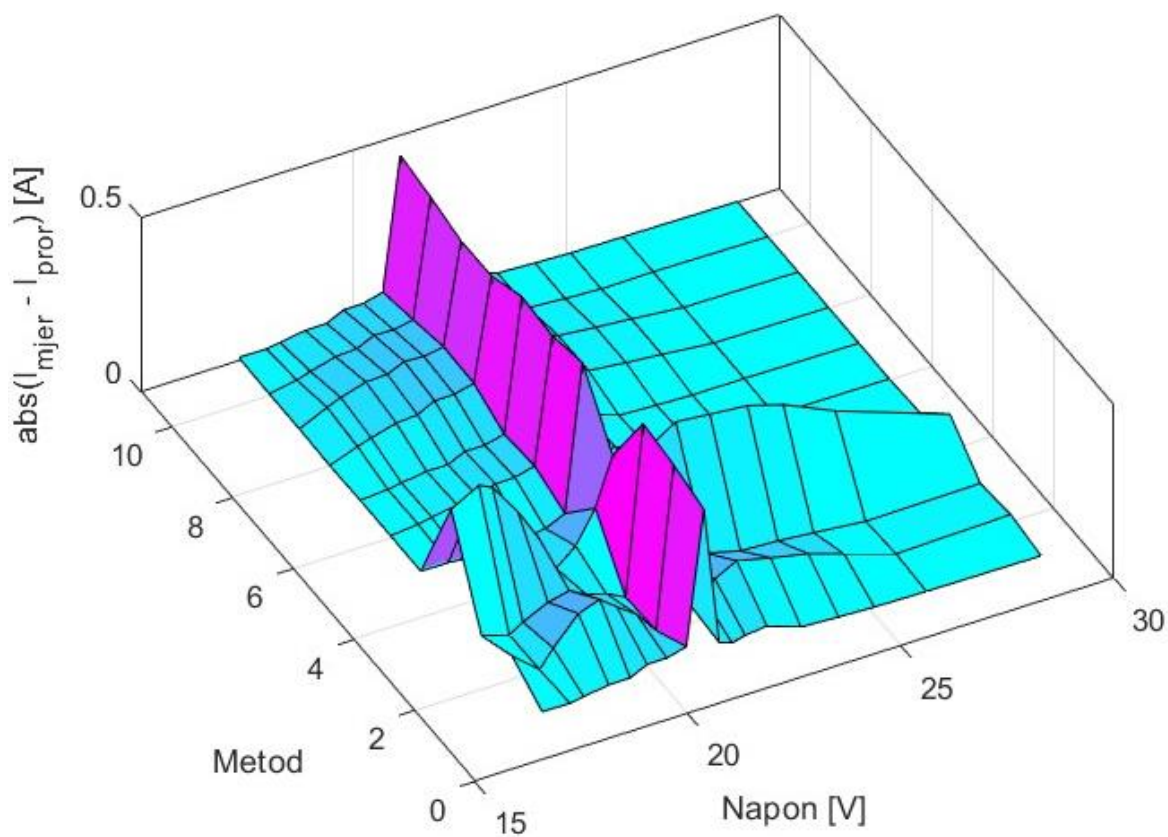
Slika 5.7. Napon – struja - metod zavisnost kod BCS 500 W ćelije



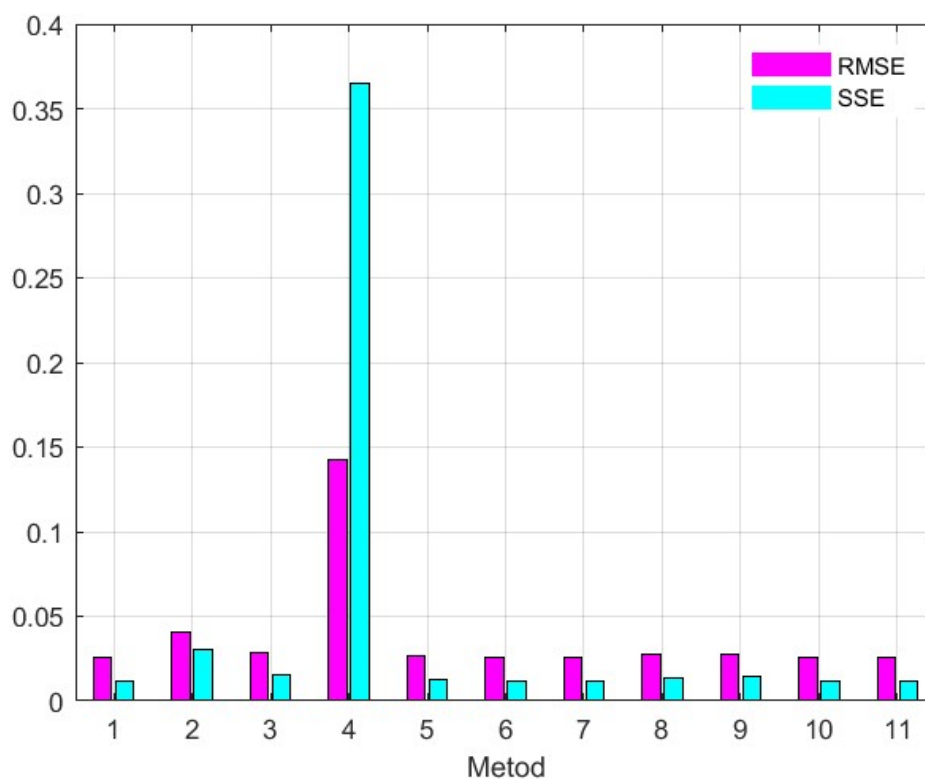
Slika 5.8. Greška napon – struja – metod zavisnost kod BCS 500 W ćelije



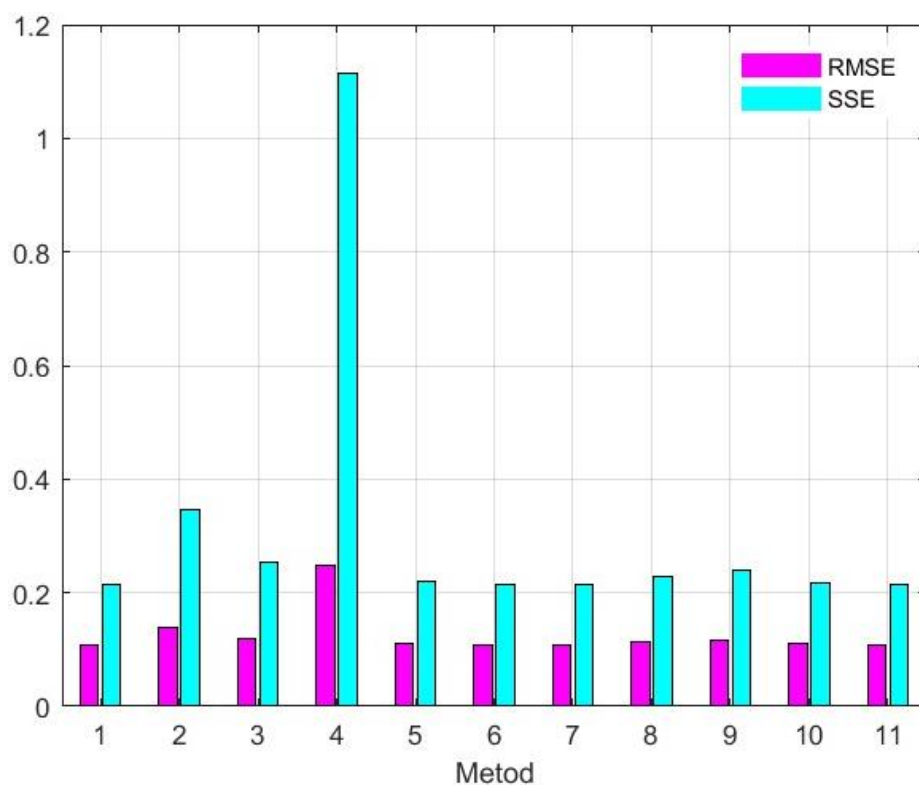
Slika 5.9. Struja – napon - metod zavisnost kod BCS 500 W ćelije



Slika 5.10. Greška struja – napon – metod zavisnost kod BCS 500 W ćelije



Slika 5.11. Vrijednosti $RMSE$ i SSE bazirane na vrijednostima napona kod BCS 500 W ćelije



Slika 5.12. Vrijednosti $RMSE$ i SSE bazirane na vrijednostima struje kod BCS 500 W ćelije

5.3 Estimacija parametara PEMFC sklopa BCS 500 W

U ovom podpoglavlju su predstavljeni rezultati estimacije parametara primjenom tri hibridne varijante WaOA algoritma.

5.3.1 Estimacija parametara upotrebom AWaOA

Prvi korak u estimaciji parametara podrazumijeva definisanje donjih i gornjih granica svih parametara. Prilikom odabira graničnih vrijednosti opsega parametara razmatrane su granične vrijednosti opsega upotrijebljene u dostupnoj literaturi [28-36]. Na osnovu analize rezultata iz literature, može se primijetiti da se gornja granična vrijednost parametra λ uvijek ograničava na vrijednost 24. Kako je u ovom radu već navedeno da je to parametar koji ukazuje na sadržaj vode u membrani, 24 je gornja granica za optimalan režim rada ćelije. Za λ veće od 24, membrana je prekomjerno hidrirana, što može dovesti do prekomjernog curenja vodonika kroz membranu [31]. Takođe, ekvivalentna otpornost kontakata pri provođenju elektrona R_c u literaturi ima donju granicu opsega mogućih parametara koja je fiksna i iznosi 0.1. Vrijednosti ispod ove ukazuju da je u pitanju savršen kontakt i garantuju bolje provođenje elektrona. U Tabeli 5.5 su date granične vrijednosti parametara koje su upotrijebljene za najbolju estimaciju parametara:

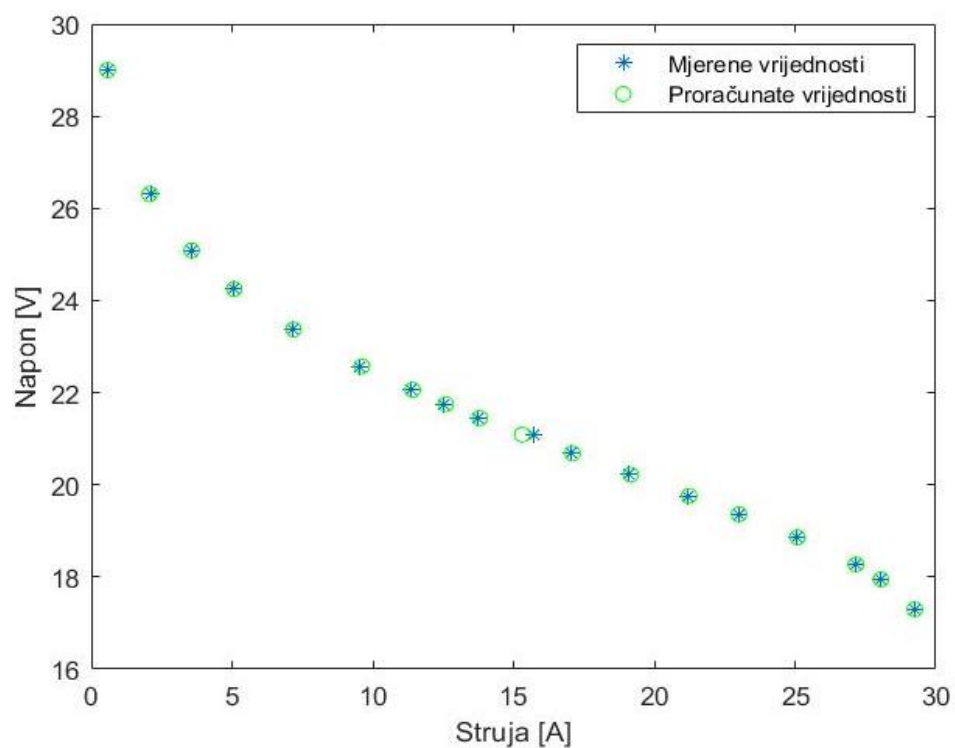
Tabela 5.5. Granične vrijednosti parametara koji se estimiraju

Granice	ξ_1	$\xi_2 \cdot 10^{-3}$	$\xi_3 \cdot 10^{-5}$	$\xi_4 \cdot 10^{-5}$	λ	$R_c(m\Omega)$	β
Donja granica	-1.1997	1	1	-26	13	0.1	0.0136
Gornja granica	-0.8	5	10	-9.54	24	0.8	0.1

Najbolji rezultat estimacije parametara je onaj koji daje najmanju vrijednost $RMSE_l$. Vrijednosti najboljih parametara PEMFC sklopa BCS 500 W estimiranih pomoću hibridne adaptivne varijante WaOA algoritma su sljedeće:

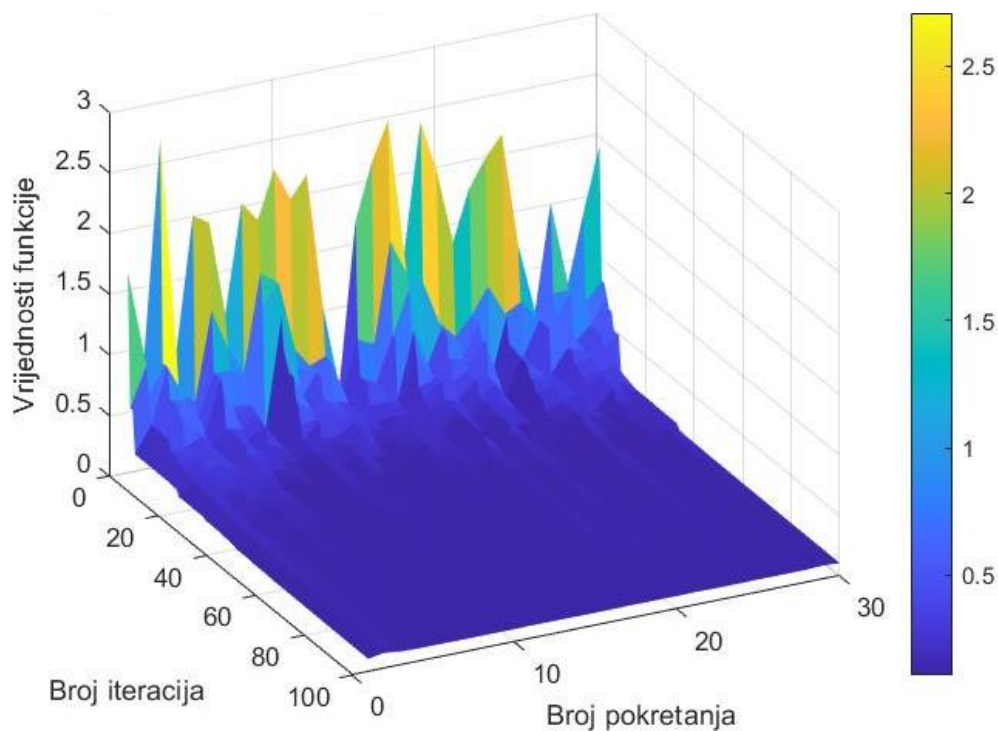
- $\xi_1 = -0.856153436733836$
- $\xi_2 = 2.467516026770043$
- $\xi_3 = 5.433527509219566$
- $\xi_4 = -18.937983385960642$
- $\lambda = 19.746209139442300$
- $R_c = 0.100199866618533$
- $\beta = 0.015844803740275$

Na slici 5.13 je dat grafik na kojem su predstavljene tačke kojima odgovaraju mjerene vrijednosti napona i struje. Poznatih 18 mjerenih vrijednosti je upoređeno grafički sa 18 proračunatih vrijednosti koje su dobijene najboljom estimacijom parametara. Ovaj grafik je dokaz veoma male greške prilikom estimacije i samim tim veoma dobrog poklapanja mjerenih i proračunatih vrijednosti.



Slika 5.13. Napon - struja karakteristika BCS 500W ćelije, dobijena pomoću AWaOA

Na slici 5.14 je prikazan 3D prikaz broja iteracija - broja pokretanja - vrijednosti funkcije cilja kod primjene AWaOA algoritma.

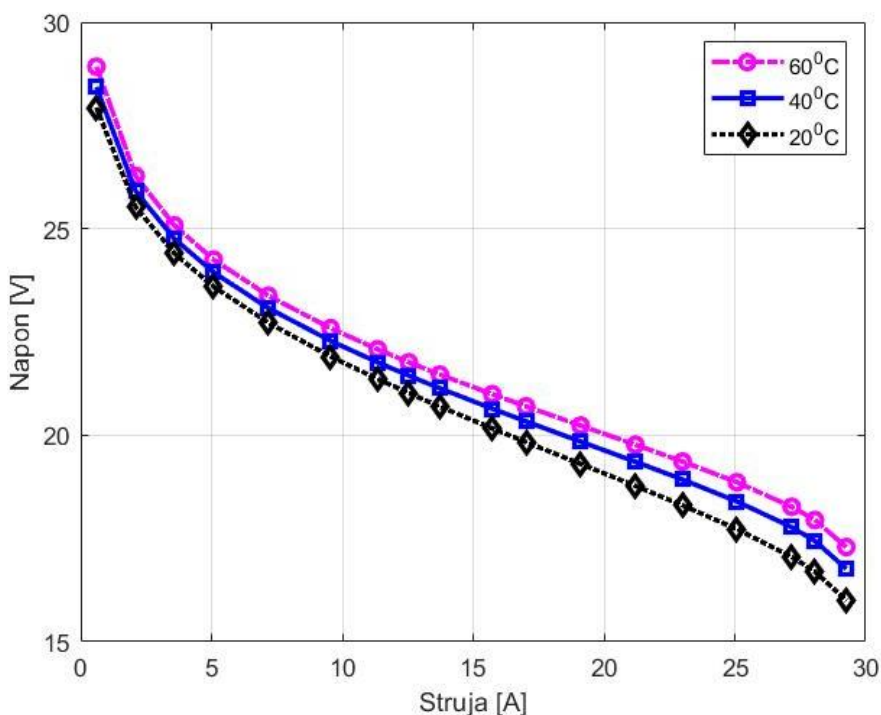


Slika 5.14. Vrijednosti funkcije cilja u zavisnosti od broja pokretanja i iteracija

Sa prethodnog grafika se može zaključiti da predložena adaptivna varijanta algoritma za svako pokretanje konvergira do iste krajnje vrijednosti funkcije cilja – minimalne, bez obzira na početnu vrijednost funkcije cilja, koja vidimo varira za razna pokretanja algoritma.

S ciljem dodatne potvrde tačnosti estimacije upotrebom adaptivne varijante WaOA, na graphicima 5.15 i 5.16, redom, su predstavljene napon – struja karakteristike i snaga – struja karakteristike sa različitim vrijednostima temperature za BCS PEMFC sklop. Karakteristike su dobijene tako što se za gore navedene estimirane parametre promijenjene vrijednosti temperature u matematičkom modelu navedenom u poglavlju 2.5.

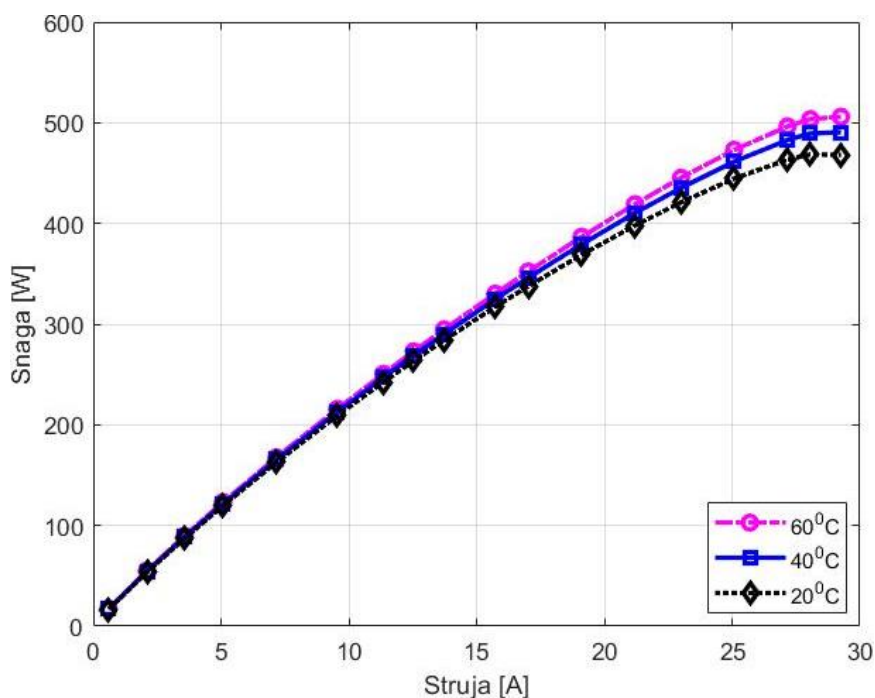
Posmatrajući grafike sa slika 5.15 i 5.16 može se doći do zaključka da i napon i snaga rastu sa porastom temperature. Sa slike 5.16 se može zaključiti da sa porastom temperature raste snaga PEMFC, što znači da su bolji performansi PEMFC, jer je povećana difuzija gasa i provodnost membrane [9]. Najveći rast snage je pri većim vrijednostima struje. Najveće vrijednosti napona i snage imamo pri temperaturi od 60 stepeni (magenta karakteristika).



Slika 5.15. Napon - struja karakteristike za tri različite temperature BCS 500W ćelije

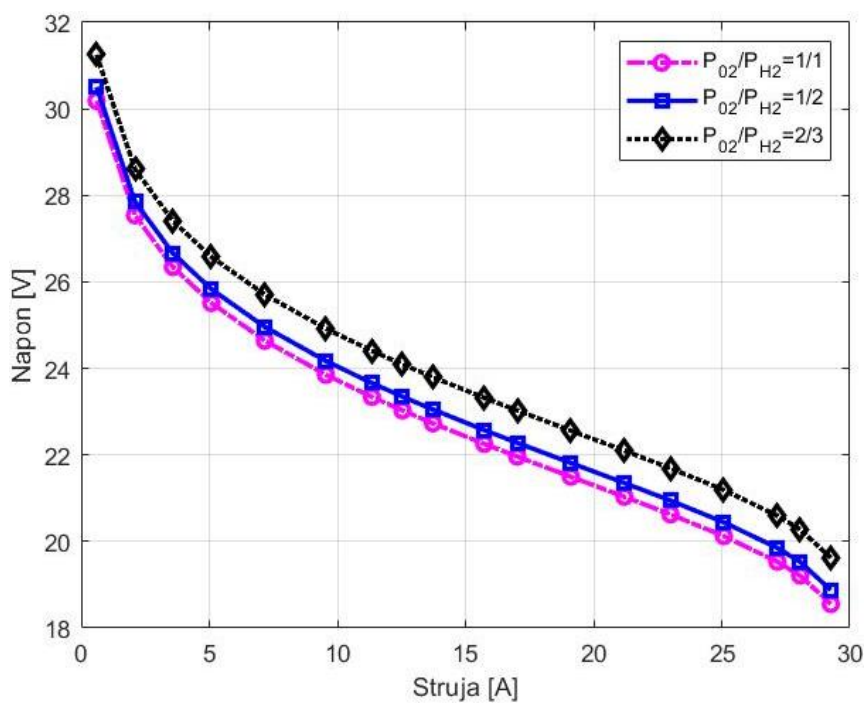
Temperatura od 60°C (oko 333 K) je razmatrana jer to je nominalna temperature BCS 500 W ćelije koja je data u specifikacijama proizvođača [30]. Temperature od 20°C i 40°C su odabrane zato što ova PEMFC radi u tom opsegu temperatura. Karakteristike sa slike 5.15 su slične kao karakteristika PEMFC na slici 5.13 – za rast malih struja se može uočiti brži pad napona, dok je kasnije za veće vrijednosti struja taj pad sporiji i blaži. Slike 5.15 i 5.16 potvrđuju činjenicu da je temperatura bitna za efikasnost PEMFC. Međutim, ako je temperatura previsoka, može doći do kontra efekta – pad sadržaja vode u membrani, povećanje otpornosti membrane, manja izlazna snaga PEMFC. S druge

strane, ako je temperatura preniska, može doći do poplave vode u PEMFC, što značajno smanjuje efikasnost same ćelije [90].

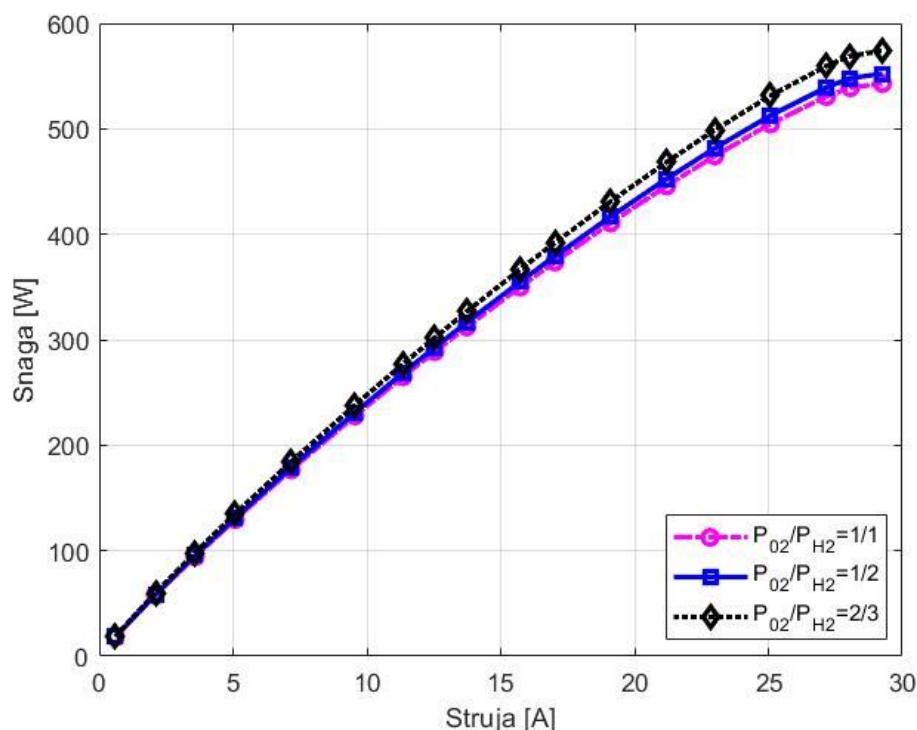


Slika 5.16. Snaga - struja karakteristike za tri različite temperature BCS 500W ćelije

Na slikama 5.17 i 5.18 su redom predstavljene karakteristike napon – struja u snaga – napon za različite odnose pritiska kiseonika i vodonika (P_{O_2}/P_{H_2}) za PEMFC sklop BCS.



Slika 5.17. Napon - struja karakteristike za različite odnose pritiska BCS 500W ćelije



Slika 5.18. Snaga - struja karakteristike za različite odnose pritisaka BCS 500W ćelije

Sa slika 5.17 i 5.18 se može zaključiti da sa porastom pritiska rastu napon i temperatura PEMFC.

5.3.2 Estimacija parametara upotrebom HWaOA

Prilikom estimacije parametara, prvenstveno je potrebno definisati gornje i donje granične vrijednosti svih parametara. Prilikom definisanja gornjih i donjih granica svih parametara za ovu hibridnu varijantu, uzete su u obzir granične vrijednosti opsega koje su korištene u dostupnoj literaturi [28-36]. Kod haotične varijante WaOA se koristio širi opseg mogućih vrijednosti parametara kako bi se ostvarila što manja vrijednost razlike između mjerenih i proračunatih vrijednosti struje. U Tabeli 5.6 su date granične vrijednosti parametara koje daju najtačniju estimaciju parametara:

Tabela 5.6. Granične vrijednosti parametara koji se estimiraju

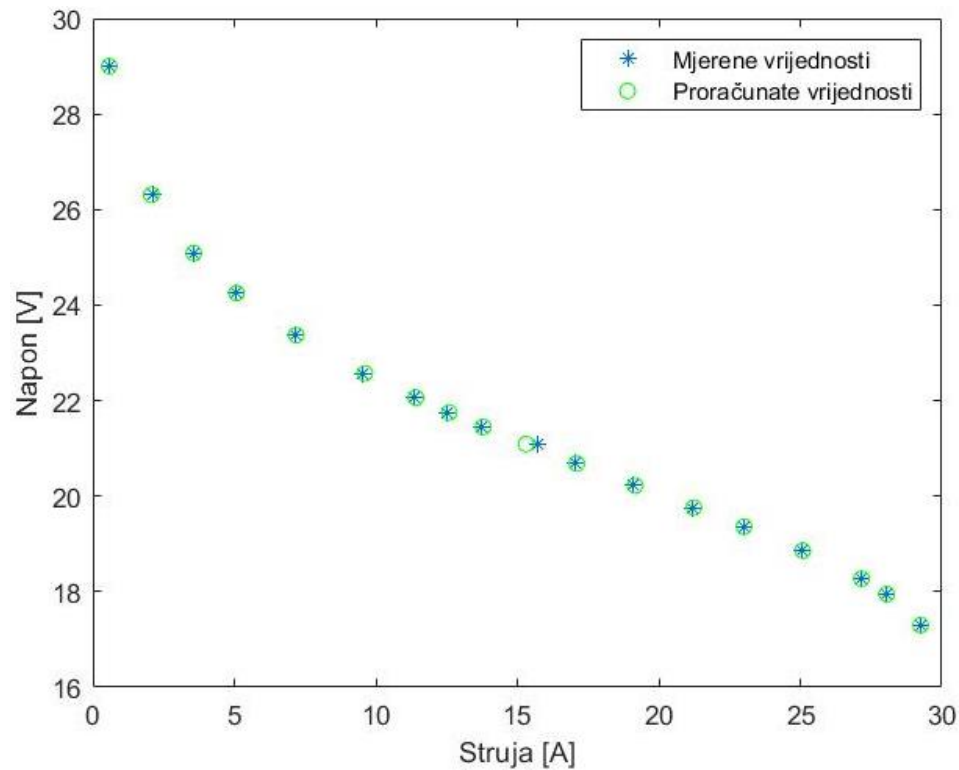
Granice	ξ_1	$\xi_2 \cdot 10^{-3}$	$\xi_3 \cdot 10^{-5}$	$\xi_4 \cdot 10^{-5}$	λ	$R_c (m\Omega)$	β
Donja granica	-1.1997	1	1	-26	13	0.1	0.0136
Gornja granica	-0.8	5	10	-9.54	24	1	0.1

Vrijednosti najboljih parametara PEMFC sklopa BCS 500 W estimiranih pomoću hibridne haotične varijante WaOA algoritma su sljedeće:

- $\xi_1 = -0.973425648830016$

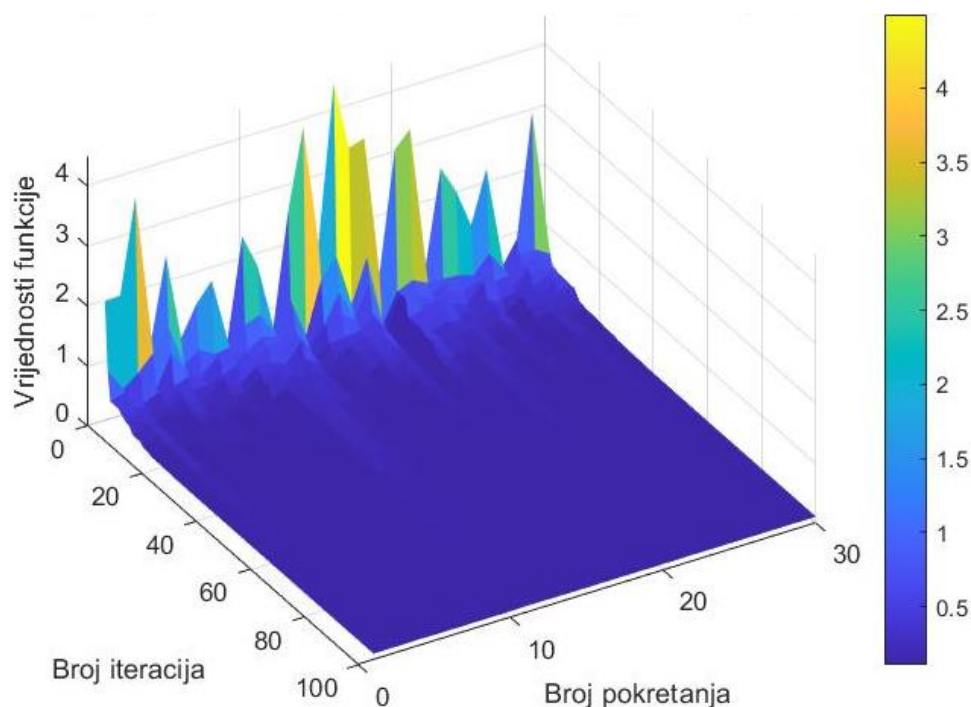
- $\xi_2 = 2.318219690581404$
- $\xi_3 = 2.199934045783759$
- $\xi_4 = -18.941779551863064$
- $\lambda = 19.765185513519302$
- $R_c = 0.100029237005423$
- $\beta = 0.015854151677821$

Slika 5.19 oslikava vjerodostojnost estimacije parametara preko haotične varijante, jer je vidljivo veoma dobro poklapanje mjerenih i proračunatih vrijednosti.



Slika 5.19. Napon - struja karakteristika BCS 500W ćelije, dobijena pomoću HWaOA

Na slici 5.20 je dat 3D prikaz broja iteracija - broja pokretanja - vrijednosti funkcije cilja za ovu varijantu algoritma.



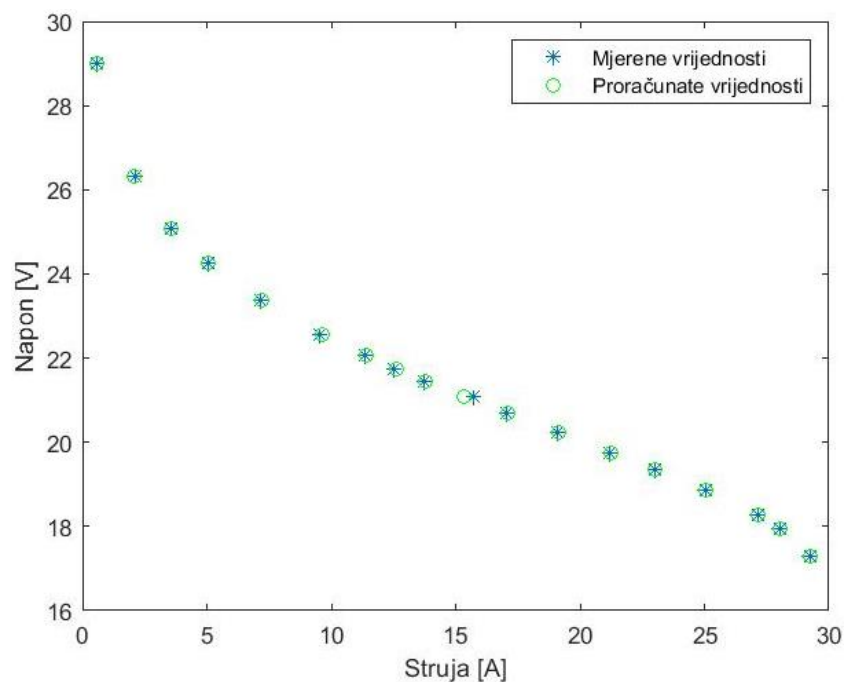
Slika 5.20. Vrijednosti funkcije cilja u zavisnosti od broja pokretanja i iteracija

Kod ove varijante algoritma je broj pokretanja algoritma 30, a broj iteracija 100. Ako se uporedi ovaj 3D grafik sa 3D grafikom za adaptivnu varijantu algoritma, može se zaključiti da su početne vrijednosti funkcije cilja veće kod haotične, nego kod adaptivne varijante. Jasno se vidi da, za svako pokretanje algoritma, isti konvergira ka optimalnom rješenju.

S obzirom na to da parametar λ oslikava vlažnost membrane, gornja granica tog parametra se u literaturi ograničava na 24. Rad u zadatim granicama predstavlja optimalan režim rada PEMFC. Na grafiku 5.21 je prikazano poklapanje mjerenih i proračunatih vrijednosti struje u slučaju kada gornju granicu za λ postavimo na 25, što će predstavljati specifičan režim rada PEMFC, kada je vlažnost membrane povećana. Prilikom estimacije, sve ostale granične vrijednosti su ostale nepromijenjene, iste kao iz Tabele 5.6.

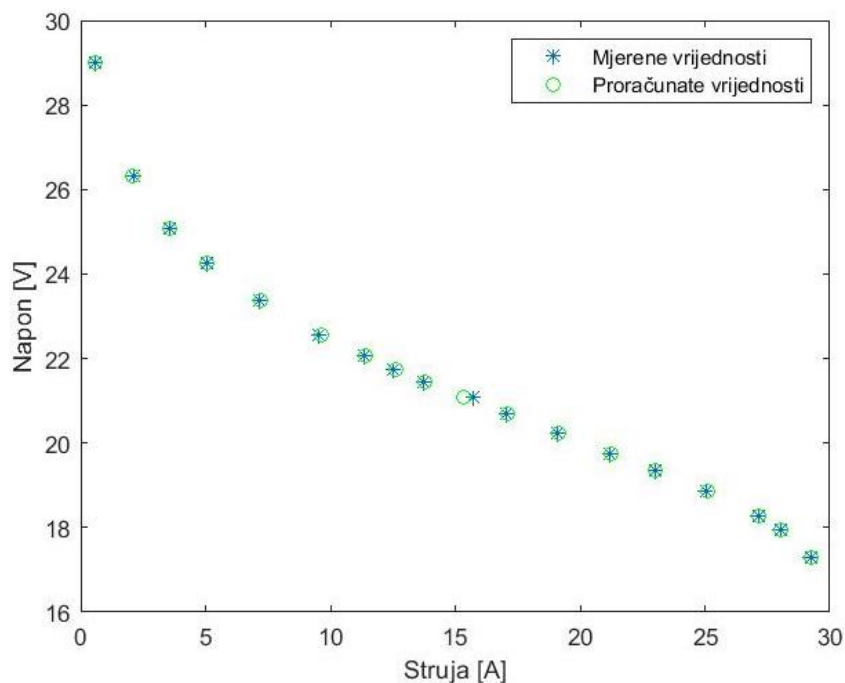
Vrijednosti parametara PEMFC sklopa BCS 500 W estimiranih pomoću hibridne haotične varijante WaOA algoritma, sa gornjom granicom za λ od 25, su sljedeće:

- $\xi_1 = -1.121243033132999$
- $\xi_2 = 3.304783983919249$
- $\xi_3 = 5.699790241604184$
- $\xi_4 = -18.933599952406567$
- $\lambda = 19.739805790306928$
- $R_c = 0.100462289594135$
- $\beta = 0.015844453414832$.



Slika 5.21. Napon - struja karakteristika BCS 500W ćelije, dobijena za gornju granicu λ jednaku 25

Takođe, na grafiku 5.22 je prikazano poklapanje mjerenih i proračunatih vrijednosti struje u slučaju kada gornju granicu za λ postavimo na 26, što predstavlja slučaj još veće ovlaženosti membrane. Prilikom estimacije, sve ostale granične vrijednosti su ostale nepromijenjene, iste kao iz Tabele 5.6.



Slika 5.22. Napon - struja karakteristika BCS 500W ćelije, dobijena za gornju granicu λ jednaku 26

Vrijednosti parametara PEMFC sklopa BCS 500 W estimiranih pomoću hibridne haotične varijante WaOA algoritma, sa gornjom granicom za λ od 26 su sljedeće:

- $\xi_1 = -0.970183494840633$
- $\xi_2 = 2.601536306933215$
- $\xi_3 = 4.090061074997767$
- $\xi_4 = -18.935832188078749$
- $\lambda = 19.745788359059439$
- $R_c = 0.1000000000000000$
- $\beta = 0.015848843938797$.

Vrijednost parametra λ se nije mnogo promijenila sa promjenom njegove gornje granice. U slučaju kad je $\lambda = 26$, tada se vrijednost parametra R_c zaustavila na donjoj graničnoj vrijednosti, što znači da bi trebalo proširiti opseg tog parametra prilikom estimacije. U Tabeli 5.7 je dato poređenje za ova dva ekstremna slučaja, i to poređenje najbolje vrijednosti funkcije cilja, najgore, srednje i standardne devijacije.

Tabela 5.7. Poređenje tačnosti estimacije za dvije vrijednosti λ

λ	Najbolja vrijednost funkcije cilja	Najgora vrijednost funkcije cilja	Srednja vrijednost funkcije cilja	Standardna devijacija
$\lambda = 25$	0.1072758653611	0.1148021745239	0.1080182893314	$16.95 \cdot 10^{-4}$
$\lambda = 26$	0.107274036875	0.1131183060057	0.1078706441858	$13.33 \cdot 10^{-4}$

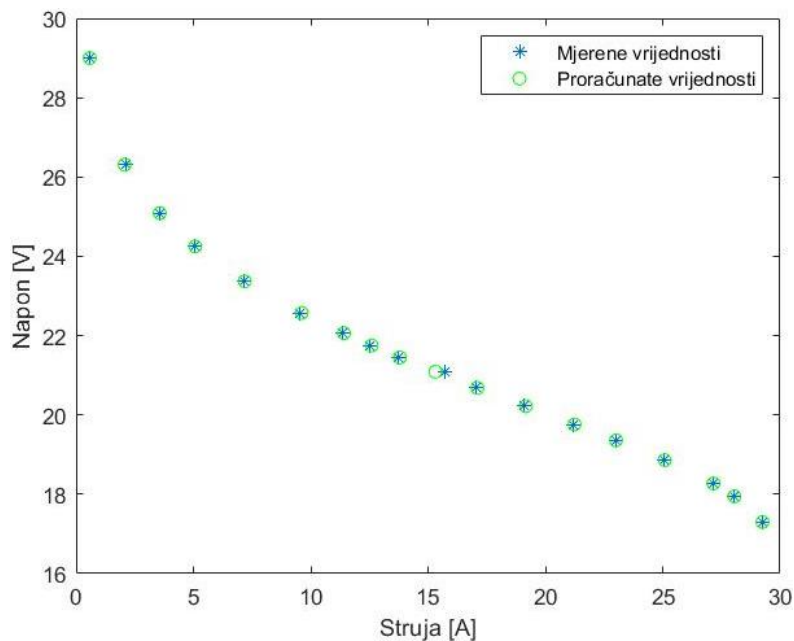
Kada je gornja granica za $\lambda = 24$, tada je najbolja vrijednost funkcije cilja, prilikom estimacije parametara, jednaka 0.1072741680922. Na osnovu najbolje vrijednosti funkcije cilja, može se doći do zaključka da kada je vrijednost $\lambda = 26$, da tada imamo najbolju vrijednost funkcije cilja, odnosno najmanje odstupanje. Kada je vrijednost $\lambda = 25$, odstupanje je veće nego kada je $\lambda = 24$. Kada se uporede grafici 5.19, 5.21, 5.22, vizuelno, ta razlika nije značajna. Može se zaključiti da se proširenjem opsega granica ovog parametra ostvarila bolja tačnost estimacije, ali da se estimirano λ nije mnogo promijenilo u odnosu na slučaj kada je gornja granica za ovaj parametar 24.

Iz dostupne literature je uočeno da je, prilikom estimacije, donja granica parametra R_c jednaka 0.1. Ta granična vrijednost je donja granica optimalnog režima u kom može raditi PEMFC. Analiziran je uticaj smanjenja donje granične vrijednosti R_c na estimaciju parametara. Iz tog razloga se analizira estimacija parametara kada je donja granična vrijednost za $R_c = 0.05$. U tom slučaju vrijednosti ostalih graničnih vrijednosti ostaju iste kao u Tabeli 5.6. Rezultat estimacije je prikazan na grafiku 5.23. Dobro poklapanje mjerenih i proračunatih vrijednosti struje ukazuje na visoku tačnost estimacije parametara.

Vrijednosti parametara PEMFC sklopa BCS 500 W estimiranih pomoću hibridne haotične varijante WaOA algoritma, sa donjom granicom za R_c od 0.05 su sljedeće:

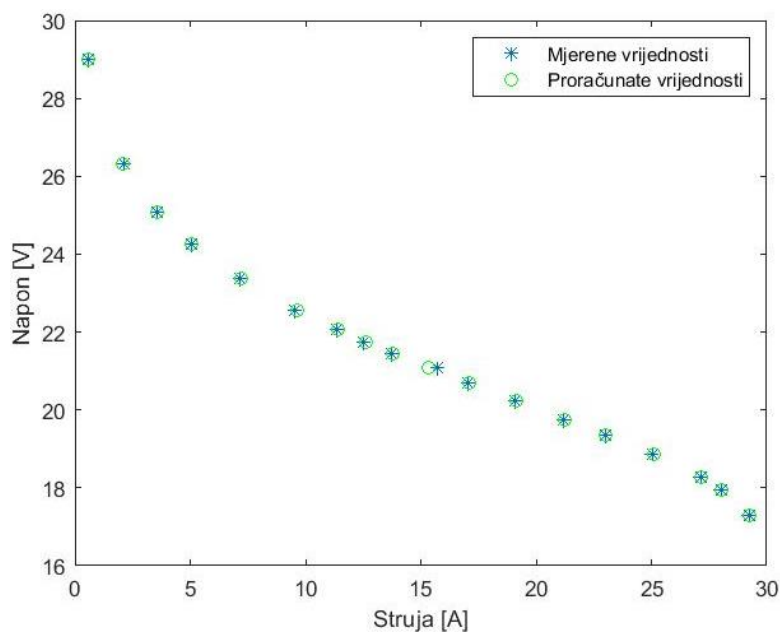
- $\xi_1 = -1.137729008959953$
- $\xi_2 = 3.403839259661627$
- $\xi_3 = 6.017933301194073$
- $\xi_4 = -18.955716231787441$
- $\lambda = 19.347028985330862$

- $R_c = 0.050490740521372$
- $\beta = 0.015828684373732$.



Slika 5.23. Napon - struja karakteristika BCS 500W ćelije, dobijena za donju granicu R_c jednaku 0.05

Takođe, na grafiku 5.24 je prikazano poklapanje mjerenih i proračunatih vrijednosti struje u slučaju kada donju granicu za R_c postavimo na 0.01, što predstavlja još kritičniji slučaj. Prilikom estimacije, sve ostale granične vrijednosti su ostale nepromijenjene, iste kao iz Tabele 5.6.



Slika 5.24. Napon - struja karakteristika BCS 500W ćelije, dobijena za donju granicu R_c jednaku 0.01

Vrijednosti parametara PEMFC sklopa BCS 500 W estimiranih pomoću hibridne haotične varijante WaOA algoritma, sa donjom granicom za R_c od 0.01 su sljedeće:

- $\xi_1 = -1.042002403584234$
- $\xi_2 = 3.607518904207441$
- $\xi_3 = 9.184159710954710$
- $\xi_4 = -18.969003800435672$
- $\lambda = 19.006813398397874$
- $R_c = 0.0100000000000000$
- $\beta = 0.015780941053361$.

U Tabeli 5.8 je dato poređenje za ova dva ekstremna slučaja, i to u najboljoj vrijednosti funkcije cilja, najgoroj, srednjoj i standardnoj devijaciji.

Tabela 5.8. Poređenje tačnosti estimacije za dvije vrijednosti R_c

R_c	Najbolja vrijednost funkcije cilja	Najgora vrijednost funkcije cilja	Srednja vrijednost funkcije cilja	Standardna devijacija
$R_c = 0.05$	0.1072006246233	0.1103569080468	0.1076493527039	$7.24 \cdot 10^{-4}$
$R_c = 0.01$	0.1071488603693	0.1126690921213	0.1076870181178	$10.87 \cdot 10^{-4}$

Prilikom estimacije parametara, kada je donja granica za $R_c = 0.1$, tada je najbolja vrijednost funkcije cilja jednaka 0.1072741680922. Može se doći do zaključka, na osnovu najbolje vrijednosti funkcije cilja, da kada je donja granična vrijednost R_c jednaka 0.01, tada imamo najbolju vrijednost funkcije cilja, odnosno najmanje odstupanje. Kada je vrijednost $R_c = 0.05$, odstupanje je manje nego kada je $R_c = 0.1$. Kada se uporede grafici 5.19, 5.23, 5.24, vizuelno, lako je uočiti da ta razlika nije značajna. Međutim, ako se obrati pažnja na vrijednost estimiranih parametara, može se uočiti da se vrijednost R_c zadržala na donjoj graničnoj vrijednosti, u slučaju kad je donja granica 0.01. U drugoj varijanti, kada je donja granična vrijednost 0.05, estimirani parametar se mnogo približio toj donjoj granici.

5.3.3 Estimacija parametara upotrebom SAWaOA

Prilikom estimacije parametara, najprije je neophodno definisati donje i gornje granice svih parametara. Kod varijante sa simuliranim kaljenjem WaOA, prilikom odabira graničnih vrijednosti opsega parametara, razmatrane su granične vrijednosti opsega upotrijebljene u dostupnoj literaturi [28-36]. U Tabeli 5.9 su date granične vrijednosti parametara koje daju najtačniju estimaciju parametara:

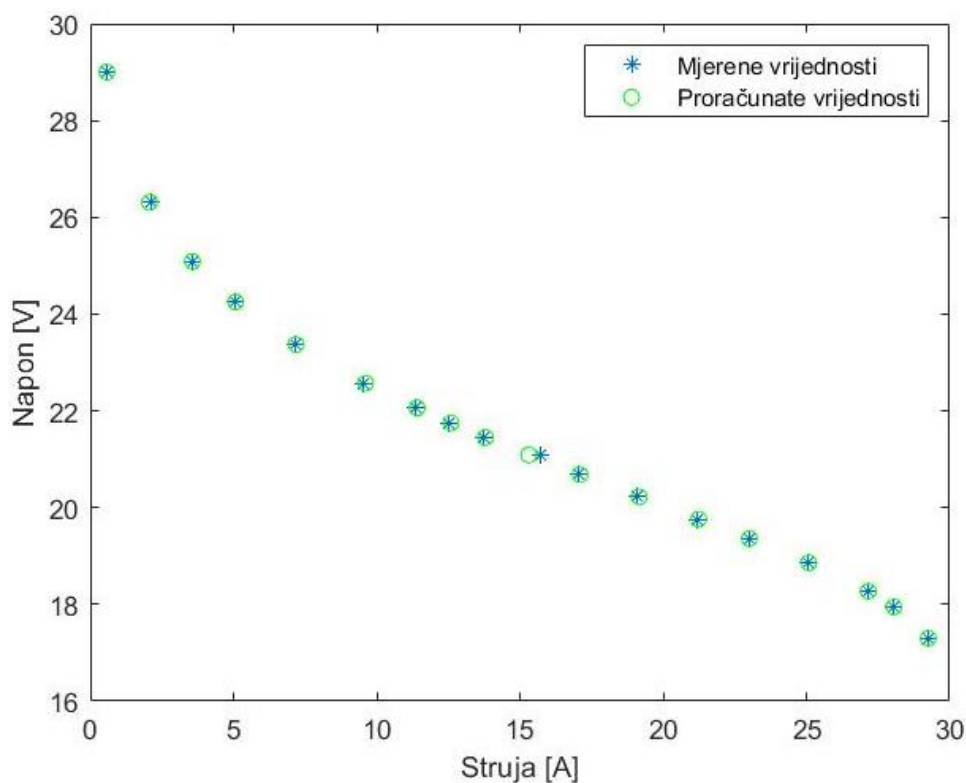
Tabela 5.9. Granične vrijednosti parametara koji se estimiraju

Granice	ξ_1	$\xi_2 \cdot 10^{-3}$	$\xi_3 \cdot 10^{-5}$	$\xi_4 \cdot 10^{-5}$	λ	$R_c(m\Omega)$	β
Donja granica	-1.1997	1	1	-26	13	0.1	0.0136
Gornja granica	-0.8	5	10	-9.54	24	1	0.1

Vrijednosti najboljih parametara PEMFC sklopa BCS 500 W estimiranih pomoću hibridne varijante sa simuliranjem kaljenjem su sljedeće:

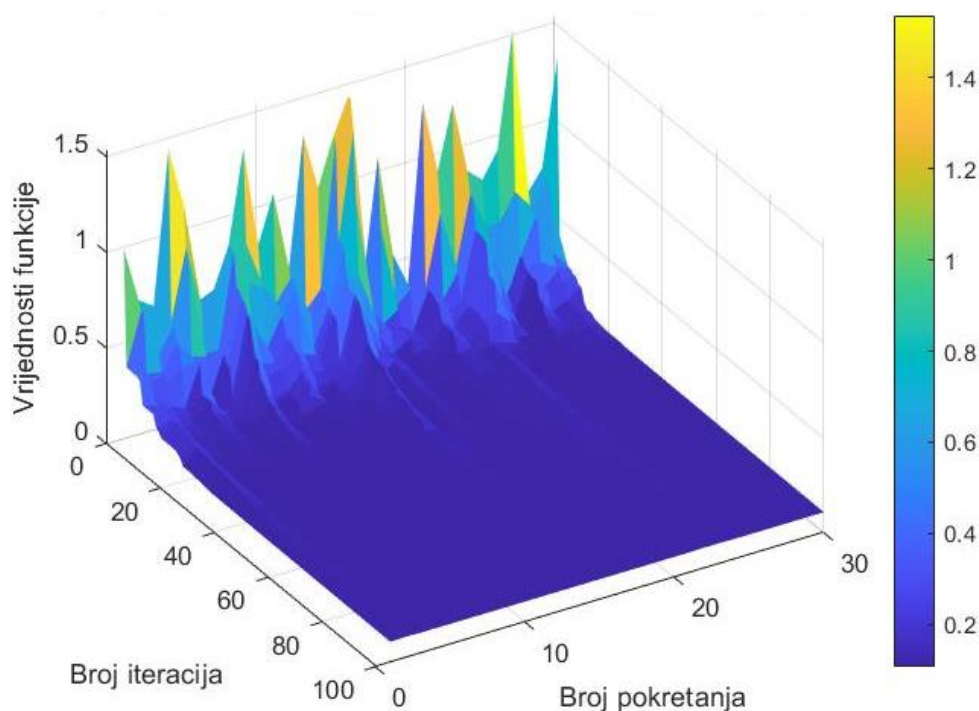
- $\xi_1 = -0.825042552168247$
- $\xi_2 = 2.883535255017153$
- $\xi_3 = 8.718887319959896$
- $\xi_4 = -18.936509512482811$
- $\lambda = 19.750679954233064$
- $R_c = 0.100036110221793$
- $\beta = 0.015850991854094$.

Slika 5.25 oslikava tačnost estimacije parametara preko ove hibridne varijante, jer je vidljivo veoma dobro poklapanje mjerenih i proračunatih vrijednosti struje.



Slika 5.25. Napon - struja karakteristika BCS 500W ćelije, dobijena pomoću SAWaOA

Na slici 5.26 je dat 3D prikaz broja iteracija - broja pokretanja - vrijednosti funkcije cilja dobijen primjenom predloženog algoritma.



Slika 5.26. Vrijednosti funkcije cilja u zavisnosti od broja pokretanja i iteracija

Kod ove hibridne varijante algoritma je broj pokretanja algoritma 30, a broj iteracija 100. Ako se uporedi ovaj 3D grafik sa 3D grafikom za adaptivnu i haotičnu varijantu algoritma, može se zaključiti da su početne vrijednosti funkcije cilja najmanje kod varijante sa simuliranim kaljenjem. Te početne vrijednosti fukcije cilja u slučaju ovog algoritma variraju od 0.5 do 1.5. Može se zaključiti da, za svako pokretanje algoritma, isti konvergira ka optimalnom rješenju, bez obzira na početnu vrijednost funkcije cilja.

5.3.4 Poređenje hibridnih varijanti WaOA za PEMFC sklop BCS 500 W

U Tabeli 5.10 je dato poređenje za gore navedene tri varijante WaOA algoritma, i to u najboljoj vrijednosti funkcije cilja, najgoroj, srednjoj i standardnoj devijaciji.

Tabela 5.10. Poređenje efikasnosti i tačnosti hibridnih varijanti algoritma

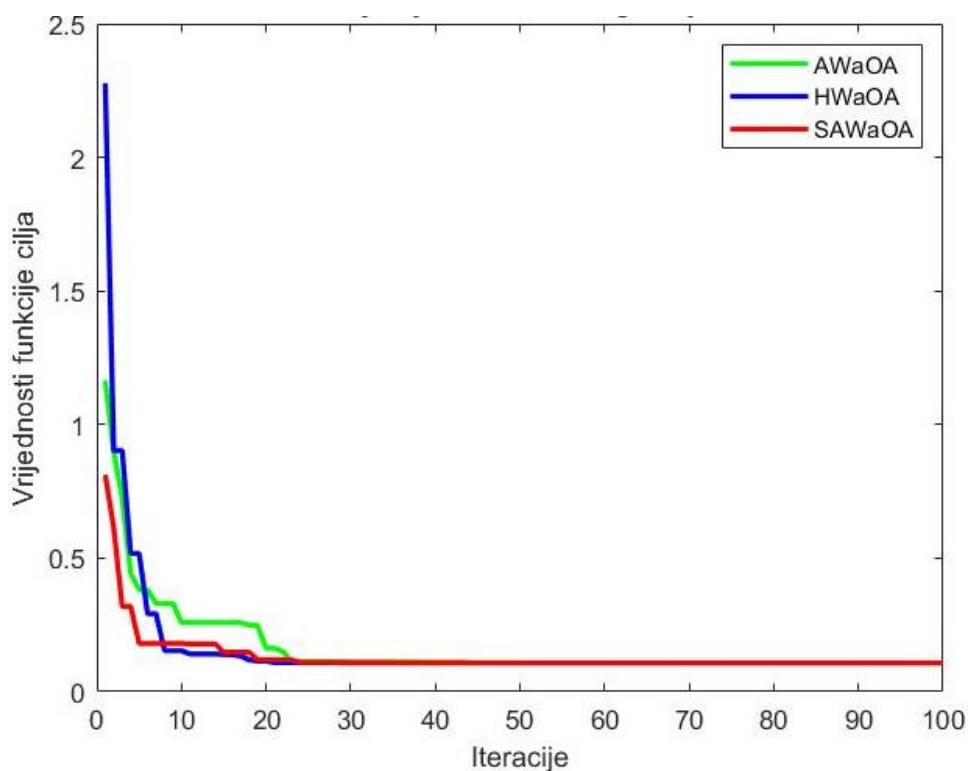
Algoritam	Najbolja vrijednost funkcije cilja	Najgora vrijednost funkcije cilja	Srednja vrijednost funkcije cilja	Standardna devijacija
AWaOA	0.1072765862753	0.1296183599191	0.109197251229	$42.97 \cdot 10^{-4}$
HWaOA	0.1072741680922	0.1139446183968	0.1081873688576	$16.83 \cdot 10^{-4}$
SAWaOA	0.1072758492314	0.11068373812	0.1074449894771	$6.177 \cdot 10^{-4}$

Najbolju vrijednost funkcije cilja postiže haotična hibridna varijanta, iako je to vrlo malo bolje od varijante sa simuliranim kaljenjem i adaptivne varijante, što potvrđuju i gore navedeni grafici poklapanja mjerenih vrijednosti sa izračunatim za sve tri varijante algoritma. Očekivano je da haotična varijanta algoritma daje najveću tačnost, jer se tom

varijantom algoritma vrši detaljna pretraga čitavog prostora mogućih rješenja. Najmanju standardnu devijaciju ima varijanta sa simuliranim kaljenjem.

Upoređujući najbolje vrijednosti funkcije cilja dobijene upotrebom ove tri hibridne varijante prikazane u Tabeli 5.10 sa najboljom vrijednošću funkcije cilja iz dostupne literature, dobijene preko algoritma CMOA, iz Tabele 5.4 može se doći do zaključka da najbolje vrijednosti funkcije cilja za tri hibridne varijante dobijene u ovom radu su bolje od najbolje vrijednosti funkcije cilja najefikasnijeg algoritma (CMOA) iz dostupne literature. Ta činjenica potvrđuje opravdanost upotrebe tri varijante WaOA algoritma u ovom radu, i daje legitimitet ovom metaheurističkom algoritmu za dalju upotrebu u naučnim istraživanjima PEMFC. Algoritam WaOA daje manje odstupanje mjerenih vrijednosti struje u odnosu na proračunate od algoritma ERWCA iz rada [27].

Na slici 5.27 je dat prikaz najboljih krivih konvergencije za gore opisane tri hibridne varijante WaOA algoritma. Odnosno, grafik koji crta najbolje vrijednosti funkcije cilja u zavisnosti od iteracija. U svakoj od varijanti je uzet maksimalan broj iteracija 100. Naredni grafik potvrđuje da se razlika u estimaciji parametara preko ove tri različite hibridne varijante najviše vidi u brzini konvergencije i u početnoj vrijednosti funkcije cilja.



Slika 5.27. Najbolje krive kovergencije tri hibridne varijante WaOA kod BCS 500 W ćelije

Sa grafika se može zaključiti da varijanta algoritma sa simuliranim kaljenjem pokazuje najbolje performanse sa aspekta brzine konvergencije. Može se uočiti da upotreba te hibridne varijante podrazumijeva najmanju početnu vrijednost funkcije cilja. Adaptivna varijanta ima bolje karakteristike od haotične varijante sa aspekta početne vrijednosti funkcije cilja, ali haotična varijanta ranije konvergira ka minimalnoj vrijednosti funkcije cilja.

5.4 Estimacija parametara PEMFC sklopa Ballard-Mark-V 5 kW

U ovom podpoglavlju su predstavljeni rezultati estimacije parametara PEMFC sklopa Ballard-Mark-V 5kW primjenom tri hibridne varijante WaOA. Pomenute hibridne varijante WaOA algoritma su upoređene sa aspekta tačnosti estimacije parametara i brzine konvergencije.

5.4.1 Estimacija parametara upotrebom AWaOA

Prvi korak u procesu estimacije parametara sastoji se od određivanja donjih i gornjih granica za sve parametre. Prilikom odabira opsega mogućih parametara razmatrane su granične vrijednosti opsega upotrijebljene u dostupnoj literaturi [30-36]. Na osnovu analize rezultata iz literature, može se primijetiti da se, i kod ove ćelije, gornja granična vrijednost parametra λ uvijek ograničava na vrijednost 24. Kako je gore navedeno da je to parametar koji ukazuje na sadržaj vode u membrani, 24 je gornja granica za optimalan režim rada ćelije. Vrijednost λ veća od 24 može prouzrokovati prekomjernu vlažnost membrane, što u nekim slučajevima može biti kontraefikasno. Takođe, ekvivalentna otpornost kontakata pri provođenju elektrona R_c u literaturi ima donju granicu koja je fiksna i iznosi 0.1. Donja granična vrijednost mogućeg opsega R_c parametra ispod 0.1 ukazuje da je u pitanju mnogo manji kontaktni otpor i garantuje bolje provođenje elektrona. U narednoj Tabeli su date granične vrijednosti parametara koje su upotrijebljene za najbolju estimaciju parametara:

Tabela 5.11. Granične vrijednosti estimiranih parametara

Granice	ξ_1	$\xi_2 \cdot 10^{-3}$	$\xi_3 \cdot 10^{-5}$	$\xi_4 \cdot 10^{-5}$	λ	$R_c(m\Omega)$	β
Donja granica	-1.1997	1	1	-26	13	0.1	0.0136
Gornja granica	-0.8	5	10	-9.54	24	0.8	0.5

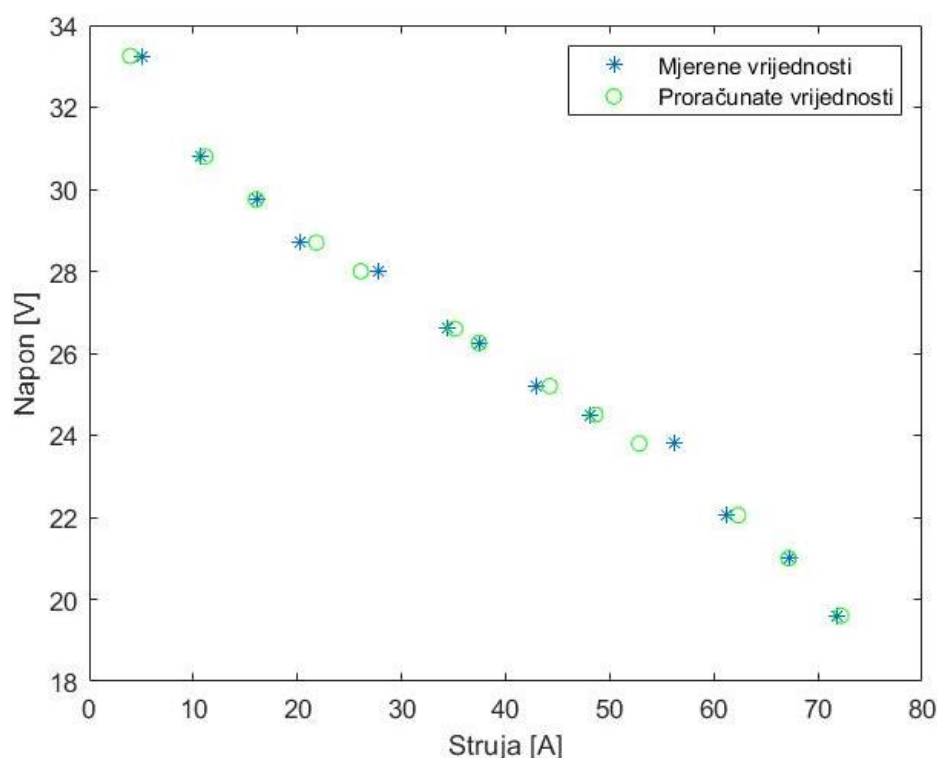
Upotrebom ovih graničnih vrijednosti prilikom estimacije parametara dobija se najmanja vrijednost kriterijumske funkcije - $RMSE_I$. Vrijednosti najboljih parametara PEMFC sklopa Ballard-Mark-V 5 kW estimiranih pomoću hibridne adaptivne varijante WaOA algoritma su sljedeće:

- $\xi_1 = -0.948583549047669$
- $\xi_2 = 3.594762394073527$
- $\xi_3 = 9.269496413782562$
- $\xi_4 = -15.379714535255513$
- $\lambda = 24.000000000000000$
- $R_c = 0.100000000000000$
- $\beta = 0.017841720876354$.

Jedino su parametri λ i R_c poprimili graničnu vrijednost njihovih opsega, i to λ gornje granice, a R_c donje granice. To znači da bi gornju granicu parametra λ trebalo proširiti prilikom estimacije, a donju granicu parametra R_c smanjiti. U dosadašnjoj literaturi [27] te

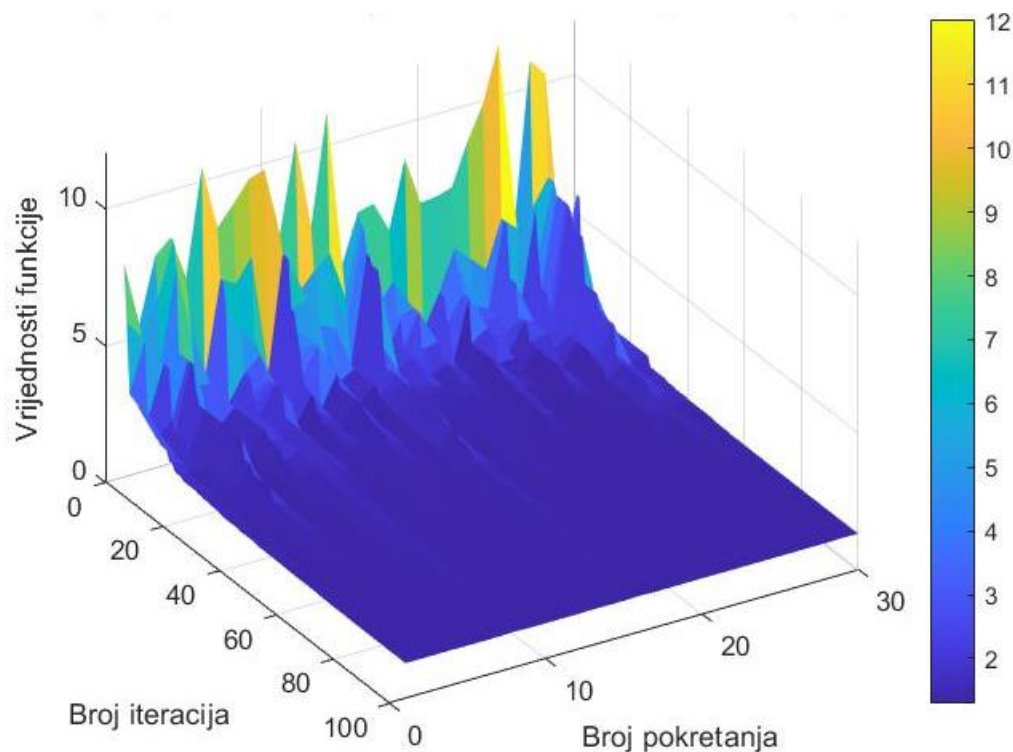
granice se nisu proširivale, zato što je u okviru ovih granica optimalan režim rada ćelije. Ako bi se proširili ti opsezi, onda bi to označavalo rad ćelije u specifičnim uslovima (povećana vlažnost membrane, smanjen otpor kontakata).

Na slici 5.28 je dat grafik na kojem su predstavljene tačke kojima odgovaraju mjerene vrijednosti napona i struje, i tačke kojima odgovaraju proračunate vrijednosti struje. Poznatih 13 mjerenih vrijednosti je upoređeno grafički sa 13 proračunatih vrijednosti koje su dobijene najboljom estimacijom parametara. Na grafiku se može uočiti veoma dobro poklapanje mjerenih i proračunatih vrijednosti, što znači da postoji veoma mala greške prilikom estimacije parametara.



Slika 5.28. Napon - struja karakteristika Ballard-Mark-V 5kW ćelije, dobijena pomoću AWaOA

Na slici 5.29 je prikazan 3D prikaz broja iteracija - broja pokretanja - vrijednosti funkcije cilja kod primjene adaptivne varijante WaOA algoritma.

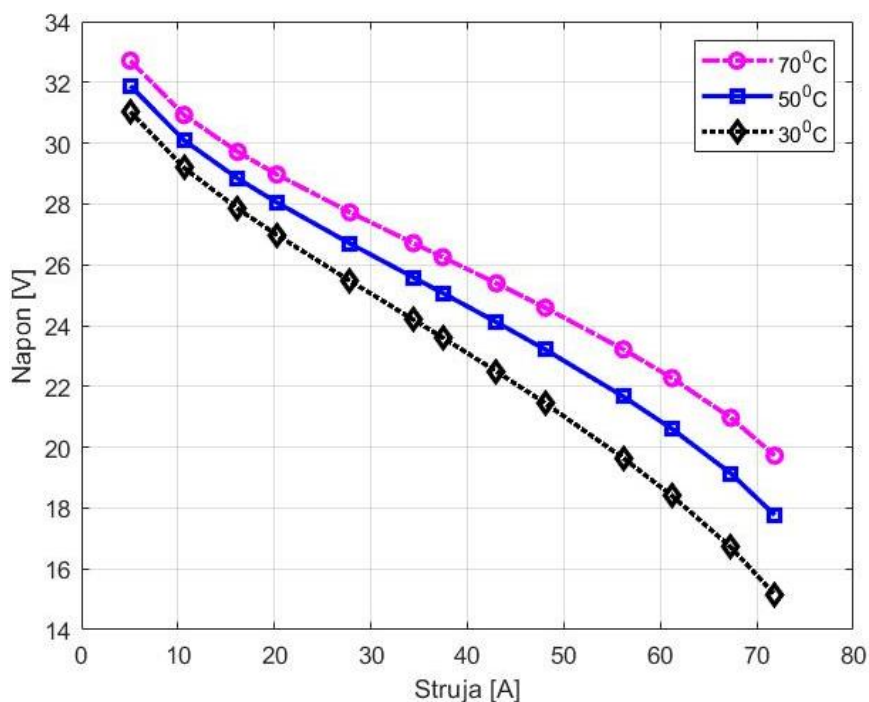


Slika 5.29. Vrijednosti funkcije cilja u zavisnosti od broja pokretanja i iteracija

Maksimalan broj iteracija algoritma je 100, a broj pokretanja algoritma je 30. Sa prethodnog grafika se može zaključiti da početna vrijednost funkcije cilja varira od pokretanja do pokretanja algoritma. Sa slike se može uočiti da za svako pokretanje algoritma isti konvergira ka optimalnom rješenju.

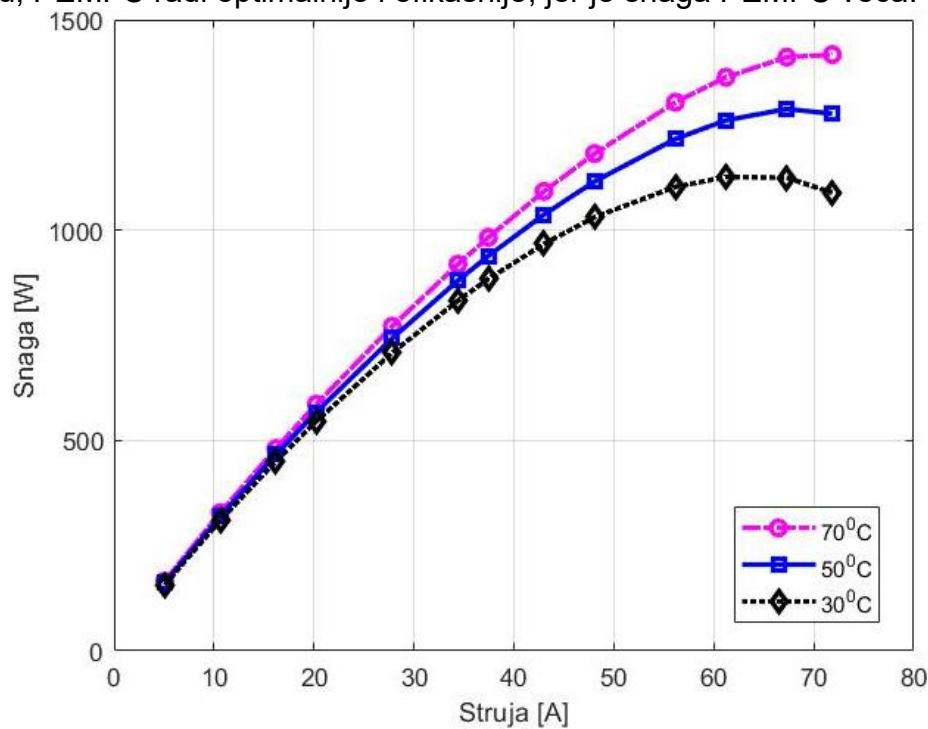
Na slikama 5.30 i 5.31 su redom predstavljene napon – struja karakteristike i snaga-struja karakteristike sa različitim vrijednostima temperature za Ballard PEMFC sklop. Karakteristike su dobijene tako što su za gore navedene estimirane parametre promijenjene vrijednosti temperature u matematičkom modelu navedenom u podpoglavlju 2.5.

Posmatrajući grafike sa slika 5.30 i 5.31 može se doći do zaključka da i napon i snaga rastu sa porastom temperature. Najveći rast napona i snage je pri većim vrijednostima struje. Najmanje vrijednosti napona i snage imamo pri temperaturi od 30 stepeni (magenta karakteristika), a najveće pri temperature od 70 stepeni.



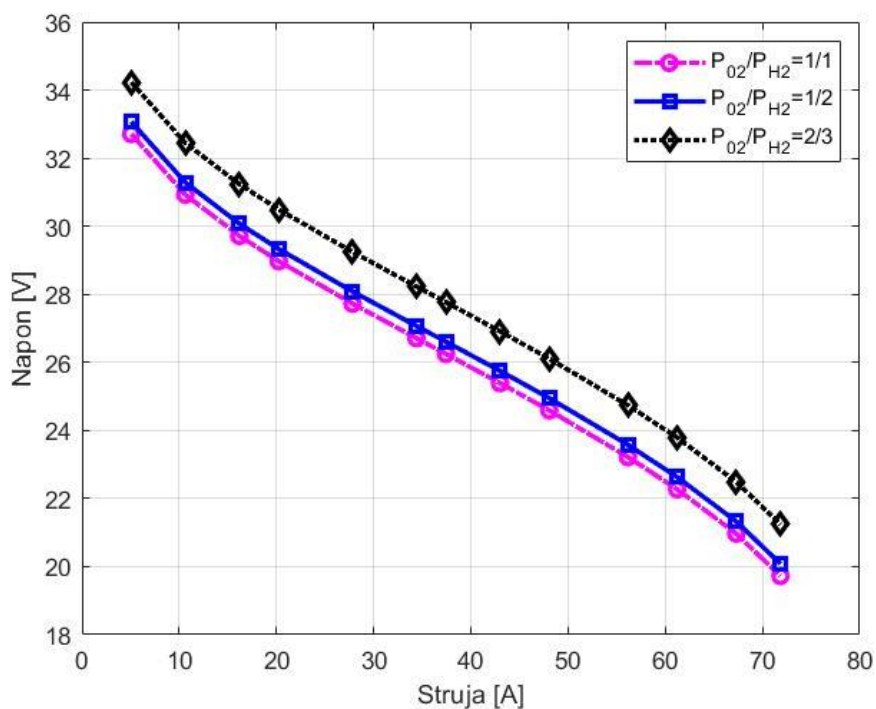
Slika 5.30. Napon - struja karakteristike za tri različite temperature Ballard-Mark-V ćelije

Opseg temperature PEMFC od 30°C do 70°C je u okviru opsega dozvoljenih radnih temperatura PEMFC, zato se te tri vrijednosti testiraju. Temperatura 70°C je nominalna temperatura Ballard-Mark-V 5 kW ćelije, definisana je od strane proizvođača u specifikacijama [36]. Sa grafika na slici 5.31 se može zaključiti da za veću radnu temperaturu, PEMFC radi optimalnije i efikasnije, jer je snaga PEMFC veća.

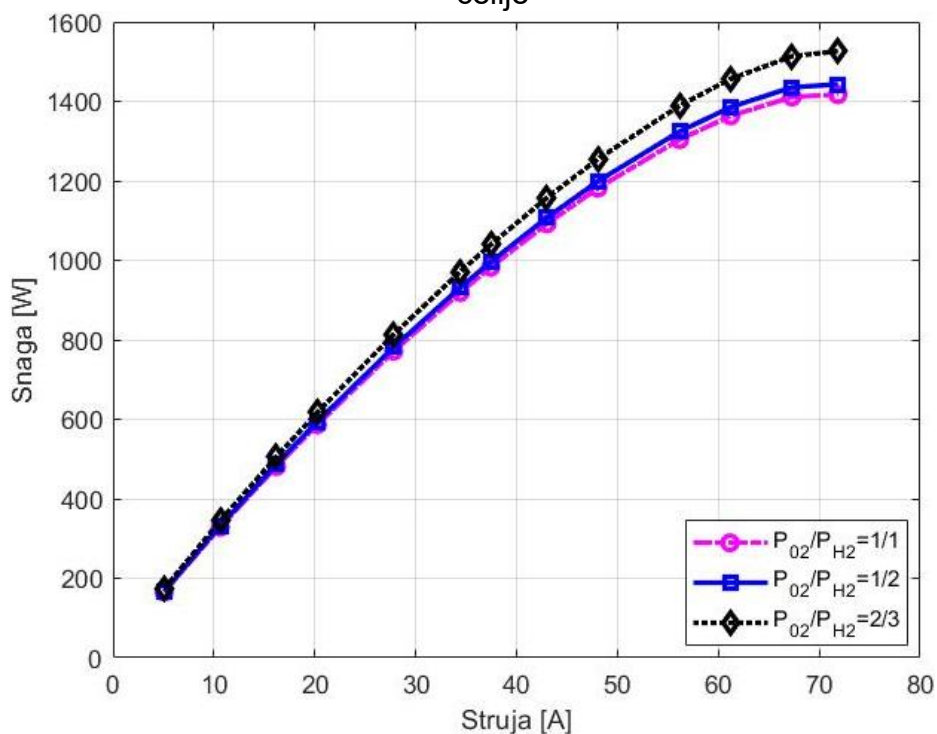


Slika 5.31. Snaga - struja karakteristike za tri različite temperature Ballard-Mark-V ćelije

Na slikama 5.32 i 5.33 su predstavljene karakteristike napon – struja u snaga – napon za različite odnose pritiska kiseonika i vodonika (P_{O_2}/P_{H_2}) za PEMFC sklop Ballard. Može se uočiti da sa porastom pritiska raste i napon i snaga PEMFC.



Slika 5.32. Napon - struja karakteristike za različite odnose pritiska Ballard-Mark-V ćelije



Slika 5.33. Snaga - struja karakteristike za različite odnose pritiska Ballard-Mark-V ćelije

5.4.2 Estimacija parametara upotrebom HWaOA

Prvi korak kod estimacije parametara uključuje određivanje gornjih i donjih granica za sve parametre. Kod ove hibridne varijante, kao i kod prethodne, prilikom odabira graničnih vrijednosti opsega parametara razmatrane su granične vrijednosti opsega upotrijebljene u dostupnoj literaturi [28-36]. U Tabeli 5.12 su date granične vrijednosti parametara čija upotreba u algoritmu ima kao rezultat najtačniju estimaciju parametara:

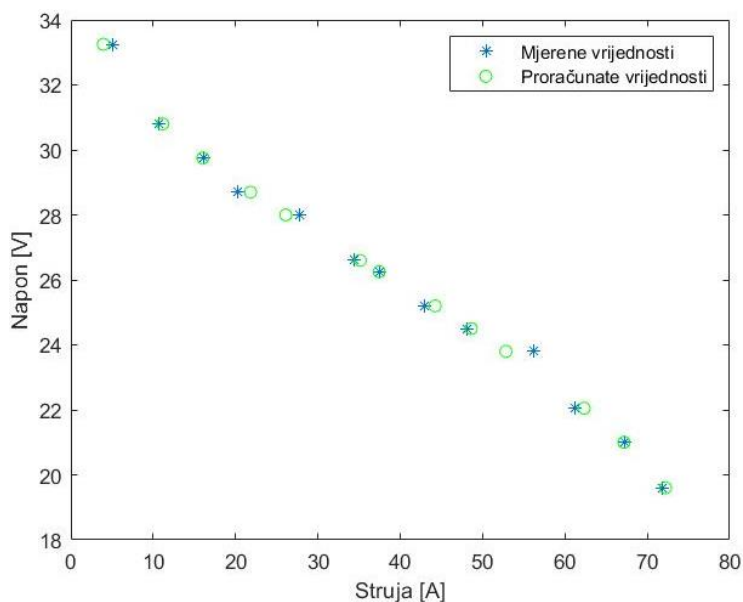
Tabela 5.12. Granične vrijednosti estimiranih parametara

Granice	ξ_1	$\xi_2 \cdot 10^{-3}$	$\xi_3 \cdot 10^{-5}$	$\xi_4 \cdot 10^{-5}$	λ	$R_c(m\Omega)$	β
Donja granica	-1.1997	1	1	-26	13	0.1	0.0136
Gornja granica	-0.8	5	10	-9.54	24	1	0.5

Vrijednosti najboljih parametara PEMFC sklopa Ballard-Mark-V 5 kW estimiranih pomoću hibridne haotične varijante WaOA algoritma su sljedeće:

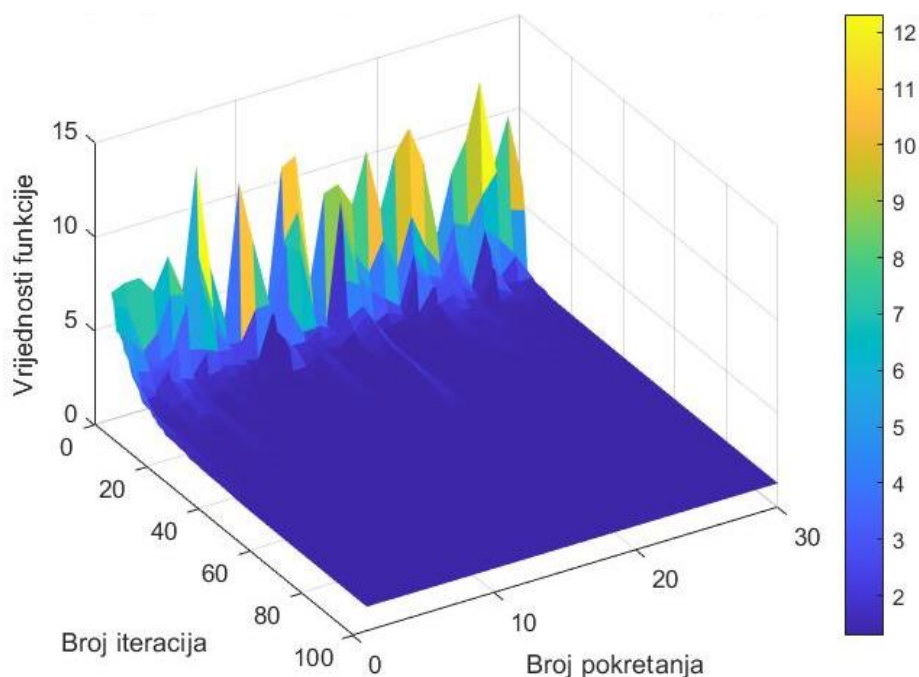
- $\xi_1 = -0.801400766892874$
- $\xi_2 = 2.303296462008674$
- $\xi_3 = 3.104234422089490$
- $\xi_4 = -15.380289347639383$
- $\lambda = 24.000000000000000$
- $R_c = 0.10000000000000000$
- $\beta = 0.017851862271428$.

Slika 5.34 oslikava vjerodostojnost estimacije parametara preko haotične varijante, jer je vidljivo veoma dobro poklapanje mjerenih i proračunatih vrijednosti struje.



Slika 5.34. Napon - struja karakteristika Ballard-Mark-V ćelije, dobijena pomoću HWaOA

Na slici 5.35 je dat 3D prikaz broja iteracija - broja pokretanja - vrijednosti funkcije cilja za haotičnu varijantu algoritma.



Slika 5.35. Vrijednosti funkcije cilja u zavisnosti od broja pokretanja i iteracija

Maksimalan broj iteracija algoritma je 100, a broj pokretanja unutar algoritma je 30. Ako se uporedi ovaj 3D grafik sa 3D grafikom za adaptivnu varijantu algoritma, može se zaključiti da su početne vrijednosti funkcije cilja veće kod haotične, nego kod adaptivne varijante. Sa slike 5.35 se može zaključiti da predložena haotična varijanta algoritma za svako pokretanje istog konvergira ka optimalnom rješenju, bez obzira na početnu vrijednost funkcije cilja, koja i ovdje varira od pokretanja do pokretanja algoritma.

5.4.3 Estimacija parametara upotrebom SAWaOA

Kod estimacije parametara PEMFC, najbitnije je prvo odrediti gornje i donje granične vrijednosti svih parametara. Prilikom odabira graničnih vrijednosti opsega parametara razmatrane su granične vrijednosti opsega upotrijebljene u dostupnoj literaturi [28-36]. U Tabeli 5.13 su date granične vrijednosti parametara koje daju najtačniju estimaciju parametara:

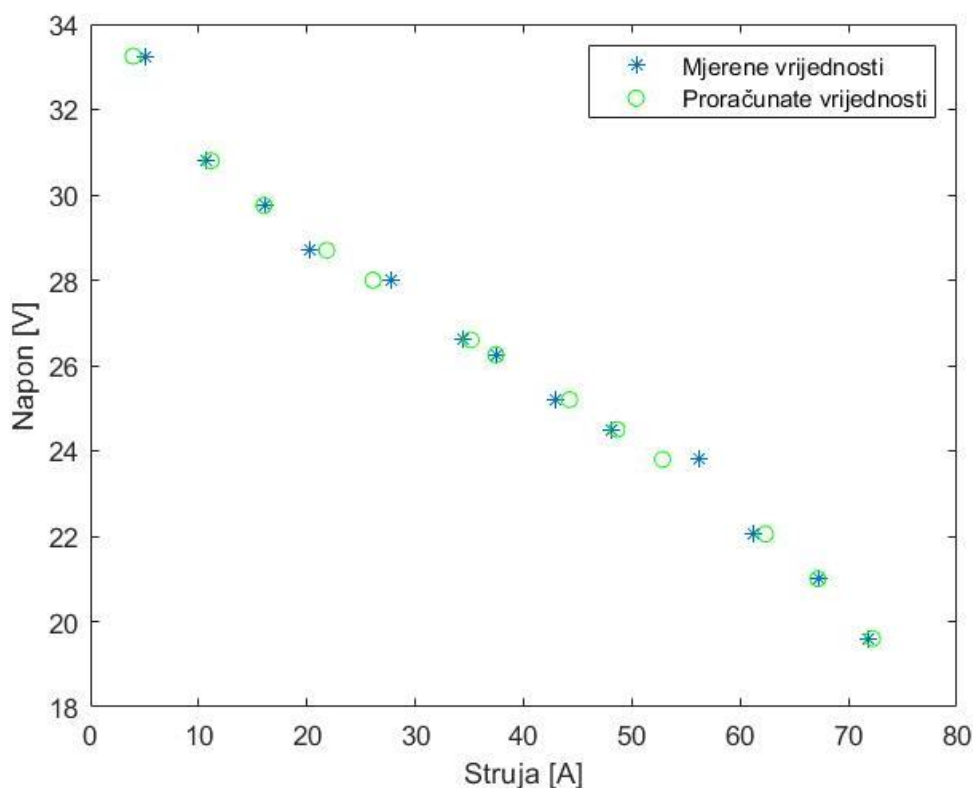
Tabela 5.13. Granične vrijednosti estimiranih parametara

Granice	ξ_1	$\xi_2 \cdot 10^{-3}$	$\xi_3 \cdot 10^{-5}$	$\xi_4 \cdot 10^{-5}$	λ	$R_c(m\Omega)$	β
Donja granica	-1.1997	1	1	-26	13	0.1	0.0136
Gornja granica	-0.8	5	10	-9.54	24	1	0.5

Vrijednosti najboljih parametara PEMFC sklopa Ballard-Mark-V 5kW estimiranih pomoću hibridne varijante sa simuliranjem kaljenjem su sljedeće:

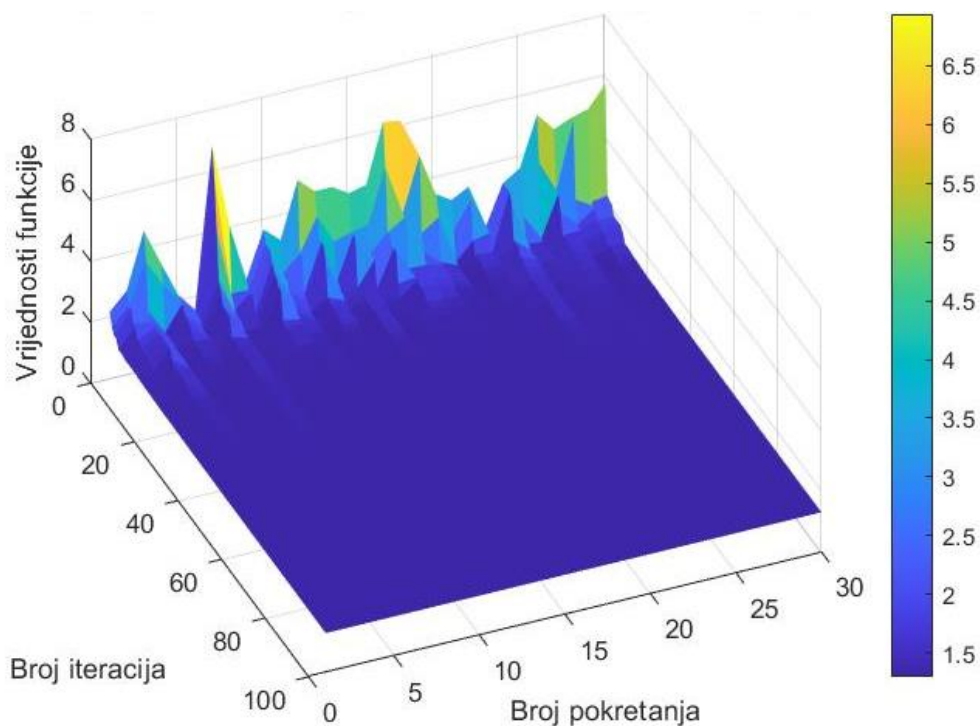
- $\xi_1 = -0.829532252582213$
- $\xi_2 = 2.688864976875921$
- $\xi_3 = 5.274111180190506$
- $\xi_4 = -15.380583441641189$
- $\lambda = 23.9999999886393034$
- $R_c = 0.1000000000000000$
- $\beta = 0.017851385525015$.

Na slici 5.36 su prikazani rezultati estimacije parametara preko ove hibridne varijante, pri čemu je vidljivo da je veoma dobro poklapanje mjerenih i proračunatih vrijednosti struje. Dobro poklapanje mjerenih i proračunatih vrijednosti struje opravdava upotrebu ove varijante algoritma prilikom estimacije parametara.



Slika 5.36. Napon – struja karakteristika Ballard-Mark-V 5 kW ćelije, dobijena pomoću SAWaOA

Na slici 5.37 je dat 3D prikaz broja iteracija - broja pokretanja - vrijednosti funkcije cilja za SAWaOA algoritam.



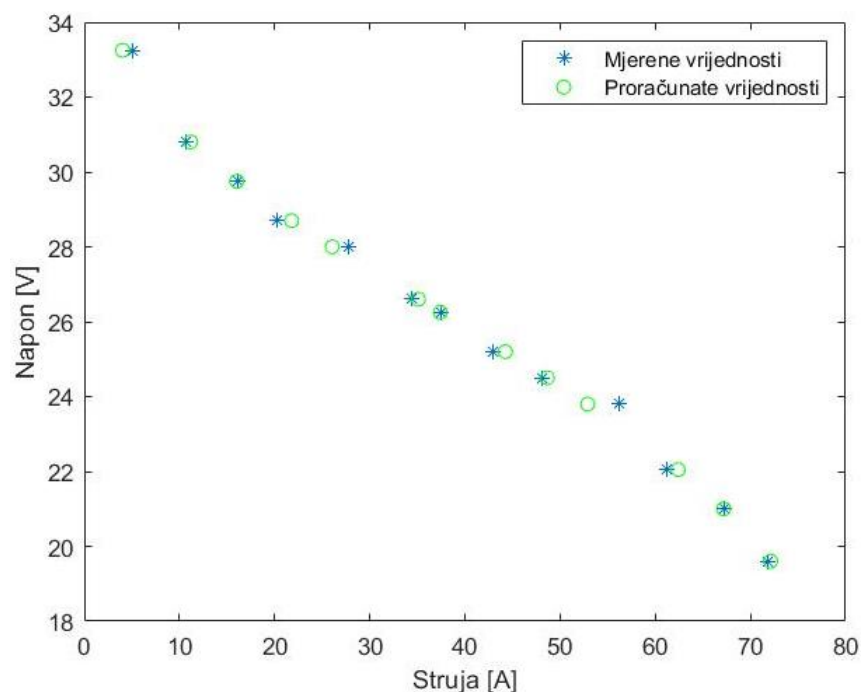
Slika 5.37. Vrijednosti funkcije cilja u zavisnosti od broja pokretanja i iteracija

Međutim, ako se uporedi ovaj 3D grafik sa 3D grafikom za adaptivnu i haotičnu varijantu algoritma, može se zaključiti da su početne vrijednosti funkcije cilja najmanje kod varijante sa simuliranim kaljenjem. Te početne vrijednosti funkcije cilja u slučaju ovog algoritma variraju od 2 do 7. Sa slike 5.37 se može zaključiti da predložena varijanta sa simuliranim kaljenjem konvergira ka optimalnom rješenju, za svako pokretanje istog, bez obzira na početnu vrijednost funkcije cilja.

S obzirom na to da parametar λ oslikava vlažnost membrane, gornja granica tog parametra se u literaturi ograničava na 24. Rad u zadatim granicama predstavlja optimalan režim rada PEMFC. Na slici 5.38 je prikazano poklapanje mjerenih vrijednosti struje i proračunatih u slučaju kada gornju granicu za λ postavimo na 25, što predstavlja specifičan režim rada PEMFC, kada je vlažnost membrane povećana. Prilikom estimacije, sve ostale granične vrijednosti su ostale nepromijenjene, iste kao iz Tabele 5.13.

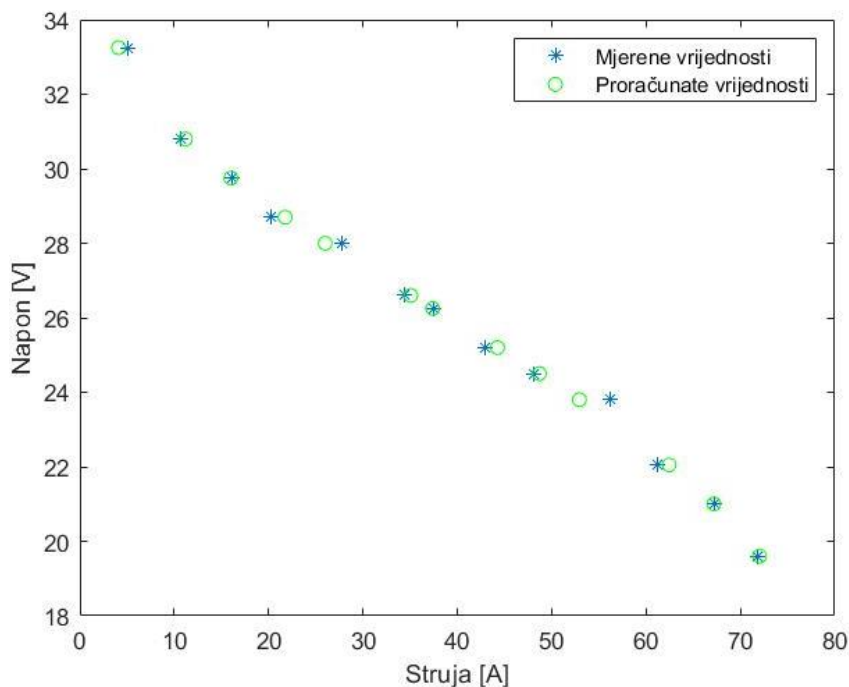
Vrijednosti parametara PEMFC sklopa Ballard-Mark-V 5kW estimiranih pomoću hibridne varijante sa simuliranim kaljenjem WaOA algoritma, sa gornjom granicom za λ od 25 su sljedeće:

- $\xi_1 = -0.812987347146770$
- $\xi_2 = 2.871118174030141$
- $\xi_3 = 6.865389748490410$
- $\xi_4 = -15.736109189084967$
- $\lambda = 25.000000000000000$
- $R_c = 0.100000000000000$
- $\beta = 0.020366802819060$.



Slika 5.38. Napon – struja karakteristika Ballard-Mark-V 5kW ćelije, dobijena za gornju granicu λ jednaku 25

Takođe, na grafiku 5.39 je prikazano poklapanje mjerenih i proračunatih vrijednosti struje u slučaju kada gornju granicu za λ postavimo na 26, što predstavlja slučaj još veće ovlaženosti membrane. Prilikom estimacije, sve ostale granične vrijednosti su ostale nepromijenjene, iste kao iz Tabele 5.13.



Slika 5.39. Napon - struja karakteristika Ballard-Mark-V 5kW ćelije, dobijena za gornju granicu λ jednaku 26

Vrijednosti parametara PEMFC sklopa Ballard-Mark-V 5kW estimiranih pomoću hibridne varijante sa simuliranim kaljenjem WaOA algoritma, sa gornjom granicom za λ od 26 su sljedeće:

- $\xi_1 = -1.171991502501670$
- $\xi_2 = 4.023033350295539$
- $\xi_3 = 7.566660403460316$
- $\xi_4 = -16.059653883884632$
- $\lambda = 26.000000000000000$
- $R_c = 0.100000000000000$
- $\beta = 0.022655562687120$.

U Tabeli 5.14 je dato poređenje za ova dva ekstremna slučaja, i to u najboljoj vrijednosti funkcije cilja, najgoroj, srednjoj i standardnoj devijaciji.

Tabela 5.14. Poređenje tačnosti estimacije za dvije različite granične vrijednosti λ

λ	Najbolja vrijednost funkcije cilja	Najgora vrijednost funkcije cilja	Srednja vrijednost funkcije cilja	Standardna devijacija
$\lambda = 25$	1.2869372202957	1.29455641111148	1.287217588956	$13.87 \cdot 10^{-4}$
$\lambda = 26$	1.2788996525823	1.2823922894624	1.2791240019012	$6.71 \cdot 10^{-4}$

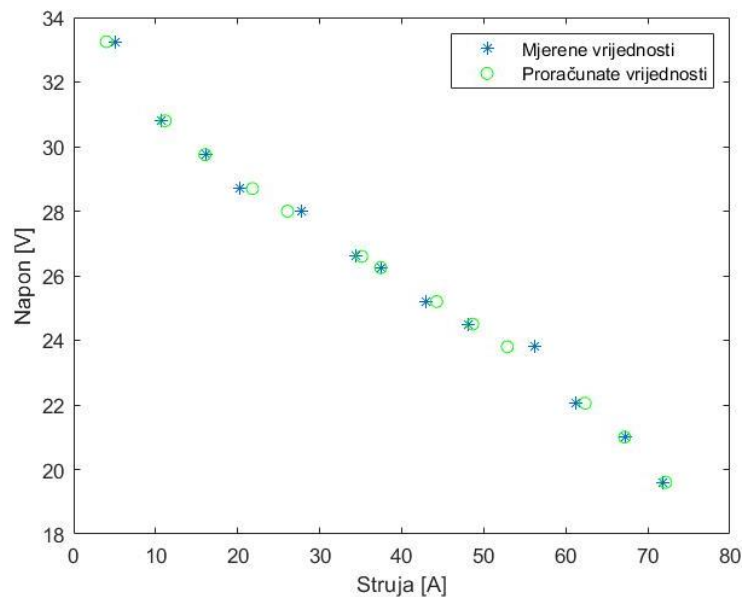
Kada je gornja granica za $\lambda = 24$, tada je najbolja vrijednost funkcije cilja, prilikom estimacije parametara, jednaka 1.2974379430975. Na osnovu najbolje vrijednosti funkcije cilja, može se doći do zaključka da kada je vrijednost $\lambda = 26$, da tada imamo najbolju vrijednost funkcije cilja, odnosno najmanje odstupanje. Kada je vrijednost $\lambda = 25$, odstupanje je veće nego kada je $\lambda = 24$. Kada uporedimo grafike 5.36, 5.38 i 5.39 vizuelno, ta razlika nije značajna. Kad se obrati pažnja na vrijednost estimiranih parametara, može se uočiti da su vrijednosti λ u obje ove varijante jednake gornjoj graničnoj vrijednosti opsega. Može se zaključiti da se proširenjem opsega granica ovog parametra ostvarila bolja tačnost estimacije, i da se estimirano λ mijenja u skladu sa promjenom gornje granice.

Iz dostupne literature je uočeno da je donja granica parametra R_c definisana na 0.1. Ta granična vrijednost je donja granica optimalnog režima u kom može raditi PEMFC. Radi istraživanja uticaja smanjenja donje granice parametra R_c na estimaciju parametara, prilikom estimacije je razmatrana njegova smanjena vrijednost. Iz tog razloga se analizira estimacija parametara kada je donja granična vrijednost za R_c 0.05. U tom slučaju vrijednosti ostalih graničnih vrijednosti ostaju iste kao u Tabeli 5.13. Rezultat estimacije je prikazan na slici 5.40. Dobro poklapanje mjerenih i proračunatih vrijednosti struje ukazuje na visoku tačnost estimacije parametara.

Vrijednosti parametara PEMFC sklopa Ballard-Mark-V 5kW estimiranih pomoću hibridne varijante WaOA algoritma sa simuliranim kaljenjem, sa donjom granicom za R_c od 0.05 su sljedeće:

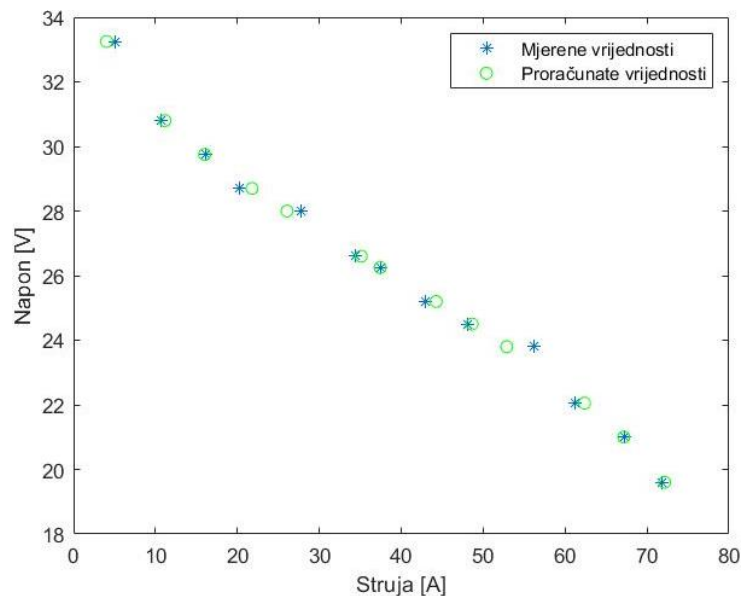
- $\xi_1 = -0.800012691676668$
- $\xi_2 = 2.381923243082613$
- $\xi_3 = 3.659143747636738$

- $\xi_4 = -15.637267360276491$
- $\lambda = 24.000000000000000$
- $R_c = 0.05000000000000000$
- $\beta = 0.018485731990266$.



Slika 5.40. Napon - struja karakteristika Ballard-Mark-V 5kW ćelije, dobijena za donju granicu R_c jednaku 0.05

Takođe, na slici 5.41 je prikazano poklapanje mjerenih i proračunatih vrijednosti struje u slučaju kada donju granicu za R_c postavimo na 0.01, što predstavlja još kritičniji slučaj. Prilikom estimacije, sve ostale granične vrijednosti su ostale nepromijenjene, iste kao iz Tabele 5.13.



Slika 5.41. Napon - struja karakteristika Ballard-Mark-V 5kW ćelije, dobijena za donju granicu R_c jednaku 0.01

Vrijednosti parametara PEMFC sklopa BCS 500 W estimiranih pomoću hibridne varijante WaOA algoritma sa simuliranim kaljenjem, sa gornjom granicom za R_c od 0.01 su sljedeće:

- $\xi_1 = -0.949293641093434$
- $\xi_2 = 3.043059672668603$
- $\xi_3 = 5.245208287844825$
- $\xi_4 = -15.842820018799278$
- $\lambda = 23.999999997606359$
- $R_c = 0.010000000074791$
- $\beta = 0.018995375271066$.

U Tabeli 5.15 je dato poređenje za ova dva prikazana slučaja, i to poređenje najboljih, najgorih i srednjih vrijednosti funkcije cilja i standardnih devijacija.

Tabela 5.15. Poređenje tačnosti estimacije za dvije različite granične vrijednosti R_c

R_c	Najbolja vrijednost funkcije cilja	Najgora vrijednost funkcije cilja	Srednja vrijednost funkcije cilja	Standardna devijacija
$R_c = 0.05$	1.2919765916156	1.2946871268911	1.2921821512998	$6.41 \cdot 10^{-4}$
$R_c = 0.01$	1.2878807182648	1.2884889964889	1.2879360629016	$1.33 \cdot 10^{-4}$

Kada je donja granica za $R_c = 0.1$, tada je najbolja vrijednost funkcije cilja, prilikom estimacije parametara, jednaka 1.2974379430975. Može se doći do zaključka na osnovu najbolje vrijednosti funkcije cilja, da kada je donja granična vrijednost R_c jednaka 0.01, tada imamo najbolju vrijednost funkcije cilja, odnosno najmanje odstupanje. Kada je vrijednost $R_c = 0.05$, odstupanje je manje nego kada je $R_c = 0.1$. Kada se uporede grafici 5.36, 5.40, 5.41 vizuelno, lako je uočiti da ta razlika nije značajna.

5.4.4 Poređenje hibridnih varijanti WaOA za PEMFC sklop Ballard-Mark-V 5kW

U Tabeli 5.16 je dato poređenje za gore navedene tri varijante WaOA algoritma, i to poređenje najboljih, najgorih i srednjih vrijednosti funkcije cilja i standardnih devijacija.

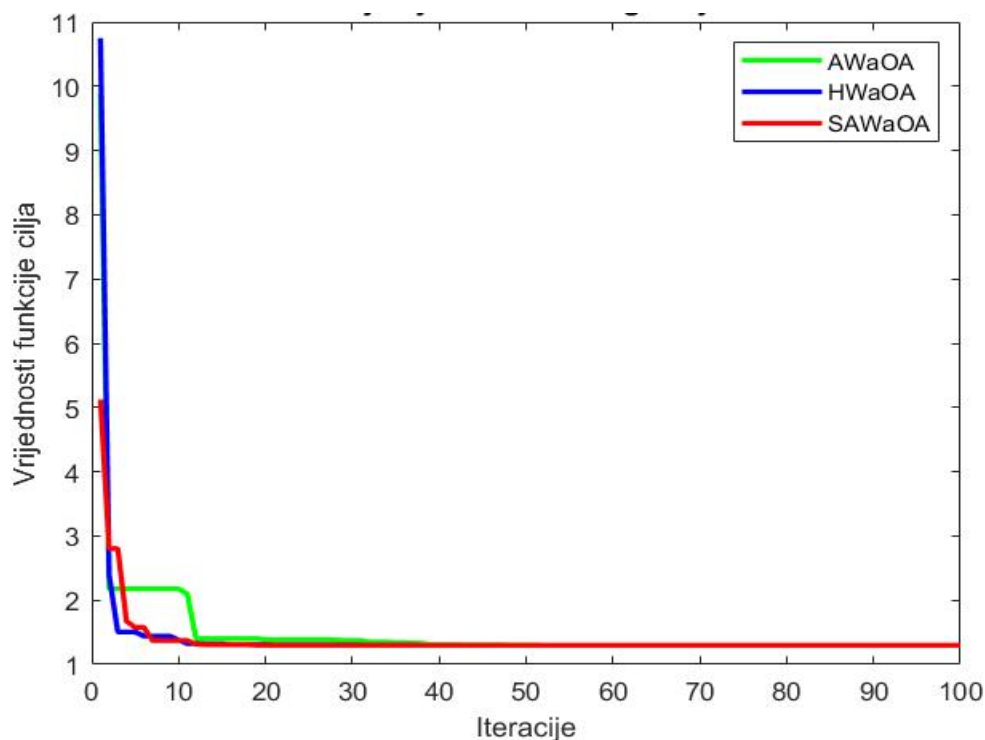
Tabela 5.16. Poređenje efikasnosti i tačnosti hibridnih varijanti algoritma

Algoritam	Najbolja vrijednost funkcije cilja	Najgora vrijednost funkcije cilja	Srednja vrijednost funkcije cilja	Standardna devijacija
AWaOA	1.2974421563014	1.3214291055271	1.3023047636552	$63.619 \cdot 10^{-4}$
HWaOA	1.2974379421359	1.3088854873404	1.2979321113806	$20.903 \cdot 10^{-4}$
SAWaOA	1.2974379430975	1.2984233840427	1.2974815792963	$1.795 \cdot 10^{-4}$

Najbolju vrijednost funkcije cilja postiže haotična hibridna varijanta, iako je to malo bolje od varijante sa simuliranim kaljenjem, što potvrđuju i gore navedeni grafici poklapanja mjerenih vrijednosti sa izračunatim za sve tri varijante algoritma. Najmanju

standardnu devijaciju ima varijanta sa simuliranim kaljenjem. To je opravdano, jer ta hibridna varijanta najbrže konvergira i ima najmanje početne vrijednosti funkcije cilja. Kada se uporedi najbolja vrijednost funkcije cilja dobijenom preko algoritma HWaOA sa najboljom vrijednošću funkcije cilja dobijenom preko algoritma MPA iz dostupne literature (što se vidi u Tabeli 5.2), može se zaključiti da WaOA algoritam daje znatno tačniju estimaciju parametara. Iz toga se može zaključiti da se matematički model izveden u ovom radu odlikuje visokom tačnošću. Kroz poređenje najbolje vrijednosti funkcije cilja kod hibridne varijante WaOA sa najboljom vrijednošću funkcije cilja ERWCA iz rada [27] ističe se superiornost WaOA algoritma, jer on daje manje odstupanje mjerenih vrijednosti struje u odnosu na proračunate.

Na slici 5.42 je dat prikaz najboljih krivih konvergencije za gore opisane tri hibridne varijante WaOA algoritma. Odnosno, grafik koji crta najbolje vrijednosti funkcije cilja u zavisnosti od iteracija. U svakoj od varijanti je uzet maksimalan broj iteracija 100. Naredni grafik potvrđuje da se razlika u estimaciji parametara preko ove tri različite hibridne varijante najviše vidi u brzini konvergencije i u početnoj vrijednosti funkcije cilja.



Slika 5.42. Najbolje krive kovergencije tri hibridne varijante WaOA kod Ballard-Mark-V 5kW ćelije

Sa grafika se može zaključiti da varijanta algoritma sa simuliranim kaljenjem pokazuje najbolje performanse sa aspekta brzine konvergencije. Može se uočiti da upotreba te hibridne varijante podrazumijeva najmanju početnu vrijednost funkcije cilja. Adaptivna varijanta ima bolje karakteristike od haotične varijante sa aspekta početne vrijednosti funkcije cilja, ali haotična varijanta ranije konvergira ka minimalnoj vrijednosti funkcije cilja.

6. ZAKLJUČAK

Vodonik predstavlja ekološki najčistije gorivo dostupno na planeti Zemlji. Kroz mogućnost skladištenja električne energije, vodonik omogućava bržu i sigurniju integraciju OIE u EES. Većom integracijom OIE i vodonika u EES smanjuju se štetne emisije CO₂ koje nastaju ogromnom upotrebom izvora na fosilna goriva i upotrebom vozila sa motorima sa unutrašnjim sagorijevanjem. Implementacijom vodonika kao goriva za vozila se najavljuje tehnološka revolucija u svijetu. Smanjenje emisija štetnih gasova, samim tim uništenje prirode i ozonskog omotača neki su od razloga za upotrebu vodonika u energetici.

Vodonik nastaje elektrolizom vode koja je neiscrpan izvor energije, zato je PEMFC perspektivan izvor za proizvodnju električne energije. Njihova ključna prednost leži u radu na niskim temperaturama i mogućnosti brze reakcije na promjene opterećenja, što ih čini pogodnim za različite primjene, uključujući transport i stacionarne sisteme napajanja. Kroz optimizaciju parametara kao što su stepen hidratacije membrane, kontaktni otpor, radna temperatura i pritisak dovodnog gasa može se dodatno poboljšati efikasnost i pouzdanost ovih ćelija. Optimalna hidratacija membrane, obično kontrolisana parametrima sadržaja vode, je ključna za održavanje provodljivosti protona. Postizanje ravnoteže između premalo i previše vode u membrani igra ključnu ulogu u efikasnosti i dugotrajnosti ćelije. Radi se na poboljšanju komponenti gorivnih ćelija vodonika kako bi se povećala njihova efikasnost i primjena u praksi. U cilju veće primjene gorivnih ćelija vodonika, veoma je bitno njihovo precizno modelovanje i tačna estimacija parametara koji opisuju njihov rad.

Proizvođači gorivnih ćelija daju samo osnovne podatke u specifikaciji modula gorivnih ćelija vodonika (broj ćelija u modulu, maksimalna gustina struje, površina membrane, dužina, operativni parcijalni pritisci vodonika i kiseonika, temperatura). Zbog toga je određivanje sedam nepoznatih parametara gorivne ćelije vodonika vrlo popularan i zahtjevan naučni zadatak, što potvrđuje veliki broj naučnih radova sa tom tematikom.

U ovom radu je, prvi put u literaturi, za estimaciju sedam nepoznatih parametara dvije literaturno poznate PEMFC, BCS 500 W i Ballard-Mark-V 5kW, upotrijebljen algoritam optimizacije morževa i njegove tri hibridne varijante – adaptivna, haotična i varijanta sa simuliranim kaljenjem. Preciznost predloženih hibridnih varijanti algoritma za estimaciju parametara je provjerena poređenjem sa tačnošću parametara dobijenih drugim estimacionim metodama i mjerenim vrijednostima. Eksperimentalno mjerene vrijednosti napona i struje za dvije PEMFC, BCS 500 W i Ballard-Mark-V 5kW su poznate. Za razliku od dostupne literature, u ovom radu je prvi put izveden matematički model struje PEMFC u zavisnosti od napona, i to upotrebom dvije numeričke iterativne metode – Lambert W funkcija i Regula Falsi metode. Validnost izvedenog matematičkog modela u ovom radu je dokazana sličnošću 3D grafika napon – struja – metod i struja – napon – metod za sve metode estimacije iz dostupne literature. Sličnost vrijednosti srednje kvadratne greške struje i srednje kvadratne greške napona za literaturno dostupne estimirane parametre dokazuje ravnopravnost oba primijenjena matematička modela – napona u zavisnosti od struje i modela struje u zavisnosti od napona. Za sve parametre estimirane u dostupnoj literaturi je određena vrijednost srednje kvadratne greške struje i ta razlika je poređena sa vrijednošću proračunatom u ovom radu. Poređenjem tačnosti estimiranih parametara u ovom radu sa estimiranim parametrima u dostupnoj literaturi, došlo se do zaključka da WaOA i njegove hibridne varijante daju veću tačnost od algoritama upotrijebljenih u dostupnoj literaturi. Poređenjem adaptivne, haotične i

varijante sa simuliranim kaljenjem WaOA došlo se do zaključka da najmanje odstupanje proračunatih od mjerenih vrijednosti struje daje haotična varijanta WaOA algoritma. Sa aspekta brzine konvergencije, najbrže konvergira hibridna varijanta sa simuliranim kaljenjem. Hibridna varijanta sa simuliranim kaljenjem ima i najmanje početne vrijednosti funkcije cilje. Povećanjem temperature ćelije raste i izlazna snaga ćelije, jer je povećana difuzija gasa i provodnost membrane. Takođe, sa povećanjem pritiska vodonika i kiseonika u ćeliji, raste izlazna snaga ćelije.

Ograničenja ovog istraživanja potiču iz primjene metaheurističkih algoritama kao alata za optimizaciju. Zbog same stohastičke prirode metaheurističkih algoritama, kod svakog primijenjenog algoritma postoji rizik da algoritam konvergira ka lokalnim minimumima ili maksimumima funkcije koja se optimizuje, umjesto da postigne globalno najbolje rješenje. Stohastičko ponašanje metaheurističkih algoritama može dovesti do toga da pri svakom ponavljanju daju rezultate koji su veoma bliski, ali se ipak razlikuju od globalno najboljeg rješenja. Ograničenje ovom istraživanju je zavisnost od mjerenih strujno – naponskih karakteristika, a to znači da istraživanje zavisi od tačnosti mjernih uređaja.

Buduća istraživanja u oblasti ćelija sa protonski provodljivom membranom mogla bi ići ka unapređenju i hibridizaciji novih metaheurističkih algoritama kako bi se povećala preciznost i brzina optimizacije. Bilo bi korisno da pravac budućih istraživanja ide ka eksperimentalnoj validaciji parametara estimiranih pomoću metaheurističkog algoritma. U cilju povećanja efikasnosti rada PEMFC i sniženja cijene ovih ćelija, značajno je razmatrati nove tipove membrana u PEMFC, kao i nove materijale za katalitičke slojeve i određivati parametre novih tipova ćelija.

LITERATURA

- [1] Zuo W, Zhao H, E J, Li Q, Li D. Numerical investigations on thermal performance and flame stability of hydrogen-fueled micro tube combustor with injector for thermophotovoltaic applications. *Int J Hydrog Energy* 2022; 47:17454–17467.
- [2] Zuo W, Zhang Y, E J, Li J, Li Q, Zhang G. Performance comparison between single S-channel and double S-channel cold plate for thermal management of a prismatic LiFePO₄ battery. *Renew Energy* 2022; 192:46–57.
- [3] Madadi Avargani V, Zendehboudi S, Cata Saady NM, Dusseault MB. A comprehensive review on hydrogen production and utilization in North America: Prospects and challenges. *Energy Convers Manag* 2022; 269:115927.
- [4] Li Z, Zheng Z, Xu L, Lu X. A review of the applications of fuel cells in microgrids: opportunities and challenges. *BMC Energy* 2019; 1:8.
- [5] Dunn S. Hydrogen futures: toward a sustainable energy system. *Int J Hydrog Energy* 2002; 27:235–264.
- [6] Holechek JL, Geli HME, Sawalhah MN, Valdez R. A global assessment: can renewable energy replace fossil fuels by 2050? *Sustainability* 2022; 14:4792.
- [7] Olabi AG, Wilberforce T, Abdelkareem MA. Fuel cell application in the automotive industry and future perspective. *Energy* 2021; 214:118955.
- [8] Zhang X, Zhang T, Chen H, Cao Y. A review of online electrochemical diagnostic methods of on-board proton exchange membrane fuel cells. *Appl Energy* 2021; 286: 116481.
- [9] Song Z, Pan Y, Chen H, Zhang T. Effects of temperature on the performance of fuel cell hybrid electric vehicles: a review. *Appl Energy* 2021; 302:117572.
- [10] Sharaf OZ, Orhan MF. An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications. *Renew Sustain Energy Rev* 2014; 32:810–853.
- [11] Derbeli M, Barambones O, Farhat M, Ramos-Hernanz JA, Sbita L. Robust high order sliding mode control for performance improvement of PEM fuel cell power systems. *Int J Hydrogen Energy* 2020; 45:29222–29234.
- [12] Ogungbemi E, Wilberforce T, Ijaodola O, Thompson J, Olabi AG. Selection of proton exchange membrane fuel cell for transportation. *Int J Hydrogen Energy* 2021; 46:30625–30640.
- [13] Uzunoglu M, Alam MS. Dynamic modeling, design, and simulation of a combined PEM fuel cell and ultracapacitor system for stand-alone residential applications. *IEEE Trans Energy Convers* 2006; 21:767–775.
- [14] Gong X, Dong F, Mohamed MA, Abdalla OM, Ali ZM. A secured energy management architecture for smart hybrid microgrids considering PEM-fuel cell and electric vehicles. *IEEE Access* 2020; 8:47807–47823.
- [15] Chadly A, Azar E, Maalouf M, Mayyas A. Techno-economic analysis of energy storage systems using reversible fuel cells and rechargeable batteries in green buildings. *Energy* 2022; 247:123466.
- [16] Pan M, Li C, Liao J, Lei H, Pan C, Meng X, et al. Design and modeling of PEM fuel cell based on different flow fields. *Energy* 2020; 207:118331.
- [17] Qais MH, Hasanien HM, Turkey RA, Alghuwainem S, Loo KH, Elgendy M. Optimal PEM fuel cell model using a novel circle search algorithm. *Electron* 2022; 11.

- [18]Shaheen MAM, Hasanien HM, El Moursi MS, El-Fergany AA. Precise modeling of PEM fuel cell using improved chaotic MayFly optimization algorithm. *Int J Energy Res* 2021; 45:18754–18769.
- [19]Restrepo C, Garcia G, Calvente J, Giral R, Martínez-Salamero L. Static and dynamic current-voltage modeling of a proton exchange membrane fuel cell using an input-output diffusive approach. *IEEE Trans Ind Electron* 2016; 63:1003–1015.
- [20]Lyu Z, Meng H, Zhu J, Han M, Sun Z, Xue H, et al. Comparison of off-gas utilization modes for solid oxide fuel cell stacks based on a semi-empirical parametric model. *Appl Energy* 2020; 270:115220.
- [21]Priya K, Sathishkumar K, Rajasekar N. A comprehensive review on parameter estimation techniques for Proton Exchange Membrane fuel cell modelling. *Renew Sustain Energy Rev* 2018; 93:121–144.
- [22]Rao Y, Shao Z, Ahangarnejad AH, Gholamalizadeh E, Sobhani B. Shark Smell Optimizer applied to identify the optimal parameters of the proton exchange membrane fuel cell model. *Energy Convers Manag* 2019; 182:1–8.
- [23]Ali ZM, Diaaeldin IM, El-Rafei A, Hasanien HM, Abdel Aleem SHE, Abdelaziz AY. A novel distributed generation planning algorithm via graphically-based network reconfiguration and soft open points placement using Archimedes optimization algorithm. *Ain Shams Eng J* 2021; 12:1923–1941.
- [24]Rawa M, Calasan M, Abusorrah A, Alhussainy AA, Al-Turki Y, Ali ZM, et al. Single diode solar cells—improved model and exact current–voltage analytical solution based on lambert’s W function. *Sensors* 2022; 22:4173.
- [25]Calasan M, Micev M, Ali ZM, Zobaa AF, Abdel Aleem SHE. Parameter estimation of induction machine single-cage and double-cage models using a hybrid simulated annealing–evaporation rate water cycle algorithm. *Mathematics* 2020; 8:1024.
- [26]Shaheen MAM, Hasanien HM, Turkey RA, Calasan M, Zobaa AF, Aleem SHEA. Opf of modern power systems comprising renewable energy sources using improved chgs optimization algorithm. *Energies* 2021; 14.
- [27]Calasan M., Shady H.E. Abdel Aleem, Hany M. Hasanien, Zuhair M. Alaas, Ziad M. Ali. An innovative approach for mathematical modeling and parameter estimation of PEM fuel cells based on iterative Lambert W function. *Energy* 2023; 264:126165.
- [28]Qais MH, Hasanien HM, Turkey RA, Alghuwainem S, Loo KH, Elgendy M. Optimal PEM fuel cell model using a novel circle search algorithm. *Electron* 2022; 11.
- [29]Shaheen MAM, Hasanien HM, El Moursi MS, El-Fergany AA. Precise modeling of PEM fuel cell using improved chaotic MayFly optimization algorithm. *Int J Energy Res* 2021; 45:18754–18769.
- [30]Fawzi M, El-Fergany AA, Hasanien HM. Effective methodology based on neural network optimizer for extracting model parameters of PEM fuel cells. *Int J Energy Res* 2019; 43:8136–8147.
- [31]Kandidayeni M, Macias A, Khalatbarisoltani A, Boulon L, Kelouwani S. Benchmark of proton exchange membrane fuel cell parameters extraction with metaheuristic optimization algorithms. *Energy* 2019; 183:912–925.
- [32]Yakout AH, Hasanien HM, Kotb H. Proton exchange membrane fuel cell steady state modeling using marine predator algorithm optimizer. *Ain Shams Eng J* 2021; 12:3765–3774.
- [33]Fahim SR, Hasanien HM, Turkey RA, Alkuhayli A, Al-shamma’a AA, Noman AM, et al. Parameter identification of proton exchange membrane fuel cell based on hunger games search algorithm. *Energies* 2021; 14.

- [34] Selem SI, Hasanien HM, El-Fergany AA. Parameters extraction of PEMFC's model using manta rays foraging optimizer. *Int J Energy Res* 2020; 44:4629–4640.
- [35] El-Fergany AA, Hasanien HM, Agwa AM. Semi-empirical PEM fuel cells model using whale optimization algorithm. *Energy Convers Manag* 2019; 201:112197.
- [36] El-Fergany AA. Electrical characterisation of proton exchange membrane fuel cells stack using grasshopper optimiser. *IET Renew Power Gener* 2018; 12:9–17.
- [37] Singla M.K., Nijhawan P., Oberoi A.S. Hydrogen fuel and fuel cell technology for cleaner future: a review. *Environmental Science Pollution Research* 2021; 28:15607–15626.
- [38] Shafiee S, Erkan T. When will fossil fuel reserves be diminished? *Energy Policy* 2009; 37:181–189.
- [39] Fernández-Guillamón A, Gómez-Lázaro E, Muljadi E, Molina-García Á. 2019. Power systems with high renewable energy sources: A review of inertia and frequency control strategies over time. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier 2019; 115.
- [40] Pudukudy M, Yaakob Z, Mohammad M, Narayanan B, Sopian K. Renewable hydrogen economy in Asia—opportunities and challenges: an overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2014; 30:743–757.
- [41] F. Wagner. Surplus from and storage of electricity generated by intermittent sources. *Eur. Phys. J. Plus* 2016; 131:445.
- [42] Wanner M. Transformation of electrical energy into hydrogen and its storage. *Eur. Phys. J. Plus* (2021); 136: 593.
- [43] Samsatli S, Staffell I, Samsatli NJ. Optimal design and operation of integrated wind-hydrogen-electricity networks for decarbonising the domestic transport sector in Great Britain. *Int J Hydrog Energy* 2016; 41:447–475.
- [44] Shiva Kumar S, Himabindu V. Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. *Materials Science for Energy Technologies* 2019; 2:442-454.
- [45] Stroman RO, Schuette MW, Swider-Lyons K, Rodgers JA, Edwards DJ. Liquid hydrogen fuel system design and demonstration in a small long endurance air vehicle. *Int J Hydrog Energy* 2014; 39: 11279–11290.
- [46] Chamoun R, Demirci UB, Miele P. Cyclic dehydrogenation–(re) hydrogenation with hydrogen-storage materials: an overview. *Energy Technol* 2015; 3:100–117.
- [47] Tollefson J. Hydrogen vehicles: fuel of the future? *Nature* 2010; 464:1262–1264
- [48] Dodds PE, Staffell I, Hawkes AD, Li F, Grünewald P, McDowall W, Ekins P. Hydrogen and fuel cell technologies for heating: a review. *Int J Hydrog Energy* 2015; 40:2065–2083.
- [49] Napp TA, Gambhir A, Hills TP, Florin N, Fennell PS. A review of the technologies, economics and policy instruments for decarbonising energy-intensive manufacturing industries. *Renew Sust Energ Rev* 2014; 30:616–640
- [50] Ni M, Leung MKH, Sumathy K, Leung DY. Potential of renewable hydrogen production for energy supply in Hong Kong. *International Journal of Hydrogen Energy* 2006; 31:1401–1412.
- [51] Gahleitner G. Hydrogen from renewable electricity: An international review of power-to-gas pilot plants for stationary applications. *Int J Hydrog Energy* 2013; 38:2039–2061.
- [52] Brauns J, Turek T. Alkaline Water Electrolysis Powered by Renewable Energy: A Review. *Processes* 2020; 8:248.

- [53] Little M, Thomson M, Infield D. Electrical integration of renewable energy into stand-alone power supplies incorporating hydrogen storage. *Int J Hydrogen Energy* 2007; 32:1582-1588.
- [54] Niu M, Li X, Sun C, Xiu X, Wang Y, Hu M, Dong H. Operation Optimization of Wind/Battery Storage/Alkaline Electrolyzer System Considering Dynamic Hydrogen Production Efficiency. *Energies* 2023; 16:6132.
- [55] Yodwong B, Guilbert D, Phattanasak M, Kaewmanee W, Hinaje M, Vitale G. AC-DC Converters for Electrolyzer Applications: State of the Art and Future Challenges. *Electronics* 2020; 9:912.
- [56] Bossel U. Does a hydrogen economy make sense? *Proc IEEE* 2006; 94:1826–1837.
- [57] Zhu J, Dai L, Yu Y, Cao J, Wang L. Direct electrochemical route from oxides to TiMn₂ hydrogen storage alloy. *Chin J Chem Eng* 2015; 23:1865–1870.
- [58] Li Q, Ghadiani H, Jalilvand V, Alam T, Farhat Z, Islam MA. Hydrogen Impact: A Review on Diffusibility, Embrittlement Mechanisms, and Characterization. *Materials* 2024; 17:965.
- [59] Polanski M, Bystrzycki J, Plocinski T. The effect of milling conditions on microstructure and hydrogen absorption/desorption properties of magnesium hydride (MgH₂) without and with Cr₂O₃ nanoparticles. *Int J Hydrog Energy* 2008; 33:1859–1867.
- [60] Gennari FC, Esquivel MR. Structural characterization and hydrogen sorption properties of nanocrystalline Mg₂Ni. *J Alloys Compd* 2008; 459:425–432.
- [61] Aziz M. Liquid Hydrogen: A Review on Liquefaction, Storage, Transportation, and Safety. *Energies* 2021; 14:5917.
- [62] Kusadome Y, Ikeda K, Nakamori Y, Orimo S, Horita Z. Hydrogen storage capability of MgNi₂ processed by high pressure torsion. *Scripta Materialia* 2007; 57:751–753.
- [63] Demircan A, Demiralp M, Kaplan Y, Mat MD, Veziroglu TN. Experimental and theoretical analysis of hydrogen absorption in LaNi₅-H₂ reactors. *Int J Hydrog Energy* 2005; 30:1437–1446.
- [64] Marchenko OV, Solomin SV. The future energy: hydrogen versus electricity. *Int J Hydrog Energy* 2015; 40:3801–3805.
- [65] Tarek S, Khadhraoui A, Cherif A. Fuel cell-based electric vehicles technologies and challenges. *Environmental Science and Pollution Research* 2022; 29:78121–78131.
- [66] Thomas CE. Fuel cell and battery electric vehicles compared. *Int J Hydrog Energy* 2009; 34:6005–6020.
- [67] Bethoux O. Hydrogen fuel cell road vehicles: state of the art and perspectives. *Energies* 2020; 13:5843.
- [68] Ajanovic A, Glatt A, Haas R. Prospects and impediments for hydrogen fuel cell buses. *Energy* 2021; 235:121340.
- [69] Samsun RC, Antoni L, Rex M, Stolten D. Deployment Status of Fuel Cells in Road Transport: update 2021. *Energie & Umwelt. Energy Environ* 2021; 542:1–51.
- [70] Muthukumar M, Rengarajan N, Velliyangiri B, Omprakas MA, Rohit CB. The development of fuel cell electric vehicles – a review. *Mater Today: Proc* 2021; 45:1181–1187.
- [71] Zhang Y, Liu J, Cui S, Zhou M. Parameter matching methods for Li battery–supercapacitor hybrid energy storage systems in electric buses. *Mach Comp* 2022; 10:85.

- [72] Mallon K, Assadian F. A study of control methodologies for the trade-of between battery aging and energy consumption on electric vehicles with hybrid energy storage systems. *Energies* 2022; 15:6.
- [73] Tellez-Cruz MM, Escorihuela J, Solorza-Feria O, Compañ V. Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFCs): Advances and Challenges. *Polymers* 2021; 13:3064.
- [74] Zhang Y, Wang J, Yao Z. Recent Development of Fuel Cell Core Components and Key Materials: A Review. *Energies* 2023; 16:2099.
- [75] Ji S., Hwang Y.-S, Park T, Lee Y.H, Paek J.Y, Chang I, Lee M.H, Cha S.W. Graphite foil based assembled bipolar plates for polymer electrolyte fuel cells. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 2012; 13:2183–2186.
- [76] Lin S.Y, Chang M. Effect of microporous layer composed of carbon nanotube and acetylene black on polymer electrolyte membrane fuel cell performance. *Int. J. Hydrogen Energy* 2015. 40:7879–7885.
- [77] Shiino K, Otomo T, Yamada T, Arima H, Hiroi K, Takata S, Miyake J, Miyatake K. Structural investigation of sulfonated polyphenylene ionomers for the design of better performing proton-conductive membranes. *ACS Appl. Polym. Mater.* 2020; 2:5558–5565.
- [78] Yassine Khebou. Fuel cells: Operating principle and energy issues. ResearchGate 2022.
- [79] Fathy A, Abdel Aleem SHE, Rezk H. A novel approach for PEM fuel cell parameter estimation using LSHADE-EpSin optimization algorithm. *Int J Energy Res* 2021;45: 6922–6942.
- [80] Mann R.F, Amphlett J.C, Hooper M.A.I, Jensen H.M, Peppley B.A, Roberge P.R. Development and application of a generalised steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell. *Journal of Power Sources* 2000; 86: 173-180.
- [81] Calasan M, Abdel Aleem SHE, Zobaa AF. A new approach for parameters estimation of double and triple diode models of photovoltaic cells based on iterative Lambert W function. *Sol Energy* 2021; 218:392–412.
- [82] Calasan M, Zobaa AF, Hasanien HM, Abdel Aleem SHE, Ali ZM. Towards accurate calculation of supercapacitor electrical variables in constant power applications using new analytical closed-form expressions. *J Energy Storage* 2021;42:102998.
- [83] Calasan M, Abdel Aleem SHE, Zobaa AF. On the root mean square error (RMSE) calculation for parameter estimation of photovoltaic models: a novel exact analytical solution based on Lambert W function. *Energy Convers Manag* 2020; 210:112716.
- [84] Rawa M, Al-Turki Y, Sindi H, Calasan M, Ali ZM, Abdel Aleem SHE. Current-voltage curves of planar heterojunction perovskite solar cells – novel expressions based on Lambert W function and Special Trans Function Theory. *J Adv Res* 2022.
- [85] Calasan M, Al-Dhaifallah M, Ali ZM, Abdel Aleem SHE. Comparative analysis of different iterative methods for solving current–voltage characteristics of double and triple diode models of solar cells. *Math* 2022. 10.
- [86] Rizk-Allah RM, Mageed HMA, El-Sehiemy RA, Aleem SHEA, El Shahat A. A new sine cosine optimization algorithm for solving combined non-convex economic and emission power dispatch problems. *Int J Energy Convers* 2017;5:180–92.
- [87] Trojovsky P, Dehghani M. Walrus Optimization Algorithm: A New Bio-Inspired Metaheuristic Algorithm. *Sci Rep* 2023; 13:8775.

- [88]Vujošević S, Čalasan M, Micev M. Hybrid walrus optimization algorithm techniques for optimized parameter estimation in single, double, and triple diode solar cell models. AIP Advances 2024; 14.
- [89]Correa J. M, Farret F. A, Canha L. N, Simoes M. G. An electrochemical-based fuel-cell model suitable for electrical engineering automation approach. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2004; 51:1103-1112.
- [90] Song Z, Pan Y, Chen H, Zhang T. Effects of temperature on the performance of fuel cell hybrid electric vehicles: A review, Applied Energy 2021; 302:117572.