

UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET PODGORICA

Spec. sci Miljan Janketić

**Primjena hibridnih modifikacija
metaheurističkih algoritama za
estimaciju parametara zamjenskih šema
asinhronne mašine**

– MASTER RAD –

Podgorica, 2025. godine

PODACI O STUDENTU

Ime i prezime:	Miljan Janketić
Datum i mjesto rođenja:	02. 06. 1996. godine, Podgorica
Naziv završenog studijskog programa:	Energetika i automatika
Godina završetka:	2019

INFORMACIJE O MASTER RADU

Naziv master studija:	Automatika i industrijska elektrotehnika
Naslov rada:	Primjena hibridnih modifikacija metaheurističkih algoritama za estimaciju parametara zamjenskih šema asinhronne mašine
Fakultet na kojem je rad odbranjen:	Elektrotehnički fakultet

UDK, OCJENA I ODBRANA MASTER RADA

Datum prijave master rada:	13.05.2022. godine
Datum sjednice Vijeća na kojoj je prihvaćena tema i mentor:	23.11.2022. godine
Komisija za ocjenu/odbranu master rada:	1) Prof. dr Vladan Vujičić, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet Crne Gore, predsjednik 2) Prof. dr Vesna Rubežić, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet Crne Gore, član 3) Prof. dr Martin Čalasan, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet Crne Gore, mentor
Datum odbrane:	
Datum promocije:	

Izjava o autorstvu

Potpisani Miljan Janketić

Broj indeksa/upisa: 1012/2021

Izjavljujem

da je master rad pod naslovom:

Primjena hibridnih modifikacija metaheurističkih algoritama za estimaciju parametara zamjenskih šema asinhronne mašine

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

U Podgorici, 12.12.2025. godine

Potpis magistranda



Predgovor

Asinhrona mašine zauzimaju ključno mjesto u savremenim elektroenergetskim i industrijskim pogonskim sistemima, gdje se odlikuju pouzdanošću, robusnošću i širokom primjenljivošću. Zahvaljujući masovnoj zastupljenosti, razumijevanje njihovog rada, dinamičkog ponašanja i interakcije sa ostalim elementima elektroenergetskog sistema predstavlja veoma važan segment savremenih istraživanja iz oblasti električnih mašina i pogona. Precizno poznavanje zamjenskih šema asinhrona mašine i njenih parametara od presudnog je značaja kako za analitičko modelovanje, tako i za razvoj naprednih metoda upravljanja, nadgledanja i optimizacije rada.

Proces određivanja parametara zamjenskih šema asinhronih mašina predstavlja izazovan identifikacioni problem zbog izraženih nelinearnosti, međuzavisnosti parametara i osjetljivosti na mjerni šum. Tradicionalne metode estimacije, zasnovane na standardnim testovima i linearnim aproksimacijama, često nijesu dovoljne da zadovolje potrebe savremenih algoritama upravljanja i monitoringa. Zbog toga je primjena metaheurističkih optimizacionih algoritama prirodno rješenje, budući da pružaju fleksibilnost, otpornost na lokalne minimume i sposobnost efikasnog pretraživanja složenih optimizacionih prostora.

U okviru ovog rada sprovedena su sistematična i sveobuhvatna istraživanja usmjerena ka poboljšanju tačnosti i efikasnosti procesa estimacije parametara zamjenskih šema asinhronih mašina. U prvom dijelu rada analizirane su performanse postojećih metaheurističkih metoda, kao i osnovnog HBA algoritma, pri čemu je akcenat stavljen na identifikaciju njihovih prednosti i ograničenja. U cilju prevazilaženja uočenih nedostataka, predložene su nove hibridne modifikacije HBA algoritma, koje integrišu različite heurističke mehanizme sa ciljem poboljšanja konvergencije i povećanja preciznosti estimacije.

Poseban dio istraživanja posvećen je primjeni predloženih algoritama na više asinhronih mašina čiji su podaci dostupni u literaturi, što je omogućilo detaljnu i međusobno uporedivu evaluaciju performansi. Dodatno, sprovedena su eksperimentalna mjerenja na realnoj asinhronoj mašini dostupnoj u laboratoriji Elektrotehničkog fakulteta u Podgorici, čime je omogućena validacija razvijenih metoda u realnim radnim uslovima. Rezultati dobijeni na osnovu eksperimentalnih karakteristika potvrdili su robusnost, stabilnost i praktičnu primjenjivost predloženih hibridnih rješenja.

S obzirom na obim i sadržaj obrađene problematike, može se zaključiti da je istraživanje prikazano u ovom radu predstavljalo važan korak u pravcu unapređenja metoda estimacije parametara asinhronih mašina. Rad takođe postavlja temelje za buduća istraživanja u ovoj oblasti, posebno u smjeru razvoja naprednijih hibridnih optimizacionih algoritama i analize složenijih modela mašina.

U Podgorici, novembar 2025. godine

Izvod rada

Asinhrona mašine predstavljaju najrasprostranjeniji tip obrtnih električnih mašina u savremenim industrijskim i elektroenergetskim sistemima, što nameće potrebu za pouzdanim, preciznim i efikasnim metodama za estimaciju njihovih parametara. Zbog izraženih nelinearnosti modela i osjetljivosti na mjerni šum, određivanje parametara zamjenskih šema asinhrona mašine predstavlja veoma zahtjevan optimizacioni problem. Upravo iz tog razloga primjena metaheurističkih algoritama postaje sve aktuelnija. Predmet ovog rada je poređenje performansi postojećih metaheurističkih algoritama sa novim hibridnim modifikacijama HBA algoritma, kao i njihova primjena u estimaciji parametara jednokaveznog i dvokaveznog modela asinhrona mašine, korišćenjem podataka iz literature i eksperimentalnih mjerenja.

U okviru istraživanja najprije je izvršena analiza nekoliko postojećih metaheurističkih algoritama (AVOA, EO, GBO, LSO i OOB0), čije su performanse upoređene sa osnovnim HBA algoritmom na mašinama prikazanim u literaturi. Potom su predložene tri nove hibridne modifikacije HBA algoritma — C-HBA, SA-HBA i EO-HBA — koje integrišu haotične sekvence, mehanizme lokalne pretrage i balansirane faze eksploatacije i istraživanja. Sve varijante algoritama testirane su na više asinhronih mašina iz literature, za oba modela (jednokavezni i dvokavezni). U završnoj fazi istraživanja sprovedena su eksperimentalna mjerenja moment–klizanje i faktor snage–klizanje karakteristika laboratorijske asinhrona mašine, na osnovu kojih je izvršena dodatna validacija performansi razvijenih algoritama.

Rezultati pokazuju da osnovni HBA algoritam nadmašuje ostale uporedne metode iz literature u pogledu minimalne vrijednosti kriterijumske funkcije i stabilnosti procijenjenih parametara. Predložene hibridne varijante HBA algoritma ostvaruju dodatna poboljšanja, takođe u pogledu minimizacije kriterijumske funkcije i povećanja brzine konvergencije. Dobijeni parametri jednokaveznog i dvokaveznog modela pokazuju dobro slaganje sa eksperimentalno snimljenim karakteristikama, a zaključci izvedeni na osnovu literaturnih podataka potvrđeni su i u realnim laboratorijskim uslovima.

Glavni doprinos rada ogleda se u razvoju i evaluaciji novih hibridnih modifikacija HBA algoritma, koje omogućavaju precizniju i bržu estimaciju parametara zamjenskih šema asinhronih mašina u odnosu na osnovni HBA algoritam i druge često korišćene metaheurističke metode. Dodatni doprinos predstavlja kompletna dvostepena verifikacija – najprije na

mašinama iz literature, a zatim i na eksperimentalnim podacima, čime je potvrđena robusnost i praktična primjenjivost predloženih algoritama. Konačno, rad daje metodološki okvir koji se može proširiti i na složenije modele, kao i na druge klase električnih mašina.

Ključne riječi: asinhrona mašina, estimacija parametara, hibridne modifikacije, metaheuristički algoritmi.

Thesis overview

Asynchronous (induction) machines represent the most widely used type of rotating electrical machines in modern industrial and power systems, which highlights the need for reliable, accurate, and efficient methods for estimating their parameters. Due to the pronounced nonlinearities of their mathematical models and the sensitivity to measurement noise, determining the parameters of equivalent circuit models of induction machines constitutes a highly demanding optimization task. For this reason, the application of metaheuristic algorithms has become increasingly relevant. The subject of this work is a comparative analysis of existing metaheuristic algorithms and newly proposed hybrid modifications of the HBA algorithm, as well as their application to parameter estimation of single-cage and double-cage induction machine models, using both literature-based data and experimental measurements.

The research methodology initially includes an analysis of several established metaheuristic algorithms (AVOA, EO, GBO, LSO, and OOB), whose performance is compared with the basic HBA algorithm on induction machines reported in the literature. Subsequently, three new hybrid variants of the HBA algorithm — C-HBA, SA-HBA, and EO-HBA — are proposed. These variants integrate chaotic sequences, local search mechanisms, and balanced exploration–exploitation strategies. All algorithmic variants were tested on multiple induction machines from the literature for both the single-cage and double-cage models. In the final stage of the research, experimental measurements of torque–slip and power factor–slip characteristics were carried out on a laboratory induction machine, providing an additional basis for validating the performance of the developed algorithms.

The obtained results demonstrate that the basic HBA algorithm outperforms other comparative methods from the literature in terms of the minimum value of the objective function and the stability of the estimated parameters. The proposed hybrid variants provide further improvements, also in terms of accuracy of the results and convergence speed. The parameters estimated for the single-cage and double-cage models show good agreement with the experimentally measured characteristics, and the conclusions drawn from the literature-based simulations are fully confirmed under real laboratory conditions.

The main contribution of this work lies in the development and evaluation of new hybrid HBA modifications, which enable more accurate and faster parameter estimation of induction machine equivalent circuit models compared to the basic HBA algorithm and other established metaheuristic methods. An additional contribution is the complete two-stage validation — first on machines from the literature and subsequently on experimental data — which confirms the robustness and practical applicability of the proposed algorithms. Finally, the work establishes a methodological framework that can be further extended to more complex models as well as other classes of electrical machines.

Keywords: induction machine, parameter estimation, hybrid modifications, metaheuristic algorithms.

SADRŽAJ

Uvod.....	1
Poglavlje 1.....	6
Karakteristike asinhrona mašine	6
1.1 Konstrukcione karakteristike	6
1.1.1 Magnetsko jezgro mašine.....	7
1.1.2 Geometrija žljebova.....	9
1.1.3 Namotaji asinhrona mašine.....	10
1.2 Princip rada asinhrona mašine.....	13
1.3 Mehaničke karakteristike asinhrona mašine.....	14
1.4 Ekvivalentne zamjenske šeme asinhrona mašine.....	18
Poglavlje 2	22
Metaheuristički algoritmi	22
2.1 Osnovni pojmovi optimizacije i metaheurističkih algoritama.....	22
2.2 Metaheuristički algoritmi korišćeni u radu.....	23
2.2.1 Osnovni metaheuristički algoritmi korišćeni u radu	23
2.2.2 Hibridne verzije algoritma medojeda	27
Poglavlje 3	30
Rezultati estimacije parametara asinhronih mašina korišćenih u literaturi	30
3.1 Rezultati estimacije parametara – primjer 1.....	30
3.2 Rezultati estimacije parametara – primjer 2	34
3.3 Rezultati estimacije parametara – primjer 3	39
Poglavlje 4	43
Rezultati estimacije parametara laboratorijske asinhrona mašine	43

Zaključak	50
Literatura	52

Uvod

Asinhrona mašine (AM), posebno trofazne kavezne mašine, predstavljaju najrasprostranjeniji tip obrtnih električnih mašina u savremenim industrijskim i elektroenergetskim sistemima [1–3]. Njihova široka primjena zasniva se na nizu prednosti u odnosu na druge tipove mašina: jednostavna i robusna konstrukcija, niska cijena, mali zahtjevi za održavanjem, visoka efikasnost i pouzdan rad u širokom opsegu brzina i opterećenja [1,4]. Uloga ovih mašina je ključna u primjenama sa konstantnom ili promjenljivom brzinom, sa direktnim priključenjem na mrežu ili napajanjem preko pretvarača, kao i u naprednim pogonima sa vektorskim upravljanjem [4–7]. U svim ovim slučajevima, za analizu performansi, projektovanje upravljačkih algoritama, simulaciju prelaznih stanja i procjenu energetske karakteristike neophodno je raspolagati adekvatnim matematičkim modelom i precizno određenim parametrima zamjenske šeme mašine [1–3,8].

Osnovne testne procedure za određivanje parametara zamjenskih šema asinhrona mašine formalno su definisane u IEEE i IEC standardima, u kojima su propisani standardizovani postupci mjerenja i proračuna parametara ekvivalentnog kola na osnovu ispitivanja u praznom hodu, zakočenom rotoru i pri nazivnim radnim uslovima [2,3]. Problem estimacije parametara zamjenskih šema asinhrona mašine veoma je intenzivno proučavan u savremenoj literaturi, o čemu svjedoči veliki broj objavljenih naučnih radova [4–40]. U tim istraživanjima razmatraju se različite konfiguracije zamjenskih šema, pri čemu se u ustaljenom stanju najčešće koriste jednokavezni i dvokavezni model asinhrona mašine.

Jednokavezni model predstavlja jednostavniju zamjensku šemu sa ukupno pet parametara (dva otpornika i tri reaktanse), koja se široko koristi u analizi i projektovanju zbog male složenosti i relativno niske računarske zahtjevnosti [1,4,5,7,9–13,15,18,19,22,23,26–28,31,37,39,40]. Ipak, u brojnim aplikacijama – naročito u području većih klizanja, pri pokretanju, u pogonima sa zahtjevnim momentnim karakteristikama i kod mašina sa izraženijim efektom dubinskog provoda – jednokavezni model ne može sa dovoljnom tačnošću da reprodukuje stvarne moment–klizanje i struja–klizanje karakteristike [1,2,7,11,15,25,34,38,39]. U takvim slučajevima u literaturi se sve više koristi dvokavezni model, koji se dobija proširivanjem rotorske grane dodatnim paralelnim krakom, čime se omogućava razdvajanje

površinskih i dubinskih struja u kavezu i znatno preciznije opisivanje ponašanja mašine u širokom opsegu klizanja [2,4,7,8,15,24,25,38]. Posebno za mašine sa izraženim dubinskim provodom ili kod NEMA dizajn motora, dvokavezni model se pokazuje kao znatno prikladniji [4,7,8,25,38]. Sa druge strane, dvokavezni model uvodi veći broj parametara i povećava nelinearnost optimizacionog problema, što proces estimacije čini znatno složenijim [7,8,15,24,25,38].

Standardne testne procedure za određivanje parametara zamjenskih šema asinhronne mašine definisane su u IEEE i IEC standardima [2,3], gdje se propisuju mjerenja u praznom hodu, zakočenom rotoru i pri nazivnim uslovima rada. U praksi, parametri se često određuju na osnovu katalogskih podataka proizvođača [4,5,14,15], ili na osnovu eksperimentalno snimljenih podataka dobijenih mjerenjem struja, napona, momenta, faktora snage i drugih veličina [6,7,16,17]. Pristup zasnovan na podacima proizvođača ima nekoliko ograničenja: dokumentacija ponekad nije potpuna, ne mora odražavati realne eksploatacione uslove, a za starije mašine podaci često ni ne postoje [4,5,14]. Zbog toga savremeni radovi sve više naglašavaju prednost pristupa zasnovanih na eksperimentima, gdje se parametri izvode direktno iz mjerenih karakteristika mašine [6,7,16–18].

Veliki broj metoda za identifikaciju parametara asinhronne mašine razvijen je tokom posljednjih decenija, a opsežni pregledi stanja mogu se naći u više preglednih radova [7,16–19]. U skladu sa njima, metode se često klasifikuju u sljedeće grupe: (a) metode zasnovane na modelima u ustaljenom stanju, (b) metode zasnovane na konstrukcijskim karakteristikama, (c) metode zasnovane na ispitivanjima u frekvencijskom domenu, (d) metode zasnovane na vremenskom (time-domain) odzivu i (e) metode zasnovane na estimaciji parametara u realnom vremenu. Metode iz prve grupe polaze od algebarskih jednačina ekvivalentnog kola asinhronne mašine pri različitim radnim tačkama [7,9–11,16]. U okviru ove klase razvijene su analitičke procedure [9,20], unaprijeđene iterativne metode [10,21] i veliki broj optimizacionih algoritama [11–15,22–27]. Analitički pristupi su atraktivni zbog jednostavnosti i brzine, ali se u složenijim modelima i u prisustvu šuma mjerenja često pokazuju nedovoljno preciznim [9,20]. Iterativne metode, iako tačnije, obično trpe od zavisnosti od početnih uslova i sklonosti ka lokalnim minimumima [10,21]. Metode zasnovane na konstrukcionim podacima, koje koriste detaljne informacije o geometriji mašine i materijalima, uz podršku numeričkih metoda polja (npr. metoda konačnih elemenata), smatraju se najpreciznijim, ali su zbog svoje složenosti, cijene i potrebe za detaljnom dokumentacijom uglavnom

ograničene na proizvođače i specijalizovane laboratorije [13,28–30]. Metode u frekvencijskom i vremenskom domenu dodatno proširuju spektar pristupa: koriste se Kalmanovi filtri, Laplasova transformacija, Lyapunovljeve funkcije, integralne metode i napredne tehnike obrade signala [18,19,31–34]. Pored toga, značajan broj radova razmatra estimaciju parametara u realnom vremenu i online identifikaciju, naročito u kontekstu vektorskog upravljanja [18,19,31]. Iako ove metode omogućavaju kontinuirano prilagođavanje modela uslovima rada (promjena temperature, zasićenje, oštećenja kaveza itd.), njihova primjena je složenija, zahtijeva dodatni hardver i naprednu softversku podršku.

Uprkos raznolikosti metoda, najintenzivniji razvoj u poslednjim godinama nesumnjivo je vezan za primjenu metaheurističkih algoritama u procesu estimacije parametara asinhronih mašina. Diferencijalna evolucija (DE) korišćena je za identifikaciju parametara trofaznih asinhronih motora u [11], dok je u [12] demonstriran hibridni pristup zasnovan na genetičkom algoritmu (GA) i algoritmu rojeva čestica (PSO). U radovima [22,23,25,26] predstavljene su različite metaheuristike (PSO, *artificial immune system*, *bacterial foraging*, *artificial fish swarm*, itd.), kao i njihove modifikacije. U posebno značajnom radu [27] data je komparativna analiza više metaheurističkih algoritama za problem estimacije parametara, čime je potvrđeno da stohastički optimizacioni pristupi pružaju značajne prednosti u odnosu na klasične metode. Pored toga, u [31,35,36] razmatra se uticaj temperature, zasićenja i drugih fenomena na parametre mašine, uz primjenu naprednih optimizacionih i identifikacionih procedura.

Od posebnog je značaja činjenica da su u literaturi predloženi brojni specijalizovani metaheuristički algoritmi i njihove varijante upravo za problem identifikacije asinhronih mašina. Tako je u [37] prikazana primjena genetičkih algoritama za određivanje parametara asinhronih motora, pri čemu se demonstrira da GA može postići prihvatljivu tačnost u odnosu na standardne metode. U radovima [38,39] predložena je primjena *shuffled frog-leaping algoritma* (SFLA) za estimaciju parametara asinhronih mašina; u [38] je razmatran dvokavezni model, dok je u [39] ista metoda korišćena za jednokavezni model. Ovi radovi su naročito značajni jer direktno tretiraju dvokavezni model, što je u literaturi rjeđe, i potvrđuju da metaheurističke metode mogu uspješno rješavati i složenije probleme vezane za estimaciju parametara.

Novija istraživanja dodatno proširuju upotrebu metaheuristika i hibridnih algoritama. U [20] je primijenjen biomimetički *Goat Optimization Algorithm* (GOA), dok su u [21,22] analizirani *sine-cosine* algoritam (SCA) i njegove hibridne varijante, uključujući kombinacije sa

PSO algoritmom, sa ciljem balansiranja istraživanja i eksploatacije u procesu optimizacije. Pored toga, u [23] su predložene metode zasnovane na modelima stabala odluke (*decision tree*) za određivanje parametara dvokaveznog modela, čime se problem identifikacije dodatno približava metodama mašinskog učenja. U [24] analizirani su i složeniji, višekavezni modeli (npr. trokavezni), što dodatno komplikuje optimizacioni prostor i naglašava potrebu za efikasnim i robusnim optimizacionim metodama.

U radu [7] je predložena hibridna varijanta algoritma *Evaporation Rate Water Cycle* (ERWCA), kombinovana sa *Simulated Annealing* (SA) tehnikom, što je rezultiralo SA-ERWCA algoritmom. U tom radu izvršena je detaljna analiza performansi hibridnog algoritma na više trofaznih asinhronih mašina iz literature, pri čemu su razmatrani i jednokavezni i dvokavezni modeli, a SA-ERWCA je upoređen sa nizom literaturno poznatih optimizacionih metoda. Rezultati pokazuju da hibridizacija može značajno unaprijediti brzinu i stabilnost konvergencije, te služe kao snažna motivacija za dalje istraživanje hibridnih metaheurističkih pristupa u identifikaciji asinhronih mašina [7,22,27].

Iz prikazanog pregleda literature mogu se izdvojiti nekoliko ključnih zaključaka. Prvo, metaheuristički algoritmi predstavljaju trenutno najperspektivniji pristup za rješavanje problema estimacije parametara zamjenskih šema asinhronih mašina, posebno u uslovima nelinearnosti, višedimenzionosti i prisustva šuma u mjerenjima [7,11–15,20–22]. Drugo, hibridne modifikacije postojećih algoritama – bilo da je riječ o kombinaciji dvije metaheuristike, integraciji lokalnih pretraživača ili uvođenju haotičkih sekvenci – u pravilu dovode do poboljšanja tačnosti i brzine konvergencije [7,12,20–22,27,38,39]. Treće, većina radova fokusirana je na relativno ograničen broj mašina i modela, često posmatrajući isključivo jednokavezni ili isključivo dvokavezni model, dok su sistematične studije koje obuhvataju obje strukture i više različitih mašina rjeđe [2,4,8,11–13,38,39]. Četvrto, iako postoje radovi koji koriste eksperimentalno snimljene karakteristike, značajan dio literature i dalje se oslanja prvenstveno na podatke iz kataloga ili literature, pa je potreba za verifikacijom u realnim laboratorijskim uslovima i dalje veoma izražena [6,7,16–18,23,24].

Motivisan navedenim zapažanjima, ovaj master rad usmjeren je na razvoj, primjenu i poređenje novih hibridnih modifikacija metaheurističkog HBA algoritma za estimaciju parametara zamjenskih šema asinhronih mašina. Konkretno, razmatraju se tri hibridne varijante HBA algoritma (C-HBA, SA-HBA i EO-HBA), osmišljene sa ciljem unapređenja globalne pretrage, poboljšanja konvergencijskih svojstava i povećanja robusnosti optimizacije.

Predloženi algoritmi se najprije porede sa originalnim HBA algoritmom, kao i sa drugim savremenim metaheurističkim metodama dostupnim u literaturi (uključujući AVOA, EO, GBO, LSO, OOBO i druge), na mašinama čiji su podaci preuzeti iz literature. Zatim se svi algoritmi primjenjuju na eksperimentalno snimljene karakteristike laboratorijske asinhronne mašine sa Elektrotehničkog fakulteta u Podgorici, čime se obezbjeđuje dvostepena verifikacija – numerička i eksperimentalna – performansi razvijenih metoda.

Struktura rada prilagođena je ovakvom konceptu istraživanja. U prvom poglavlju dat je uvod u problematiku i pregled literature. U drugom poglavlju predstavljene su osnovne teorijske postavke asinhronne mašine i analiza jednokaveznih i dvokaveznih modela. Treće poglavlje posvećeno je opisu metaheurističkih algoritama korišćenih u radu, sa naglaskom na HBA algoritam i njegove hibridne modifikacije. U četvrtom poglavlju prikazani su rezultati estimacije parametara mašina iz literature i izvršena komparativna analiza posmatranih algoritama. Peto poglavlje obuhvata eksperimentalnu verifikaciju na realnoj mašini, uključujući snimanje karakteristika moment–klizanje i faktor snage–klizanje, kao i poređenje modelovanih i eksperimentalnih rezultata. Konačno, u šestom poglavlju izneseni su zaključci i pravci budućeg istraživanja, sa posebnim osvrtom na dalji razvoj hibridnih metaheurističkih algoritama i primjenu složenijih modela asinhronih mašina.

Poglavlje 1

Karakteristike asinhronne mašine

U ovom poglavlju date su osnovne informacije o asinhronoj mašini. U tom cilju, najprije su detaljno analizirane njene konstrukcijske karakteristike. Nakon toga, opisan je njen princip rada. Osim toga, opisane su i prikazane mehaničke karakteristike asinhronne mašine, kao i ekvivalentne zamjenske šeme njena dva modela na kojima se bazira ovaj rad-jednokavezni i dvokavezni model asinhronne mašine.

1.1 Konstrukcione karakteristike

Kao i svaka obrtna električna mašina, asinhrona mašina sastoji se od rotora i statora. Između njih nalazi se vazdušni prorez, najčešće debljine 0.2 do 3mm. Primarni i sekundarni namotaji postavljeni su u uniformne proreze koji su utisnuti u tankim silicijumskim čeličnim limovima. Namotaji rotora mogu biti višefazni (namotani rotori) ili mogu biti napravljeni od šipki koje su kratko spojene na krajevima sa krajnjim prstenovima (kavezni rotori). Veće vrijednosti vazdušnog procjepa odgovaraju asinhronim mašinama veće snage (više od 1 MW). Sekundarni namotaji mogu biti kratko spojeni ili povezani na izvor naizmjeničnog napona i frekvencije.

Glavni djelovi AM su:

- magnetno jezgro statora sa žljebovima,
- električni namotaj statora,
- magnetno jezgro rotora sa žljebovima,
- električni namotaj rotora,
- osovina rotora,
- okvir statora sa ležajevima,
- sistem za hlađenje i
- priključna kutija.

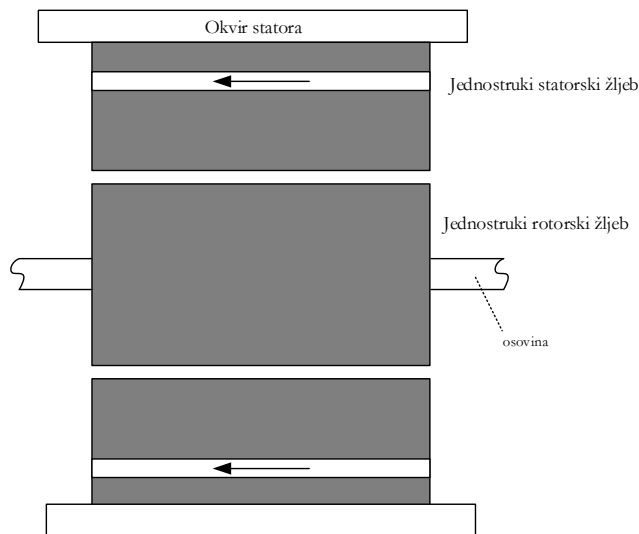
Asinhrona mašine se mogu klasifikovati prema više kriterijuma, u zavisnosti od načina rada i konstrukcionih osobina. Jedan od osnovnih kriterijuma jeste vrsta kretanja koje ostvaruju, pa se tako razlikuju mašine sa rotacionim kretanjem, koje su najzastupljenije u industrijskim pogonima, i mašine sa linearnim kretanjem, koje se koriste u specijalizovanim aplikacijama gdje je poželjno ostvariti translatorno kretanje bez mehaničke konverzije.

Drugi kriterijum odnosi se na vrstu napajanja. U ovoj grupi razlikuju se asinhrona mašine napajane trofaznim sistemom, koje se najčešće primjenjuju u industriji zbog visokog stepena efikasnosti i jednostavnosti korišćenja, kao i jednofazne asinhrona mašine, koje nalaze primjenu u kućnim uređajima i manjim pogonima gdje trofazno napajanje nije dostupno.

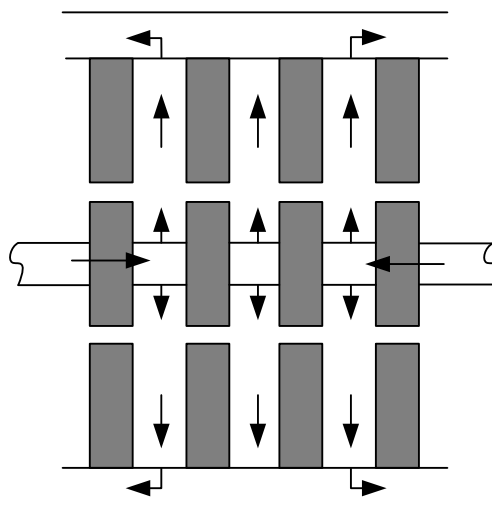
Konačno, značajna podjela odnosi se na konstrukciju rotora. U zavisnosti od načina izvedbe, rotor može biti namotani, kod kojeg su provodnici postavljeni u žljebove i izvedeni na klizne prstenove, ili kavezni, koji ima kratkospojane štapove postavljene u žljebove rotora. Kavezne mašine dominiraju u praksi zbog jednostavne izrade, pouzdanosti i malog zahtjeva za održavanjem, dok se namotane mašine koriste u situacijama gdje je potrebno ostvariti specifične karakteristike pokretanja ili regulacije.

1.1.1 Magnetsko jezgro mašine

Magnetno jezgro statora i rotora izrađuje se od tankih slojeva silicijumskog čelika u obliku limova. Limovi se slažu, pri čemu se između limova postavlja izolacija. Ovakvo lameliranje se vrši kako bi se smanjili gubici usled histerezisa i vrtložnih struja. Lamelle statora i rotora mogu biti složene u jedan jedinstveni paket (slika 1.1.1) ili u više paketa (slika 1.1.2). U ovom drugom slučaju između pojedinačnih paketa (dužine 50 do 150 mm) postoje radijalni kanali širine 5–15 mm, koji služe za radijalno hlađenje (ventilaciju). Jedinstveni (jedan) paket je pogodan za aksijalnu ventilaciju.



Slika 1.1.1 Magnetno jezgro sa jednim paketom lamela.



Slika 1.1.2 Magnetno jezgro sa više paketa lamela.

Asinhronne mašine sa jednim paketom jezgra (single-stack IM) tradicionalno su se koristile za snage ispod 100 kW, ali su u posljednje vrijeme uvedene i u opsegu do 2 MW, zahvaljujući značajnom unapređenju aksijalne ventilacije. Koncept višestrukih paketa jezgra (multistack) neophodan je za velike snage (momente) i duge pakete jezgra.

Primjena više paketa dovodi do dodatnih gubitaka u namotajima, i do 10%, u statoru i u rotoru, jer se namotaj (štapovi) provode kroz radialne kanale, a da pri tom ne proizvode obrtni moment. Pored toga, elektromagnetna energija polja nastala usljed struja u namotaju (štapovima) u tim kanalima manifestuje se kao dodatne rasipne induktivnosti, koje teže da

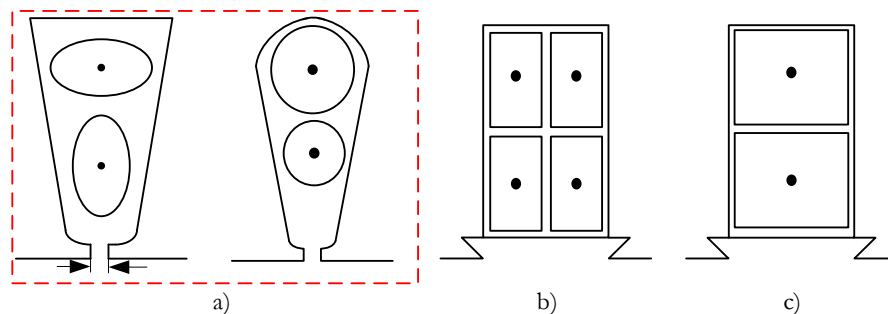
smanje kritični (prelomni) moment i faktor snage. Takođe dolazi i do smanjenja polazne struje i polaznog momenta.

1.1.2 Geometrija žljebova

Vazdušni razmak odnosno prostor između statora i rotora kroz koji putuje magnetno polje koje proizvodi stator indukuje napon kroz namotaje rotora, odnosno kroz namotaje rotora će proteći struja. Magnetizacija vazduha zahtijeva velike magnetomotorne sile (MMS). Stoga što je manji vazdušni (nemagnetni) prostor, to je manja magnetizacija neophodna (MMS).

Geometrija žljebova zavisi uglavnom od nivoa snage AM, ali i od vrste magnetne žice (okruglog ili pravougaonog poprečnog presjeka) od koje su napravljeni namotaji. Kod okruglog namotaja žice AM male snage (ispod 100 kW), namotaji se mogu uvesti u žljebove žicu po žicu, pa prema tome otvori žljeba mogu biti mali (slika 1.1.3 a). Za prethodno oblikovane žljebove (u velikim AM), pravougaonog poprečnog presjeka, koriste se otvoreni ili poluotvoreni žljebovi (slika 1.1.3 b i 1.1.3 c).

Generalno žljebovi mogu biti pravougaoni, ravno ili zaobljeno trapezoidni. Otvoreni i poluotvoreni žljebovi imaju tendenciju da budu pravougaonog oblika (slika 1.1.3 b i 1.1.3 c), a poluzatvoreni su trapezoidnog oblika ili oblika zaobljenog trapeza (slika 1.1.3 a).

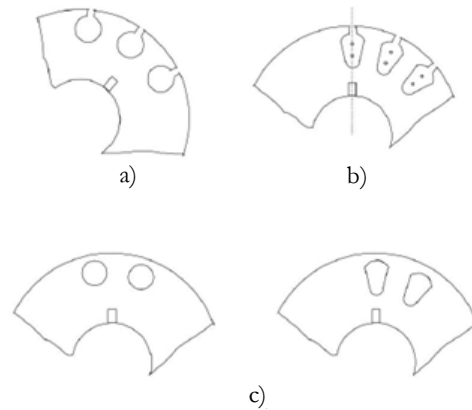


Slika 1.1.3 Geometrija žljeba za lociranje namotaja a) poluzatvoreni b) poluotvoreni c) otvoreni

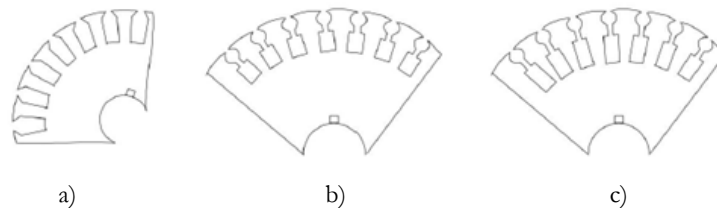
Žljebovi prikazani na prethodnoj slici se koriste za namotaje statora i rotora. Za kavezne rotore oblik žljebova je raznovrsniji i zavisi od više faktora:

- ograničenja startovanja i nazivnog opterećenja,
- vrste upravljanja: upravljanje sa konstantnim odnosom napon/frekvencija (U/f) ili promjenljivi odnos napona i frekvencije,
- raspona obrtnog momenta.

Za motore manjih snaga, pri konstantnom ili promjenljivom odnosu U/f , AM visoke efikasnosti mogu koristiti okrugle poluzatvorene proreze (slika 1.1.4 a) i oni su tipični za moment manji od nominalnog. Zaobljeni trapezni prorezi tipični su za srednji početni moment (oko nominalne vrijednosti) u mašinama male snage (slika 1.1.4 b). Zatvoreni prorezi rotora mogu se koristiti za smanjenje buke i pulsiranja obrtnog momenta za cirkulacione pumpe fluida male snage, kod kojih je izražen manji moment kvara.



Slika 1.1.4 Žljebovi rotora za kavezne rotore a) poluzatvoreni i okrugli b) poluzatvoreni i okrugli trapezni c) zatvoreni žljebovi.



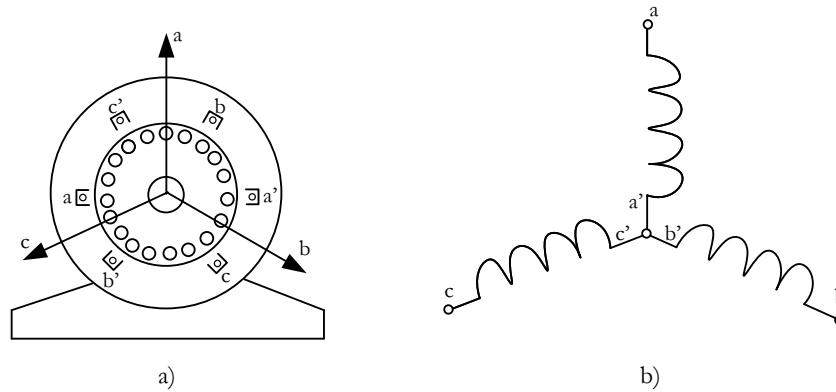
Slika 1.1.5 Žljebovi rotora za AM niske startne struje a) veliko klizanje, veliki startni moment b) umjeren startni moment c) veoma visok startni moment.

Za veliki startni moment i visoko nominalno klizanje (manja nazivna brzina u odnosu na idealnu brzinu praznog hoda), koriste se žljebovi rotora u obliku pravougaone šipke (slika 1.1.5 a). Inverzni trapezni ili dvostruki kavezni žljebovi se koriste za nisku startnu struju i srednji i veliki startni moment (slika 1.1.5 b i c).

1.1.3 Namotaji asinhronne mašine

Na statoru asinhronne mašine nalazi se trofazni distribuirani namotaj. Zavisno od tipa, na rotoru se može nalaziti isti namotaj (mašina sa namotanim rotorom) ili provodne šipke

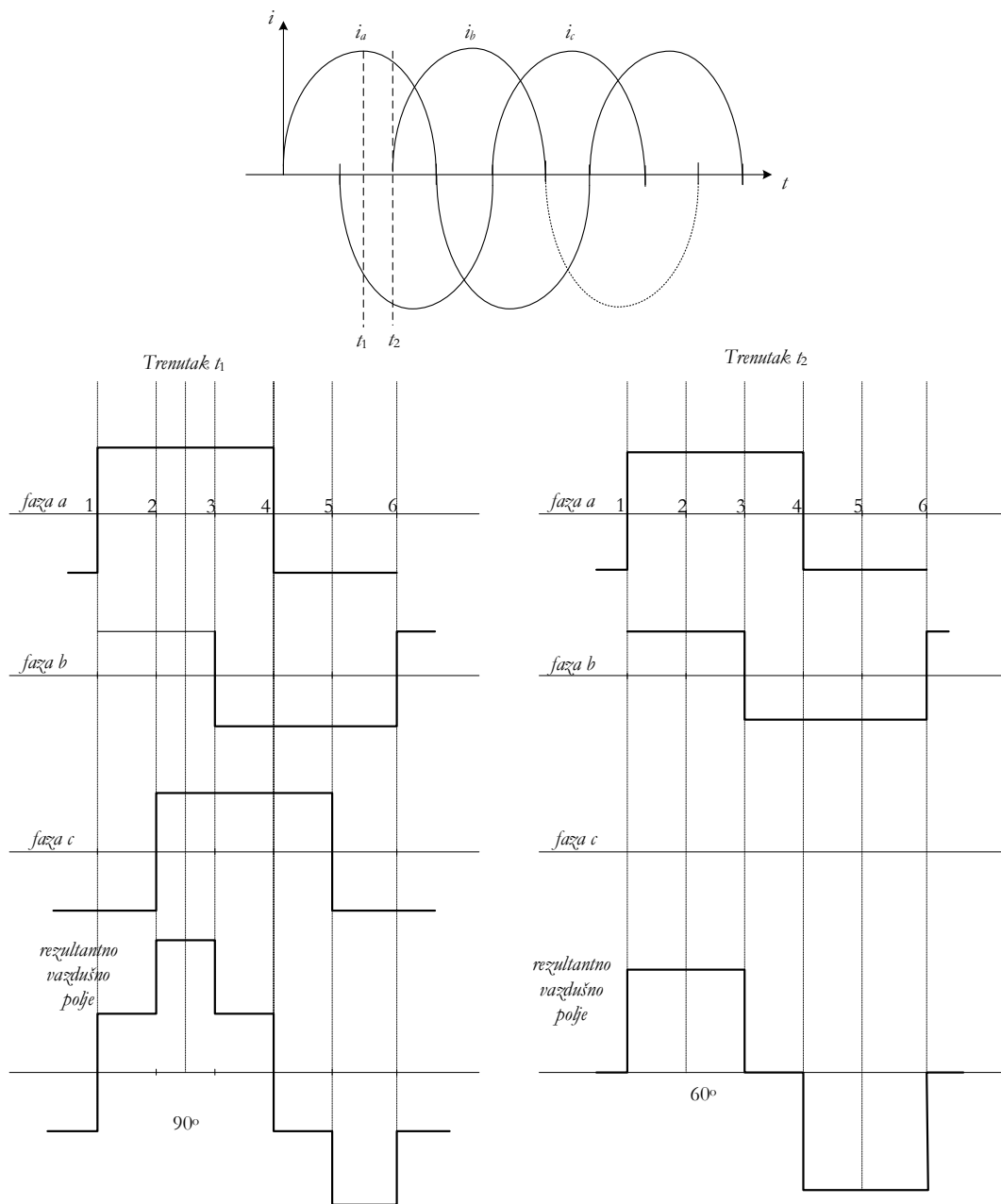
koje su kratkospojene na krajevima-tada je riječ o kaveznoj AM. U cilju ilustracije, na slici 1.1.6 prikazan je trofazni namotaj statora sa 6 žljebova i 2 pola.



Slika 1.1.6 Ilustracija trofaznog namotaja statora asinhronne mašine.

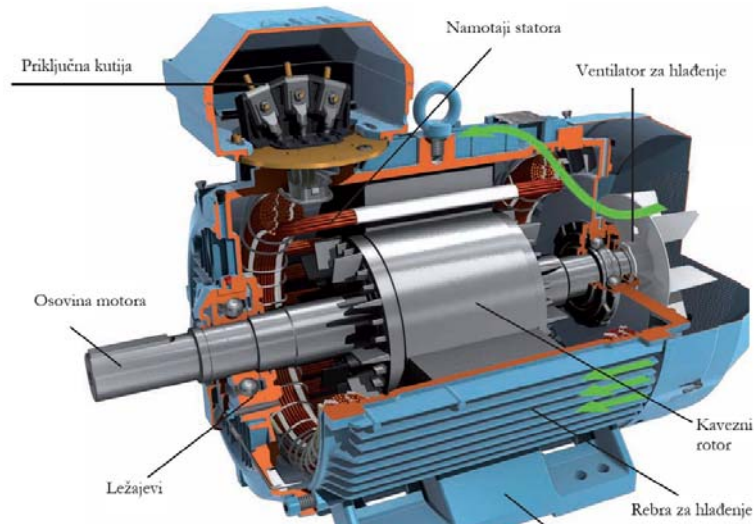
Kao što je i ranije pomenuto, asinhrona mašina ima tri faze. Svaka faza je napravljena od jednog namotaja, čiji korak obuhvata polovinu periferije rotora. Faze su međusobno pomjerene za 120° . Kod AM koja je razmatrana na prethodnoj slici, između faznih osa postoji 120° mehaničkih stepeni i $p=1$ pari polova. Uopšteno, pomak između faza iznosi $120^\circ/p$ mehaničkih stepeni. Elektromagnetno polje koje stvara svaka faza u vazдушnom procjepu ima svoj maksimum u sredini faznog namotaja (slika 1.1.6). Elektromagnetno polje ima pravougaonu prostornu raspodjelu, kao što je i prikazano na slici 1.1.7.

Kada se kroz prostorno pomjerene namotaje propuste struje koje su vremenski pomjerene za $2\pi/3$ stvara se Teslino obrtno polje u vazдушnom procjepu. Smjer tog polja je od faze **a** do faze **b**, ako struja u fazi **a** prednjači (u vremenu) struji u fazi **b**, a faza **b** prednjači fazi **c**. Ugaona brzina ovog polja je ustvari sinhrona brzina ω_s , u električnom smislu, ili ω_s/p u mehaničkom smislu.



Slika 1.1.7 Struje statora i polje vazdušnog procjepa u trenucima t_1 i t_2 .

Na slici 1.1.8 prikazan je poprečni presjek jednog asinhronog motora. Namotaji statora prikazani mogu biti povezani u zvijezdu ili trougao. Ponekad, tokom pokretanja, veza se menja sa zvijezde na trougao (u slučaju kada su asinhronne mašine dizajnirane za trougao) kako bi se smanjile početne struje u slabim lokalnim elektroenergetskim mrežama.



Slika 1.1.8 Poprečni presjek asinhronog motora.

[https://www.keep.ftn.uns.ac.rs/elektricne-masine-2/wp-content/uploads/sites/238/2018/03/EM_AM1.pdf]

1.2 Princip rada asinhronne mašine

Princip rada asinhronne mašine zasnovan je na fenomenu elektromagnetne indukcije. Asinhrona mašina je višefazna naizmjenična mašina koja je povezana na naizmjeničnu mrežu napajanja. Izvor napajanja je uglavnom trofazni, ali može biti i jednofazni. Raspored namotaja u dijelu mašine koji je spojen na mrežu (obično stator) treba da proizvede elektromagnetno polje koje putuje u vazдушnom prostoru između statora i rotora. Upravo ovo kretanje polja izazvaće napone na sekundaru, odnosno u provodnicima na dijelu mašine koji nije povezan na mrežu-rotor. Ako su namotaji na rotoru zatvoreni, tj. kratkospojeni, kroz namotaj će proteći struja. Interakcijom između primarnog elektromagnetnog polja i sekundarnih struja rotora nastaje moment, što za posledicu ima rotaciju rotora [41, 42].

Obrtni moment koji generiše asinhrona mašina je direktno proporcionalan proizvodu struje rotora i fluksa rotora. Dakle, upravljanje obrtnim momentom shodno konkretnim zahtjevima u praktičnoj primjeni postiže se odgovarajućim upravljanjem struje rotora. Takođe, performanse i efikasnost samog motora zavise od namotaja statora i rotora. Preciznije, namotaji imaju za ulogu da optimizuju distribuciju magnetnog polja unutar motora. Takođe, ključnu ulogu u performansama mašine igra i materijal od kojeg su napravljeni jezgro statora i rotora.

Takođe, važnu ulogu ima i sistem hlađenja koji se koristi u asinhronom motoru. Naime, motor u toku svog rada generiše toplotu, koju ovaj sistem odvodi. Metode hlađenja koje se koriste su: vazdušno hlađenje, hlađenje vodom i hlađenje uljem. Tip rashladnog sistema koji se koristi zavisi od specifičnih zahtjeva primjene i okruženja u kome se motor koristi.

Sumarno, princip rada AM zasniva se na fenomenu elektromagnetne indukcije. Rotirajuće elektromagnetno polje koje generiše stator, uzrokuje da se rotor rotira. Ključnu ulogu u performansama mašine igraju: oblik (dizajn) namotaja rotora i statora i sistem za odvođenje toplote tj. sistem za hlađenje.

1.3 Mehaničke karakteristike asinhronne mašine

U cilju razmatranja mehaničkih karakteristika asinhronne mašine, neophodno je definisati klizanje. Klizanje predstavlja razliku između brzine obrtnog magnetnog polja i brzine rotora i definiše se shodno sljedećoj formuli [41]:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} = 1 - \frac{n_r}{n_s}, \quad (1.1)$$

gdje su:

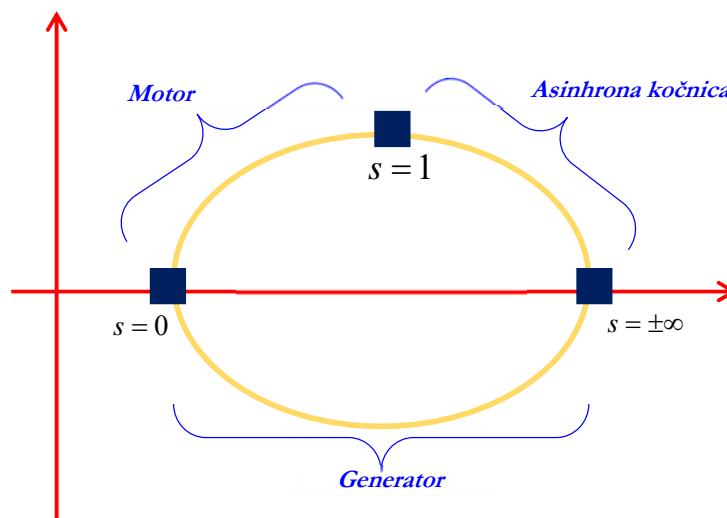
n_r – brzina obrtanja rotora,

n_s – brzina obrtnog polja (sinhrona brzina).

U zavisnosti od klizanja postoje tri režima rada AM. To su:

- motorni režim rada,
- generatorski režim rada i
- režim rada asinhronne kočnice.

U motornom režimu rada, brzina obrtanja rotora je manja od brzine obrtnog polja statora. Kod generatorskog režima rada brzina rotora je veća od brzine obrtnog polja statora, dok u režimu asinhronne kočnice smjer obrtanja rotora je suprotnog smjera od brzine obrtnog polja statora. Grafički prikaz rada asinhronne mašine u odnosu na vrijednost klizanja s dat je na slici 1.3.1.



Slika 1.3.1 Grafička ilustracija režima rada asinhronne mašine.

Mehanička karakteristika mašine predstavlja zavisnost električnog momenta motora od brzine obrtanja ili od klizanja. Električni moment asinhronne mašine dobija se kao odnos snage konverzije P_c i brzine rotora ω_r :

$$M_e = \frac{P_c}{\omega_r}. \quad (1.2)$$

Kada se zanemare mehanički gubici, snaga konverzije iznosi:

$$P_c = P_{ob} - P_{cur} = P_{ob} - sP_{ob} = (1-s)P_{ob}. \quad (1.3)$$

Zamjenom prethodnog izraza u originalni izraz za moment, dobija se sljedeća jednakost:

$$M_e = \frac{P_{ob}(1-s)}{\omega_s(1-s)} = \frac{P_{ob}}{\omega_s}. \quad (1.4)$$

Na osnovu definicije klizanja, brzina rotora se može izraziti na sljedeći način:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \Rightarrow \omega_r = (1-s)\omega_s, \quad (1.5)$$

dok se snaga obrtnog magnetnog polja može izraziti sljedećim izrazom:

$$P_{ob} = \frac{P_{cur}}{s} = 3 \frac{1}{s} R_2' I_r'^2. \quad (1.6)$$

Uzimajući u obzir prethodno prikazani izraz za snagu obrtnog polja, moment se sada može zapisati kao:

$$M_e = \frac{P_{ob}}{\omega_s} = \frac{3R_2' I_r'^2}{s \cdot \omega_s}. \quad (1.7)$$

Dalje, struja rotora asinhronog motora data je sljedećim izrazom:

$$I_r'^2 = \frac{E_T^2}{\left(\frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_2')^2}, \quad (1.8)$$

pa se moment može zapisati kao:

$$M_e = \frac{3E_T^2}{\omega_s} \frac{\left(\frac{R_2'}{s}\right)}{\left(\frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_2')^2}. \quad (1.9)$$

Osim prethodno izvedenog izraza, u cilju definisanja zavisnosti između momenta i klizanja na linearnom dijelu mehaničke karakteristike motora veoma često se koristi i Klovsov obrazac:

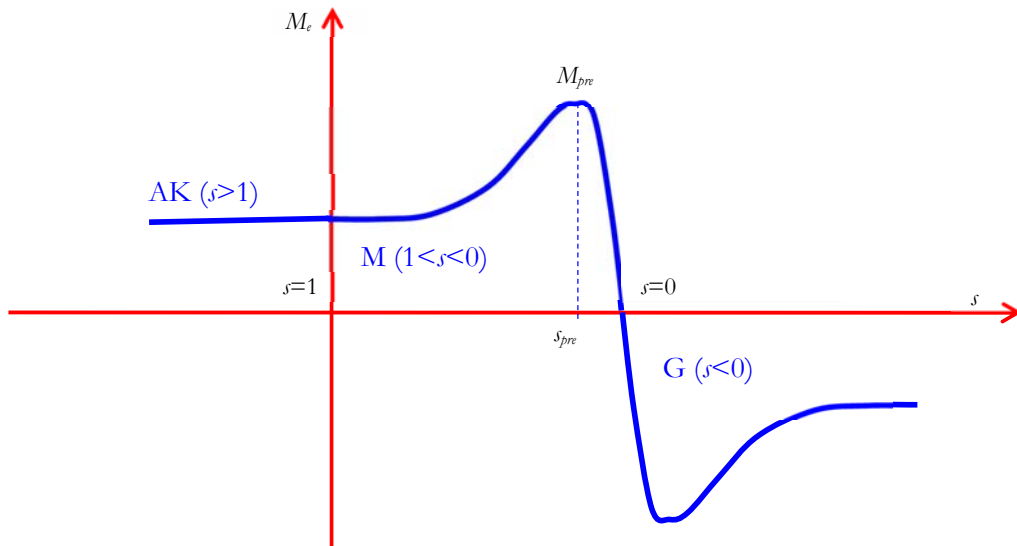
$$M_e = M_{pre} \frac{2}{\frac{s}{s_{pre}} + \frac{s_{pre}}{s}}. \quad (1.10)$$

U prethodnoj relaciji figurišu prevalni moment M_{pre} i prevalno klizanje s_{pre} , koje se može izračunati koristeći sljedeći izraz:

$$s_{pre} = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}. \quad (1.11)$$

Tipična mehanička karakteristika asinhronog motora, tj. zavisnost momenta od klizanja, ilustrovana je na slici 1.3.2. U prvom kvadrantu, snaga je pozitivna što znači da je režim rada asinhrona mašine motorni. Iznad sinhrono brzine, momenti, klizanje i snaga su

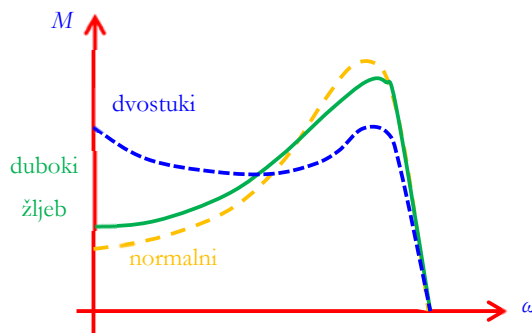
negativni, pa mašina radi u generatorskom režimu. Na kraju, kod “negativnih“ brzina mašina radi u kočionom režimu rada.



Slika 1.3.2 Moment-klizanje karakteristika asinhronne mašine.

Međutim, mehanička karakteristika asinhronog motora može odstupati od tipične, i to u sljedećim slučajevima:

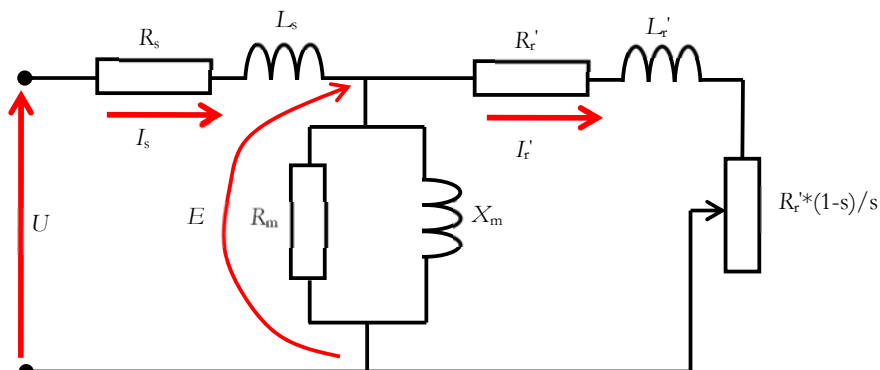
- Kod malih motora uticaj statorske otpornosti neophodno je uzeti u obzir. Ukoliko se desi da su učestanosti napajanja statorskog namotaja veoma niske u odnosu na nominalnu učestanost, uticaj statorske otpornosti može biti značajan.
- Polazni moment je veći od maksimalnog momenta kada je mašina izrađena sa dvostrukim žljebovima i to je prikazano na slici 1.3.3.



Slika 1.3.3 Mehaničke karakteristike motora sa dvostrukim, dubokim i normalnim žljebom.

1.4 Ekvivalentne zamjenske šeme asinhronne mašine

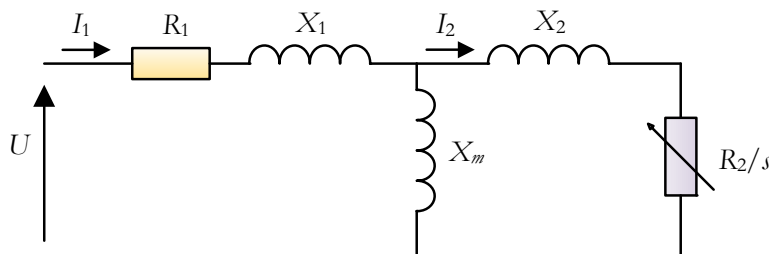
Rad asinhronne mašine može se predstaviti koristeći njenu ekvivalentnu zamjensku šemu. Najčešće korišćena zamjenska šema asinhronne mašine, izvedena na bazi analogije sa dvonamotajnim transformatorom, data je na slici 1.4.1 [41]. Parametri su označeni na sljedeći način: U predstavlja efektivnu vrijednost faznog napona statora, E predstavlja elektromotornu silu, tj. napon mjeran između kliznih prstenova rotora, I_s je struja po fazi statora, I_r je struja po fazi rotora (svedena na stator), R_s je označena otpornost po fazi statora, L_s je induktivnost rasipanja po fazi statora, R_r' označava otpornost po fazi rotora, L_r' predstavlja induktivnost rasipanja po fazi rotora (svedena na stator), R_m i L_m su otpornost i induktivnost magnećenja, dok je s klizanje.



Slika 1.4.1 Najčešće korišćena zamjenska šema asinhronne mašine.

U dostupnoj literaturi prisutan je veliki broj naučnih radova koji se bave estimacijom parametara zamjenskih šema asinhronne mašine. Pri tome, autori dominantno koriste dva modela-jednokavezni (SCM-*Single Cage Model*) i dvokavezni (DCM-*Double Cage Model*).

Zamjenska šema jednokaveznog modela asinhronne mašine vrlo je slična onoj sa slike 1.4.1. Odgovarajuće ekvivalentno kolo prikazano je na slici 1.4.2.



Slika 1.4.2 Ekvivalentna šema jednokaveznog modela asinhronne mašine.

Na prethodno prikazanoj slici, R_1 , R_2 , X_1 , X_2 , i X_m predstavljaju otpor statora, otpor rotora sveden na stranu statora, reaktansu rasipanja statora, reaktansu rasipanja rotora svedena na stranu statora i reaktansu magnećenja, respektivno. Dakle, jednodimenzionalni model asinhronne mašine opisano je sa šest različitih parametara.

Posmatrajući prethodno prikazanu šemu, kompleksna impedansa grane magnećenja i grane rotora računa se na sledeći način:

$$\underline{Z}_p = \frac{1}{jX_m + \frac{1}{\frac{R_2}{s} + jX_2}}, \quad (1.12)$$

dok se kompleksna vrijednost struje statora računa kao:

$$\underline{I}_1(s) = \frac{\underline{U}}{R_1 + jX_1 + \underline{Z}_p(s)}. \quad (1.13)$$

Nakon određivanja struje statora asinhronne mašine, primjenom strujnog djelitelja može se odrediti i struja rotora:

$$\underline{I}_2(s) = \frac{\underline{Z}_p(s) \cdot \underline{I}_1(s)}{\frac{R_2}{s} + jX_2}. \quad (1.14)$$

Moment mašine je moguće izračunati koristeći sljedeći izraz:

$$M(s) = \frac{3p}{\omega_s} (I_2(s))^2 \frac{R_2}{s}. \quad (1.15)$$

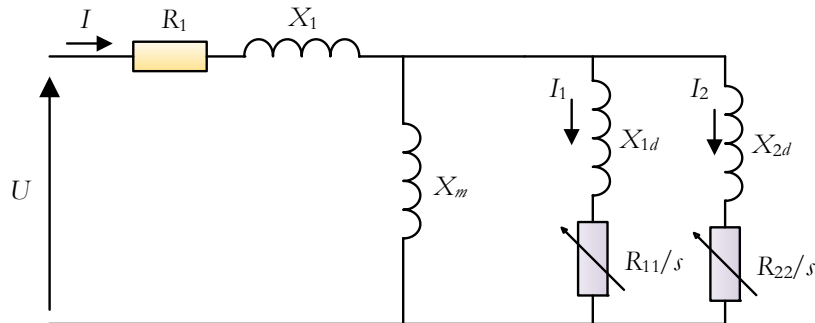
Polazni moment se određuje ako se u prethodnoj jednačini uvrsti jedinična vrijednost klizanja, tj. $s=1$. Maksimalna vrijednost momenta se određuje diferenciranjem prethodno izvedenog izraza, tj. momenta, po klizanju. U tom slučaju, prevalna vrijednost klizanja ima vrijednost:

$$s_{pre} = \frac{R_2}{\sqrt{R_T^2 + (X_T + X_2)^2}}, \quad (1.16)$$

gdje je Teveninova impedansa kompletnog kola definisana na sljedeći način:

$$\underline{Z}_T = R_T + jX_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1 + jX_1} + \frac{1}{jX_m}}. \quad (1.17)$$

U stacionarnom režimu rada dvokavezna asinhrona mašina može se opisati ekvivalentnim kolom prikazanim na slici 1.4.3. Ovaj model obuhvata ukupno sedam parametara. Parametri R_1 i X_1 odnose se na statorsku stranu, dok parametri $R_{11}-X_{1d}$ i $R_{22}-X_{2d}$ predstavljaju električne karakteristike dva rotorska kaveza — prvi kavez je određen parom R_{11} i X_{1d} , a drugi parom R_{22} i X_{2d} . Reaktansa magnetizacije, koja opisuje tok magnetnog fluksa u mašini, označena je simbolom X_m .



Slika 1.4.3 Ekvivalentna šema dvokaveznog modela asinhronog motora.

Ulazna struja asinhronog motora, izračunata na bazi prethodno prikazanog ekvivalentnog kola, data je sljedećim izrazom:

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{R_1 + jX_1 + \underline{Z}_p}, \quad (1.18)$$

gdje je U fazna vrijednost ulaznog napona, a Z_p kompleksna ekvivalentna impedansa paralelnih grana — reaktansa magnetizacije i dva rotorska kaveza:

$$\underline{Z}_p = \frac{1}{(1/jX_m) + (1/(R_{11}/s + jX_{1d})) + (1/(R_{22}/s + jX_{2d}))}. \quad (1.19)$$

Dalje, moment motora se računa na sljedeći način:

$$M(s) = \frac{3p}{\omega_s} \left([I_1(s)]^2 \frac{R_{11}}{s} + [I_2(s)]^2 \frac{R_{22}}{s} \right), \quad (1.20)$$

pri čemu je struje I_1 i I_2 moguće dobiti korišćenjem sljedećih izraza:

$$I_1(s) = \frac{Z_p I(s)}{\frac{R_{11}}{s} + jX_{1d}}; I_2(s) = \frac{Z_p I(s)}{\frac{R_{22}}{s} + jX_{2d}}. \quad (1.21)$$

Kao i kod jednokaveznog modela mašine, polazna vrijednost momenta se računa ako se uzme da je $s=1$, a pri punom opterećenju $s=s_{fl}$. Vrijednost prevalnog klizanja s_{pre} se dobija rješavanjem uslova $dM(s)/ds=0$.

Prethodno opisani modeli asinhronne mašine predstavljaju osnovu za istraživanje sprovedeno u ovoj tezi. Naime, glavni cilj ove teze je estimacija parametara ekvivalentnih električnih kola jednokaveznog i dvokaveznog modela asinhronne mašine. Preciznije, kod jednokaveznog modela cilj je estimirati set parametara- $\{R_1, R_2, X_1, X_2, X_m\}$, dok je kod dvokaveznog modela cilj estimacija pomenutih sedam parametara koji opisuju odgovarajuću zamjensku šemu- $\{R_1, X_1, R_{11}, R_{22}, X_{1d}, X_{2d}, X_m\}$.

Poglavlje 2

Metaheuristički algoritmi

U ovom poglavlju dat je kratak pregled osnovnih pojmova optimizacije i metaheurističkih algoritama, kao metodološke osnove za dalji dio rada. Poseban akcenat stavlja se na ulogu metaheurističkih pristupa u rješavanju nelinearnih optimizacionih problema, kao što je estimacija parametara zamjenskih šema asinhronne mašine. Nakon uvodnih definicija i klasifikacija, razmatraju se konkretni metaheuristički algoritmi primijenjeni u ovom radu, kao i njihove hibridne modifikacije.

2.1 Osnovni pojmovi optimizacije i metaheurističkih algoritama

U najopštijem smislu, optimizacija se bavi pronalaženjem „najboljeg“ rješenja nekog problema u odnosu na zadani kriterijum. Neka je S skup svih dozvoljenih rješenja, a funkcija $f: S \rightarrow \mathbb{R}$ je kriterijumska funkcija koja svakom rješenju pridružuje realnu vrijednost koja opisuje njegov kvalitet. Ako se problem posmatra kao zadatak minimizacije kriterijumske funkcije, cilj je pronaći rješenje $s \in S$ za koje nijedno drugo dozvoljeno rješenje ne daje manju vrijednost funkcije f . U praksi se rješenja obično zapisuju kao vektor optimizacionih varijabli $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_N]$, pri čemu su svakoj komponenti pridružene donje i gornje granice x_i^L i x_i^U [43].

Metode optimizacije mogu se grubo podijeliti na egzaktne i približne. Egzaktne metode (npr. dinamičko programiranje, različite varijante matematičkog programiranja, *Branch-and-Bound*) teže ka tome da, uz dovoljno resursa, garantuju nalaženje globalno optimalnog rješenja. Međutim, u složenim, nelinearnim i višedimenzionim problemima, njihova računaska složenost često postaje neprihvatljivo velika. Zbog toga se u inženjerskoj praksi sve češće primjenjuju približne metode, čiji je cilj da za prihvatljivo vrijeme pronađu rješenja koja su dovoljno blizu optimuma, bez formalne garancije globalne optimalnosti. U ovu grupu spadaju heuristički i metaheuristički algoritmi [43].

Metaheuristički algoritmi su koncipirani tako da budu što univerzalniji: ista algoritamska struktura može se primijeniti na različite optimizacione probleme, uz odgovarajuću definiciju načina predstavljanja rješenja i kriterijumske funkcije. Zajedničke karakteristike

većine metaheurističkih pristupa mogu se sumirati kroz nekoliko ključnih elemenata. Prvi od njih je način predstavljanja rješenja-binarni niz (0 ili 1), vector cijelih ili vector realnih brojeva. Drugi element, ujedno i najvažniji, jeste izbor kriterijumske funkcije, odnosno funkcije cilja. Ova funkcija svakom potencijalnom rješenju dodjeljuje numeričku vrijednost, koja oslikava “kvalitet” toga rješenja, i usmjerava pretragu ka boljim rješenjima [43].

Metaheuristike se mogu klasifikovati prema više kriterijuma. Jedna od čestih podjela zasniva se na broju rješenja koja algoritam istovremeno obrađuje. Tako se razlikuju algoritmi zasnovani na jednom rješenju (S-metaheuristike), gdje se u svakoj iteraciji transformiše jedno trenutno rješenje (npr. lokalna pretraga, simulirano kaljenje), i algoritmi zasnovani na populaciji rješenja (P-metaheuristike), u kojima se istovremeno obrađuje više kandidata (evolucioni algoritmi, algoritmi rojeva i brojni savremeni optimizacioni pristupi). P-metaheuristike su posebno atraktivne za složene, višedimenzione probleme, jer zahvaljujući populacionoj prirodi pretrage bolje balansiraju istraživanje prostora rješenja i eksploataciju već pronađenih dobrih regiona [43].

Zbog svoje robusnosti, neosjetljivosti na oblik kriterijumske funkcije i mogućnosti primjene u problemima sa više lokalnih minima i nelinearnim ograničenjima, metaheuristički algoritmi su se pokazali izuzetno pogodnim za rješavanje problema estimacije parametara električnih mašina. Upravo iz tih razloga u ovom radu se za optimizaciju parametara jednokaveznog i dvokaveznog modela asinhronne mašine koriste savremeni metaheuristički algoritmi i njihove hibridne modifikacije, opisane u narednom potpoglavlju.

2.2 Metaheuristički algoritmi korišćeni u radu

U okviru ove teze prikazane su hibridne i modifikovane verzije osnovnih metaheurističkih algoritama, s ciljem poboljšanja njihovih performansi, ubrzanja procesa konvergencije i postizanja kvalitetnijih rješenja.

2.2.1 Osnovni metaheuristički algoritmi korišćeni u radu

Preciznije, u ovom radu kao osnovni algoritmi korišćeni su algoritmi optimizator ekvilibrijuma/ravnoteže (*equilibrium optimizer*) [44] i algoritam medojeda (*honey badger*) [45]. Uzimajući algoritam medojeda kao osnovni algoritam, biće prikazane odgovarajuće hibridne modifikacije ovog algoritma.

2.2.1.1 Optimizator ekvilibrijuma (Equilibrium Optimizer – EO)

Algoritam za optimizaciju ravnoteže zasniva se na jednačini mase ravnoteže koja se koristi u fizici i hemiji. Matematičko značenje ove jednačine je zapravo fizički proces očuvanja mase koja ulazi, izlazi i stvara se u kontrolnoj zapremini. Promjena mase u kontrolnoj zapremini jednaka je razlici između mase koja ulazi u sistem i mase koja izlazi iz njega. Ukupna ulazna masa sastoji se od mase koja ulazi u sistem i mase koja se stvara unutar njega, dok izlazna masa predstavlja količinu mase koja napušta sistem. Ovaj proces je opisan sledećom diferencijalnom jednačinom prvog reda [43]:

$$V \frac{dC}{dt} = QC_{eq} - QC + G, \quad (2.1)$$

gdje V predstavlja zapreminu sistema, C je koncentracija u toj zapremini, član $V(dC/dt)$ predstavlja stepen promjene mase unutar date zapremine, Q je zapreminski protok, G je brzina generisanja mase unutar data zapremine i C_{eq} predstavlja koncentraciju ekvilibrijuma (ravnotežnog stanja), odnosno onu koncentraciju pri kojoj nema generisanja mase unutar zapremine V . Rješenje prethodno date diferencijalne jednačine je koncentracije $C(t)$ izražena na sljedeći način:

$$C(t) = C_{eq} + (C_0 - C_{eq})F + \frac{G}{\lambda V}(1 - F), \quad (2.2)$$
$$F = e^{-\lambda(t-t_0)}, \quad \lambda = \frac{Q}{V},$$

pri čemu C_0 predstavlja početnu koncentraciju u trenutku t_0 , F predstavlja eksponencijalni faktor, dok λ označava stopu preokreta.

U cilju adaptacije opisanog pristupa na rješavanje konkretnog matematičkog problema optimizacije, treba uzeti u obzir sljedeće:

- rješenje je vektor koji se sastoji od m optimizacionih varijabli, pri čemu tada m predstavlja dimenziju optimizacionog problema.
- koncentracija \mathbf{C} (matematički predstavljena kao vektor), je potencijalno rješenje optimizacionog problema.
- algoritam ima populaciju od n čestica i svaka je predstavljena svojom koncentracijom [43].

Stoga, prvi korak je inicijalizacija početne populacije:

$$\mathbf{C}_i^{(0)} = \mathbf{LB} + \mathbf{rand}_i \cdot (\mathbf{UB} - \mathbf{LB}), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (2.3)$$

u ovoj formulaciji \mathbf{LB} i \mathbf{UB} označavaju minimalne i maksimalne vrijednosti za svaku optimizacionu varijablu, dok \mathbf{rand} označava vektor od m nasumično generisanih brojeva između 0 i 1 [43].

Iterativna procedura se sprovodi tako što se koncentracija svake čestice ažurira na sljedeći način:

$$\mathbf{C}_i(it) = \mathbf{C}_{eq} + (\mathbf{C}_i(it-1) - \mathbf{C}_{eq}) \cdot \mathbf{F} + \frac{\mathbf{G}}{\lambda} (1 - \mathbf{F}). \quad (2.4)$$

U prethodnoj formuli, it predstavlja trenutnu iteraciju. Navedena formula ima tri krucijalna člana.

- Prvi član \mathbf{C}_{eq} označava koncentraciju ekvilibrijuma i bira se iz skupa koji čine 4 najbolje čestice i njihova aritmetička sredina [43],
- Drugi član predstavlja razliku između koncentracije iz prethodne iteracije i koncentracije ekvilibrijuma; njegova uloga je da omogući proces globalne pretrage kompletnog skupa rješenja. Eksponencijalni član \mathbf{F} definisan je na sljedeći način [43]:

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= e^{-\lambda(t-t_0)}, \\ \mathbf{t} &= \left(1 - \frac{it}{max_it}\right)^{a_2 \frac{it}{max_it}}, \\ \mathbf{t}_0 &= \frac{1}{\lambda} \ln \left[-\mathbf{a}_1 \cdot (1 - e^{-\lambda t}) \cdot \text{sign}(\mathbf{r} - 0.5) \right] + \mathbf{t}, \end{aligned} \quad (2.5)$$

Pri čemu su \mathbf{a}_1 i \mathbf{a}_2 konstante koje regulišu balans između globalne i lokalne pretrage, a \mathbf{r} i λ su vektori slučajnih brojeva između 0 i 1, dok max_it predstavlja predefinisani parametar koji označava maksimalni broj iteracija.

- Treći član, nasuprot drugom, forsira lokalnu pretragu algoritma. Stopa generisanja \mathbf{G} se računa na sljedeći način [43]:

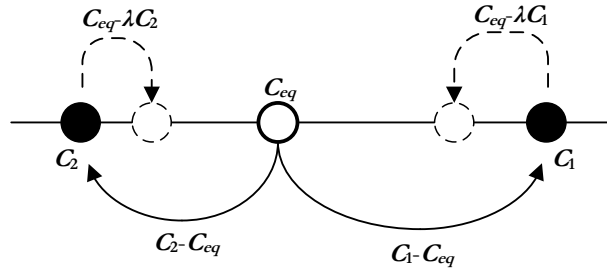
$$\mathbf{G} = \mathbf{G}_{CP} \cdot (\mathbf{C}_{eq} - \lambda \cdot \mathbf{C}(it-1)) \cdot \mathbf{F}, \quad (2.6)$$

pri čemu \mathbf{G}_{CP} predstavlja kontrolni parametar stope generisanja:

$$\mathbf{G}_{CP} = \begin{cases} 0.5 \cdot \mathbf{r}_1, & \mathbf{r}_2 \geq 0.5 \\ 0, & \mathbf{r}_2 < 0.5 \end{cases}, \quad (2.7)$$

gdje su \mathbf{r}_1 i \mathbf{r}_2 vektori nasumičnih brojeva iz opsega [0, 1].

Grafička ilustracija ažuriranja koncentracije jedne čestice data je na slici 2.2.1.



Slika 2.2.1 Grafička ilustracija ažuriranja koncentracije

Opisani iterativni postupak se sprovodi dok se ne postigne unaprijed definisan maksimalni broj iteracija. Nakon završetka posljednje iteracije, ona čestica za koju se vezuje minimalna vrijednost kriterijumske funkcije predstavlja optimalno rješenje problema optimizacije.

2.2.1.2 Algoritam medojeda (Honey Badger Algorithm – HBA)

Algoritam medojeda oponaša medojeda, odnosno njegovo društveno ponašanje prilikom traženja i lociranja izvora hrane [45]. U matematičkom smislu, svaki medojed je predstavljen pozicijom $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}]$, pri čemu je x_i pozicija i -tog medojeda, brojevi od 1 do N predstavljaju veličinu populacije, a D je veličina problema optimizacije (broj varijabli optimizacije). Slično kao i kod prethodno opisanog algoritma, prvi korak je nasumično inicijalizovanje pozicija svih jazavaca između donje i gornje granice svake optimizacione varijable:

$$x_{i,j} = LB_j + rand \cdot (UB_j - LB_j); i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, D. \quad (2.8)$$

U prethodnoj formuli, $rand$ označava nasumičan broj između 0 i 1, LB_j i UB_j su donja i gornja granica j -te optimizacione promjenljive.

U cilju ažuriranja pozicije jazavaca kod HBA algoritma koriste se dvije jednačine, koje matematički opisuju dvije faze-faza kopanja i faza meda. Ove jednačine se iterativno ponavljaju sve dok se ne dostigne maksimalni broj iteracija.

Faza kopanja je matematički predstavljena na sljedeći način:

$$x_{new} = x_{prey} + F \cdot \beta \cdot I \cdot x_{prey} + F \cdot r_3 \cdot \alpha \cdot d_i \cdot \left[\cos(2\pi r_4) \cdot [1 - \cos(2\pi r_5)] \right], \quad (2.9)$$

gdje x_{new} predstavlja ažuriranu poziciju svakog medojeda, x_{prey} označava medojeda sa najnižom vrijednošću kriterijumske funkcije (najbolji medojed), β je sposobnost jazavca da dobije hranu, dok r_3 , r_4 i r_5 predstavljaju nasumične brojeve između 0 i 1. Drugi faktori koji su pomenuti u prethodnoj jednačini definisani su na sljedeći način:

$$I_i = r_2 \cdot \frac{(x_i - x_{i+1})^2}{4\pi(x_{prey} - x_i)^2}; \alpha = e^{-\frac{t}{t_{max}}}; F = \begin{cases} 1, & \text{if } r_6 \leq 0.5 \\ -1, & \text{else} \end{cases}, \quad (2.10)$$

pri čemu I_i predstavlja intenzitet mirisa plijena, S je jačina izvora, d_i je rastojanje između prijena i i jazavca d , a je faktor gustine, t i t_{max} predstavljaju trenutni i maksimalni broj iteracija, a r_2 i r_6 su nasumični brojevi između 0 i 1.

Nakon što se završi faza kopanja, sledeći korak je faza meda i ona se izražava na sljedeći način:

$$\mathbf{x}_{new} = \mathbf{x}_{prey} + F \cdot r_7 \cdot \alpha \cdot \mathbf{d}_i, \quad (2.11)$$

gdje r_7 takođe označava nasumičan broj između 0 i 1.

Dakle, prethodno opisani postupak se iterativno ponavlja dok algoritam ne dostigne unaprijed definisani maksimalni broj iteracija t_{max} . Konačno, nakon završetka posljednje iteracije, rješenje problema optimizacije je medojed sa najnižom vrednošću kriterijumske funkcije.

2.2.2 Hibridne verzije algoritma medojeda

U cilju poboljšanja performansi originalnog metaheurističkog algoritma HBA, tj. ubrzanja konvergencije i dobijanja kvalitetnijeg rješenja, u ovom master radu predložene su hibridne modifikacije pomenutog algoritma.

Na osnovu rezultata prikazanih u [46], postupak spajanja dva metaheuristička algoritma može se organizovati u okviru dvije osnovne grupe hibridnih pristupa: kolaborativne i integrativne strategije. Kod kolaborativne hibridizacije oba algoritma zadržavaju svoj identitet, ali međusobno saraduju, pri čemu se ova klasa dodatno dijeli na timski i relejni pristup. U timskoj kolaborativnoj strategiji oba algoritma rade uporedo, tako da paralelno generišu i

razmjenjuju potencijalna rješenja. Nasuprot tome, relejna kolaborativna hibridizacija podrazumijeva da se algoritmi aktiviraju uzastopno, tj. drugi algoritam preuzima i dalje unapređuje rješenja koja je prethodno generisao prvi. Integrativni pristup je drugačije koncipiran: u tom slučaju jedan algoritam se ne posmatra kao zasebna cjelina, već se određene njegove funkcije (npr. operatori mutacije, lokalne pretrage ili selekcije) ugrađuju unutar drugog algoritma. U ovom radu primijenjen je upravo relejni kolaborativni princip hibridizacije.

Sušтина relejne kolaborativne strategije ogleda se u tome da se algoritmi izvršavaju jedan za drugim, pri čemu prvi algoritam priprema ulazne uslove za rad drugog. Ovakav koncept je posebno interesantan kada je riječ o inicijalizaciji populacije, što je ključna faza u radu svakog metaheurističkog algoritma. Standardni pristup podrazumijeva da se početna populacija formira potpuno nasumično, uz poštovanje donjih i gornjih granica svake optimizacione varijable. Međutim, kvalitet početne populacije ima značajan uticaj na ukupne performanse algoritma; dobro odabrana početna rješenja mogu ubrzati konvergenciju i smanjiti vjerovatnoću zarobljavanja u lokalnim minimumima. Polazeći od toga, u ovom radu su predloženi hibridni metaheuristički algoritmi kod kojih prvi algoritam služi kao „pametni generator“ početne populacije, dok se drugi algoritam koristi kao glavni optimizacioni mehanizam. Drugim riječima, prvi algoritam formira unaprijedenu početnu populaciju, na koju se zatim primjenjuju iterativna ažuriranja definisana matematičkim pravilima rada drugog algoritma, sve dok se ne dobije konačni skup rješenja. Iz tog konačnog skupa, jedinka sa najmanjom vrijednošću kriterijumske funkcije usvaja se kao optimalno rješenje posmatranog optimizacionog problema.

U ovom master radu, kao algoritmi za inicijalizaciju populacije koriste se haotični algoritam [47], algoritam simuliranog kaljenja (*Simulated Annealing* – SA) [48] i algoritam optimizatora ekvilibrijuma [44].

Haotični algoritam služi za generisanje pseudo-slučajnih brojeva pomoću različitih pristupa, poput logističkog, cirkularnog, kubičnog, Gausovog, sinusoidalnog, itd. U ovom radu primjenjeno je logističko mapiranje, shodno sljedećim relacijama [47]:

$$\begin{aligned} y_1 &= \mathbf{rand}, \\ y_{i+1} &= 4 \cdot y_i \cdot (1 - y_i), \end{aligned} \tag{2.12}$$

pri čemu je $i=1, 2, \dots, n$, gdje n predstavlja veličinu populacije-parametar koji postoji kod svih metaheurističkih algoritama.

U ovom radu je predložen hibridni algoritam-haotični algoritam medojeda (C-HBA). Za C-HBA algoritam je karakteristično to što se inicijalizacija populacije sada vrši pomoću sljedeće relacije:

$$x_{i,j} = LB_j + y_{i,j} \cdot (UB_j - LB_j); i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, D. \quad (2.13)$$

Drugi algoritam koji se u ovom radu koristi za inicijalizaciju populacije je algoritam simuliranog kaljenja (SA). Ovaj algoritam je karakterističan po tome jer pripada grupi algoritama koji su bazirani na jednom rješenju, tzv. S-metaheuristikama. Preciznije, u ovom radu je predložen hibridni SA-HBA algoritam, kod kojeg je početna populacija HBA algoritma dobijena primjenom SA algoritma. Pseudokod dat na sljedećoj slici ilustruje proces inicijalizacije populacije HBA algoritma primjenom SA algoritma.

Pseudokod SA algoritma
1: for $i = 1:N$
2: $p_i = LB + rand_i \cdot (UB - LB)$
3: Inicijalizovati parametre SA algoritma: $k=0, c_k=c_0, L_k=L_0$
4: while ($c_k > 0$)
5: for $l = 0:L_k$
6: Generisati rješenje p_l koje je u blizini trenutnog rješenja p_i
7: if ($f(p_l) < f(p_i)$) $p_i = p_l$
8: else Rješenje p_l postaje trenutno rješenje sa vjerovatnoćom koja iznosi $\exp((f(p_l) - f(p_i)) / c_k)$
9: endfor
10: $k = k + 1$
11: Proračunati L_k i c_k
12: endwhile
13: endfor
14: Dobijena je populacija inicijalizovana pomoću SA algoritma

Slika 2.2.2 Pseudokod SA algoritma za inicijalizaciju populacije HBA algoritma

Treći hibridni algoritam koji je predložen u ovom radu je spoj dva već opisana algoritma, optimizator ekvilibrijuma (EO) i algoritma medojeda (HBA). Na taj način je dobijen EO-HBA algoritam, za koji je tipično to da je populacija HBA algoritma inicijalizovana primjenom EO algoritma. Preciznije, najprije se definišu veličina populacije koja mora biti identična za oba algoritma, kao i broj iteracija odvojeno za EO i HBA algoritam. Zatim se EO algoritam izvrši u skladu sa unaprijed zadatim brojem iteracija. Populacija rješenja dobijena nakon završetka EO algoritma predstavlja inicijalnu populaciju algoritma HBA. Nakon toga, iterativno se ponavljaju faza kopanja i faza meda, dok se ne kompletira HBA algoritam shodno već opisanim koracima. Na taj način je dobijen princip funkcionisanja EO-HBA algoritma, a nakon završetka posljednje iteracije HBA algoritma, dobija se optimalno rješenje optimizacionog problema.

Poglavlje 3

Rezultati estimacije parametara asinhronih mašina korišćenih u literaturi

U ovom poglavlju prikazani su rezultati estimacije parametara zamjenskih šema asinhronih mašina dobijeni primjenom hibridnih varijanti metaheurističkog *Honey Badger Algorithm* (HBA) algoritma. Analiza je sprovedena za tri različite asinhronne mašine koje se često koriste u literaturi, uz primjenu različitih kriterijumskih funkcija – za dvije mašine na osnovu podataka sa natpisne pločice, a za jednu na osnovu eksperimentalno snimljenih podataka. Dobijeni rezultati omogućavaju poređenje efikasnosti hibridnih pristupa u pogledu tačnosti estimacije i brzini konvergencije.

3.1 Rezultati estimacije parametara – primjer 1

U radu [39] autori predlažu SFLA (*Shuffled Frog-Leaping Algorithm*) i modifikovani SFLA (MSFLA) algoritam u cilju estimacije parametara jednokaveznog modela asinhronne mašine, čiji podaci sa natpisne pločice su dati u Tabeli 3.1.1. U istom radu, komparativna analiza izvršena je sa rezultatima dobijenim pomoću DE (*Differential Evolution*), GA (*Genetic Algorithm*) i PSO (*Particle Swarm Optimization*) algoritma, za istu mašinu. Takođe, u [7] predložen je hibridni SA-ERWCA (*Simulated Annealing-Evaporation Rate Water Cycle Algorithm*) algoritam za rješavanje identičnog optimizacionog problema, tj. za estimaciju parametara jednokaveznog modela date mašine.

Tabela 3.1.1 Podaci sa natpisne pločice druge mašine

Parametar	Vrijednost	Parametar	Vrijednost
P_n	40 HP	T_{st}	260 Nm
U	400 V	T_{fl}	190 Nm
f	50 Hz	T_{max}	370 Nm
p	2	PF_{fl}	0.8
		s_{fl}	0.09

U prethodnoj tabeli, P_n predstavlja nominalnu snagu motora, U je nominalni napon, f je frekvencija, p je broj pari polova, T predstavlja moment, PF faktor snage, dok je s oznaka za klizanje. Indeksi imaju sljedeće značenje: st -polazni, fl -puno opterećenje, max -maksimalni.

Kriterijumska funkcija koja se minimizuje u toku procesa estimacije parametara jednokaveznog modela asinhronne mašine definisana je na sljedeći način:

$$CF = F_1^2 + F_2^2 + F_3^2 + F_4^2, \quad (3.1)$$

pri čemu su pojedini članovi F_1 - F_4 definisani na sljedeći način:

$$F_1 = \frac{T_{fl,cal} - T_{fl,m}}{T_{fl,m}}, F_2 = \frac{T_{st,cal} - T_{st,m}}{T_{st,m}},$$

$$F_3 = \frac{T_{max,cal} - T_{max,m}}{T_{max,m}}, F_4 = \frac{PF_{fl,cal} - PF_{fl,m}}{PF_{fl,m}}. \quad (3.2)$$

U okviru ovog rada najprije je izvršena implementacija nekoliko postojećih metaheurističkih algoritama: HBA, AVOA (*African Vultures Optimization Algorithm*), EO (*Equilibrium Optimizer*), GBO (*Gradient-Based Optimizer*), LSO (*Light Spectrum Optimizer*) i OOBO (*One to One Based Optimizer*). Svi navedeni algoritmi primijenjeni su za estimaciju parametara jednokaveznog modela asinhronne mašine koje je opisana u ovom potpoglavlju. Cilj ovog dijela istraživanja je bio da se utvrdi koji od posmatranih algoritama pokazuje najbolje performanse i najviši stepen pouzdanosti u procesu estimacije. Svaki algoritam je pokrenut 30 puta, a u tabeli su prikazani osnovni statistički pokazatelji dobijenih rezultata: najbolja (minimalna) vrijednost kriterijumske funkcije (*best*), najgora (maksimalna) vrijednost (*worst*), srednja vrijednost (*mean*), medijana (*median*) i standardna devijacija (*STD*).

Tabela 3.1.2 Uporedni rezultati metaheurističkih algoritama za estimaciju parametara prve mašine

Algoritam	HBA	AVOA	EO
<i>Best</i>	1.235676652318851e-28	5.467310347636472e-05	8.392300260420238e-05
<i>Worst</i>	5.013689069260620e-18	0.001727240319083	0.001413194267963
<i>Mean</i>	2.035304430867433e-19	5.216380515585398e-04	7.217496608263088e-04
<i>Median</i>	6.367111663436153e-24	3.316921463124496e-04	6.446423485257414e-04
<i>STD</i>	9.205406182846238e-19	4.516834867073331e-04	3.975554079564162e-04
Algoritam	GBO	LSO	OOBO
<i>Best</i>	4.311111951435361e-05	8.631329176814474e-05	5.523000657322351e-12
<i>Worst</i>	8.527481910819897e-04	0.002899141371071	9.270789658748426e-10
<i>Mean</i>	2.285928885565127e-04	0.001261023598057	2.541130129154418e-10
<i>Median</i>	1.489904829569273e-04	0.001161094060927	1.349776425660072e-10
<i>STD</i>	2.151928934453344e-04	6.790961699681121e-04	2.644573163708869e-10

Na osnovu sprovedene komparativne analize, upoređivanjem performansi šest različitih metaheurističkih algoritama primijenjenih na problem estimacije parametara

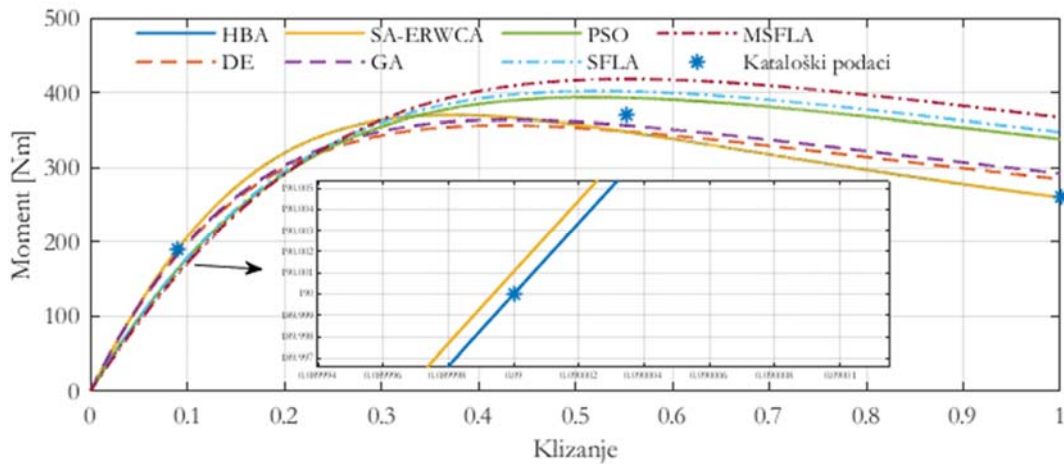
asinhrona mašina, pokazalo se da HBA ostvaruje najpreciznije i najstabilnije rezultate. Ovaj algoritam je dao najmanju vrijednost kriterijumske funkcije uz najmanju disperziju rezultata između pojedinačnih pokretanja, što ukazuje na njegovu visoku efikasnost i pouzdanost u procesu optimizacije.

Polazeći od toga, u drugom dijelu ovog potpoglavlja rada biće sprovedeno detaljno poređenje HBA algoritma sa drugim metodama prisutnim u savremenoj literaturi. Kao što je već pomenuto, u cilju estimacije parametara jednokaveznog modela asinhrona mašine čiji su podaci dati u Tabeli 3.1.1, u dostupnoj literaturi korišćeni su sljedeći algoritmi: SA-ERWCA, DE, GA, PSO, SFLA i MSFLA. Adekvatna komparativna analiza pomenutih algoritama i HBA algoritma prikazana je u Tabeli 3.1.3. Preciznije, u ovoj tabeli date su vrijednosti estimiranih parametara jednokaveznog modela opisane mašine, kao i odgovarajuće vrijednosti kriterijumske funkcije.

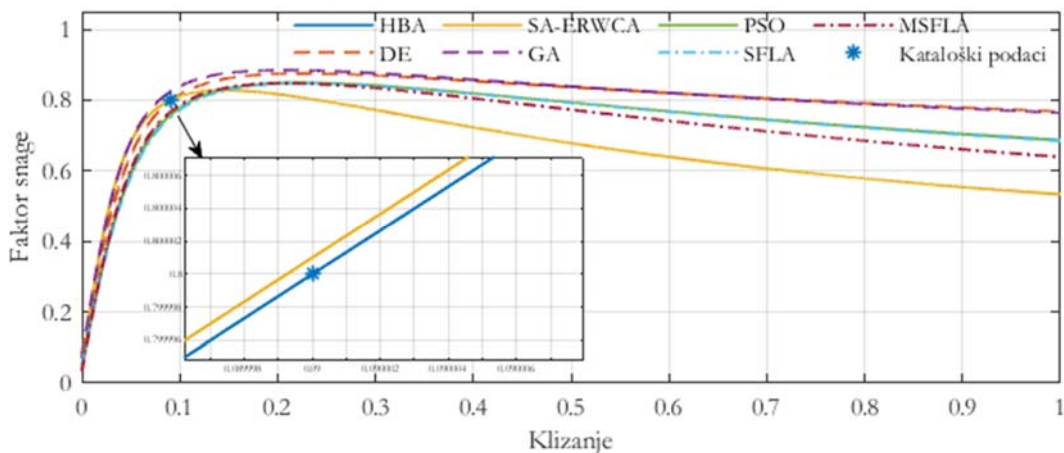
Tabela 3.1.3 Komparativna analiza HBA algoritma i ostalih algoritama iz literature (za prvu mašinu)

Parametar	HBA	SA-ERWCA	DE	GA
R_1	0.278213014564923	0.27821	0.4993	0.4875
X_1	0.1	0.20111	0.3264	0.3264
R_2	0.397973777722644	0.38795	0.351	0.3556
X_2	0.926978590307620	0.80380	0.351	0.3556
X_m	7.979305304815234	7.87820	5.6967	6.6072
CF	1.2356766523188e-28	1.6127893466735e-10	0.003463493494065	0.003466404696983
Parametar	PSO	SFLA	MSFLA	
R_1	0.3555	0.3437	0.270719	
X_1	0.3455	0.3360	0.357274	
R_2	0.4353	0.4345	0.477311	
X_2	0.4353	0.4345	0.477311	
X_m	6.4223	6.2629	7.543194	
CF	6.6456742704625e-4	0.0011457007066	2.8451374587793e-4	

Upoređujući dobijene vrijednosti kriterijumske funkcije nakon procesa estimacije parametara, jasno je da se najmanja vrijednost kriterijumske funkcije dobija primjenom parametara estimiranih pomoću HBA algoritma. Dodatno, u cilju adekvatne komparativne analize, prikazano je i poređenje moment-klizanje i faktor snage-klizanje karakteristike date asinhrona mašine. Prikazane karakteristike dobijene su analitičkim izrazima, primjenom parametara prikazanih u prethodnoj tabeli. Na istim graficima, prikazani su i podaci sa natpisne pločice-polazni moment, maksimalni moment, kao i moment i klizanje pri punom opterećenju. Grafičko poređenje moment-klizanje karakteristika dato je na slici 3.1.1, dok je na slici 3.1.2 prikazano poređenje faktor snage-klizanje karakteristika.



Slika 3.1.1 Grafičko poređenje moment-klizanje karakteristika za prvu mašinu



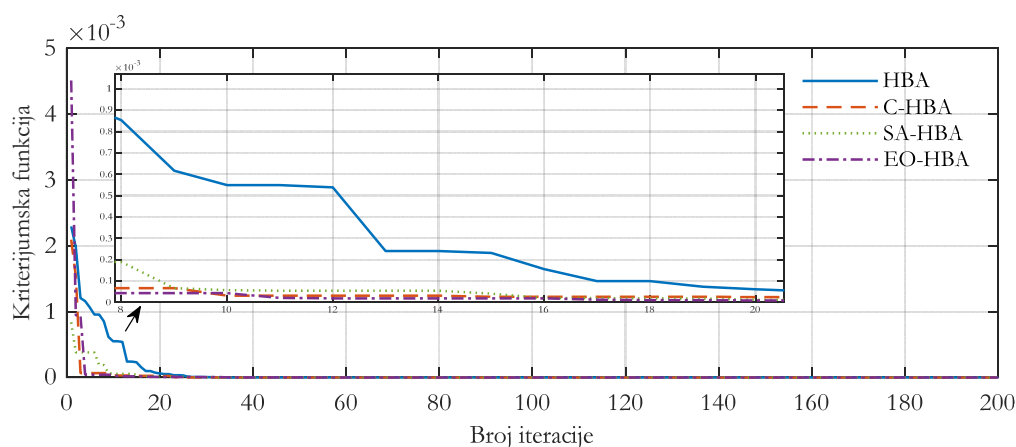
Slika 3.1.2 Grafičko poređenje faktor snage-klizanje karakteristika za prvu mašinu

Na osnovu prethodno prikazane komparativne analize, kako numeričke tako i grafičke, evidentno je da HBA algoritam koji je korišćen u ovom radu značajno poboljšava proces estimacije parametara prikazane asinhronne mašine, u poređenju sa ostalim metodama dostupnim u literaturi koji su korišćeni za estimaciju parametara jednokaveznog modela iste mašine. Iako je HBA algoritam pokazao superiorne performanse u odnosu na ostale algoritme, cilj ovog rada je dodatno unaprijediti karakteristike ovog algoritma, kako u pogledu preciznosti estimacije parametara, tako i u pogledu brzine konvergencije. U tom smislu, predstavljene su tri hibridne varijante HBA algoritma: haotični HBA (C-HBA), Simulated Annealing-HBA (SA-HBA), kao i EO-HBA algoritam. Pod identičnim uslovima kao i originalni HBA algoritam, sva tri predložena hibridna algoritma su implementirana u cilju

estimacije parametara jednokaveznog modela predmetne asinhronne mašine. Dobijeni rezultati su prikazani u tabeli 3.1.4. Takođe, konvergencijske krive za originalni HBA, kao i za predložene hibridne varijante, prikazane su na slici 3.1.3.

Tabela 3.1.4 Poređenje originalnog HBA algoritma i predloženih hibridnih varijanti za prvu mašinu

Algoritam	HBA	C-HBA	SA-HBA	EO-HBA
<i>Best</i>	1.235676652318e-28	5.053640174072e-31	4.942706609275e-29	1.066194817212e-29
<i>Worst</i>	5.013689069260e-18	6.780918353530e-18	9.195723965844e-17	1.394867578673e-18
<i>Mean</i>	2.035304430867e-19	2.305421969453e-19	3.603564007792e-18	1.004517024626e-19
<i>Median</i>	6.367111663436e-24	1.532894069050e-23	5.601358367673e-24	1.406622332356e-22
<i>STD</i>	9.205406182846e-19	1.237255937379e-18	1.686604707587e-17	3.526847550964e-19



Slika 3.1.3 Konvergencijske karakteristike HBA i predloženih hibridnih algoritama za prvu mašinu

Na bazi prikazanih vrijednosti kriterijumskih funkcija iz prethodne tabele, očigledno je da sve tri predložene hibridne varijante dovode do unaprijeđenja originalnog HBA algoritma. Pri tome, najmanja vrijednost kriterijumske funkcije, tj. najpreciznija estimacija parametara, postiže se primjenom C-HBA algoritma. Što se tiče konvergencijskih karakteristika, EO-HBA najbrže konvergira ka optimalnom rješenju.

3.2 Rezultati estimacije parametara – primjer 2

Druga asinhrona mašina koja je razmatrana u ovom radu, takođe je analizirana u [7] i [38]. Naime, autori u [7] predlažu hibridni SA-ERWCA algoritam u cilju estimacije parametara dvokaveznog modela pomenute mašine. Takođe, PAMP i MSFLA algoritmi su korišćeni u [38] za estimaciju parametara dvokaveznog modela iste mašine. PAMP algoritam, shodno [38], predstavlja skraćenicu funkcije „power_AsynchronousMachineParams“, koja je sadržana u *Simpowersystem Toolbox*-u u softverskom paketu MATLAB Simulink. Ova funkcija implementira modifikovani Njutnov metod u cilju estimacije parametara dvokaveznog

modela asinhronne mašine na bazi standardnih podataka dostupnih od strane proizvođača. Podaci sa natpisne pločice proizvođača ove mašine prikazani su u Tabeli 3.2.1.

Tabela 3.2.1 Podaci sa natpisne pločice druge mašine

Parametar	Vrijednost	Parametar	Vrijednost
P_n	148 HP	T_{max}	1094.3 Nm
U	400 V	PF_{fl}	0.9
f	50 Hz	s_{fl}	0.0077
p	2	I_{st}	1527.2 A
T_{st}	847.2 Nm	I_{fl}	184 A
T_{fl}	353 Nm		

U odnosu na Tabelu 3.1.1 koja sadrži podatke sa natpisne pločice prve razmatrane mašine, u prethodnoj tabeli figurišu oznake za polaznu struju – I_{st} i struju pri punom opterećenju – I_{fl} .

Proces estimacije parametara dvokaveznog modela asinhronne mašine zasniva se na minimizaciji sljedeće kriterijumske funkcije:

$$CF = F_1^2 + F_2^2 + F_3^2 + F_4^2 + F_5^2 + F_6^2, \quad (3.3)$$

pri čemu su pojedini članovi F_1 - F_6 definisani na sljedeći način:

$$F_1 = \frac{T_{fl,cal} - T_{fl,m}}{T_{fl,m}}, F_2 = \frac{T_{st,cal} - T_{st,m}}{T_{st,m}}, F_3 = \frac{T_{max,cal} - T_{max,m}}{T_{max,m}} \quad (3.4)$$

$$F_4 = \frac{PF_{fl,cal} - PF_{fl,m}}{PF_{fl,m}}, F_5 = \frac{I_{st,cal} - I_{st,m}}{I_{st,m}}, F_6 = \frac{I_{fl,cal} - I_{fl,m}}{I_{fl,m}}.$$

Za proces estimacije parametara dvokaveznog modela asinhronne mašine korišćeni su isti metaheuristički algoritmi predstavljeni u prethodnom poglavlju, odnosno HBA, AVOA, EO, GBO, LSO i OBO. Cilj sprovedenih simulacija bio je da se ispita efikasnost ovih algoritama pri estimaciji parametara dvokaveznog modela posmatrane mašine. Svaki algoritam pokrenut je 30 puta, a u Tabeli 3.2.2 su prikazani osnovni statistički pokazatelji dobijenih rezultata: najbolja (minimalna) vrijednost kriterijumske funkcije (best), najgora (maksimalna) vrijednost (worst), srednja vrijednost (mean), medijana (median) i standardna devijacija (STD).

Tabela 3.2.2 Uporedni rezultati metaheurističkih algoritama za estimaciju parametara druge mašine

Algoritam	HBA	AVOA	EO
<i>Best</i>	1.832742029211665e-9	0.034297455969963	0.038040103158377
<i>Worst</i>	9.156165549578361e-6	1.000000000000000e+11	1.000000000000000e+11

<i>Mean</i>	7.108506617670341e-7	6.666666666675989e+10	4.666666666793790e+10
<i>Median</i>	1.088046902002784e-7	1.000000000000000e+11	10.293837875844876
<i>STD</i>	1.710362628602592e-6	4.794633014840434e+10	5.074162633928301e+10
Algoritam	GBO	LSO	OOBO
<i>Best</i>	0.019667705721755	0.008364738325893	3.240527062920810e-5
<i>Worst</i>	1.000000000000000e+11	1.000000000000000e+11	1.000000000000000e+11
<i>Mean</i>	4.00000000021621e+10	6.666666666811636e+09	2.33333333333704e+10
<i>Median</i>	0.472366048458944	0.126503842841504	0.002045671282306
<i>STD</i>	4.982728791206444e+10	2.537081317020684e+10	4.301830671520555e+10

Sprovedena komparativna analiza performansi šest metaheurističkih algoritama pokazala je da HBA ostvaruje najpreciznije i najstabilnije rezultate u procesu estimacije parametara. Ovaj algoritam postiže najnižu vrijednost kriterijumske funkcije uz najmanju varijabilnost između pojedinačnih pokretanja, što ukazuje na njegovu pouzdanost i visoku efikasnost u optimizaciji.

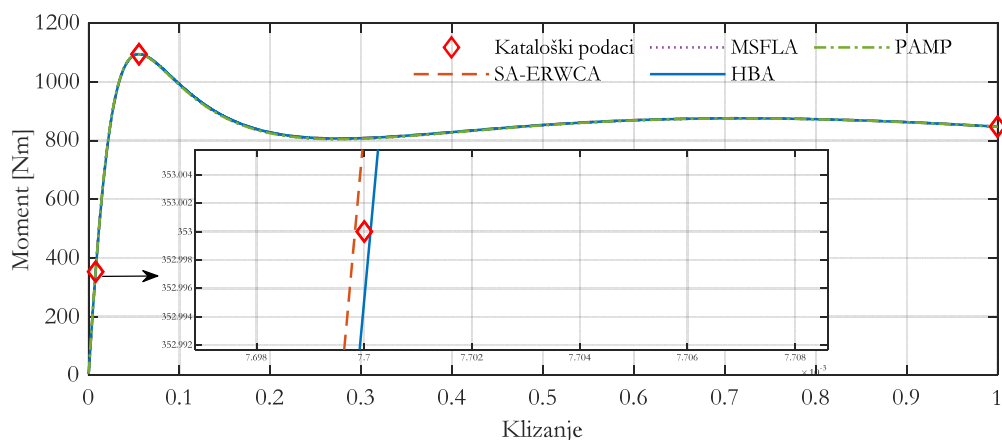
Na osnovu prethodno prikazanih rezultata, u nastavku će biti izvršeno detaljnije poređenje HBA algoritma sa drugim metodama prisutnim u literaturi. U dostupnim radovima, prilikom estimacije parametara asinhronih mašina, za estimaciju parametara dvokaveznog modela predmetne asinhronne mašine korišćeni su SA-ERWCA, PAMP i MSFLA algoritmi. Uporedni prikaz performansi ovih algoritama i HBA metode dat je u Tabeli 3.2.3, gdje su prikazane estimirane vrijednosti parametara posmatrane mašine, kao i pripadajuće vrijednosti kriterijumske funkcije.

Tabela 3.2.3 Komparativna analiza HBA algoritma i ostalih algoritama iz literature (za drugu mašinu)

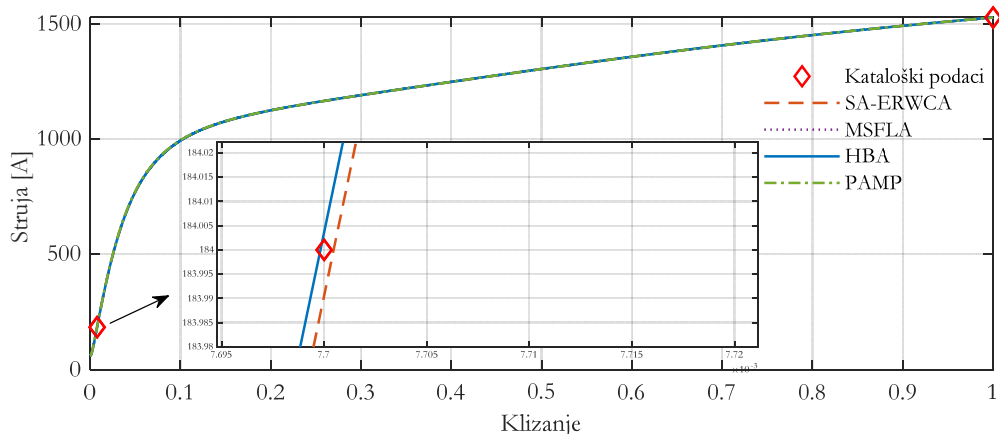
Parametar	HBA	SA-ERWCA	PAMP	MSFLA
R_1	0.037809487450313	0.037614	0.0375	0.0377
X_1	0.043561336488079	0.050454	0.0375	0.0691
X_m	3.772670856159868	3.767293	3.7385	3.7475
R_{11}	0.010795305858844	0.010833	0.0109	0.0109
R_{22}	0.148620593360915	0.135273	0.1031	0.1032
X_{1d}	0.165147497077270	0.159068	0.1424	0.1422
X_{2d}	0.130318800640248	0.112364	0.0692	0.0691
CF	1.832742029211665e-9	4.7337e-9	8.9048e-5	8.0703e-5

Analiza vrijednosti kriterijumske funkcije dobijenih nakon procesa estimacije parametara jasno pokazuje da primjena HBA algoritma rezultira najnižom vrijednošću ove funkcije, što potvrđuje njegovu superiornost u odnosu na ostale razmatrane metode. Radi potpunijeg sagledavanja performansi estimiranih parametara, izvršeno je i poređenje karak-

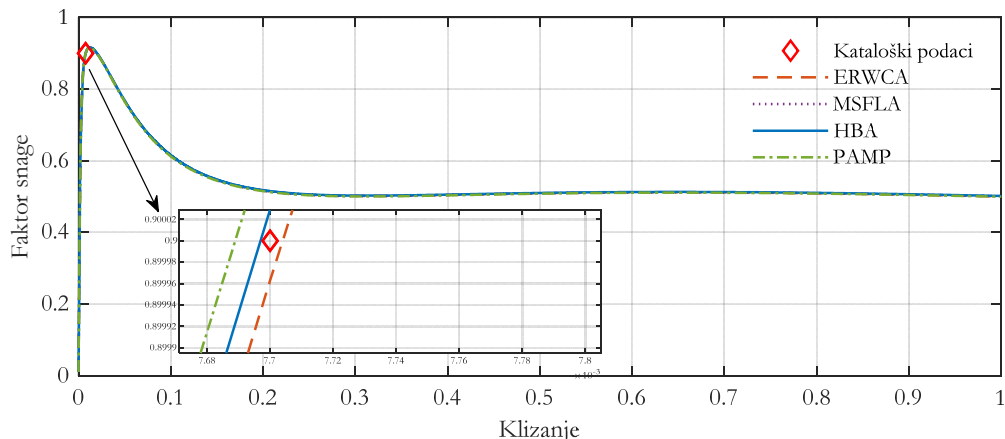
teristika moment–klizanje i faktor snage–klizanje posmatrane asinhronne mašine. Ove karakteristike određene su na osnovu odgovarajućih analitičkih izraza, pri čemu su korišćeni parametri prikazani u prethodnoj tabeli. Na istim grafičkim prikazima ucrtani su i relevantni nominalni podaci preuzeti sa natpisne pločice mašine: početni moment, maksimalni moment, te moment i klizanje pri punom opterećenju. Grafička analiza moment–klizanje date je na slici 3.2.1, dok je na slici 3.2.2 prikazano poređenje karakteristika faktor snage–klizanje, a na slici 3.2.3 ilustrovano je poređenje struja-klizanje karakteristika.



Slika 3.2.1 Grafičko poređenje moment-klizanje karakteristika za drugu mašinu



Slika 3.2.2 Grafičko poređenje faktor snage-klizanje karakteristika za drugu mašinu

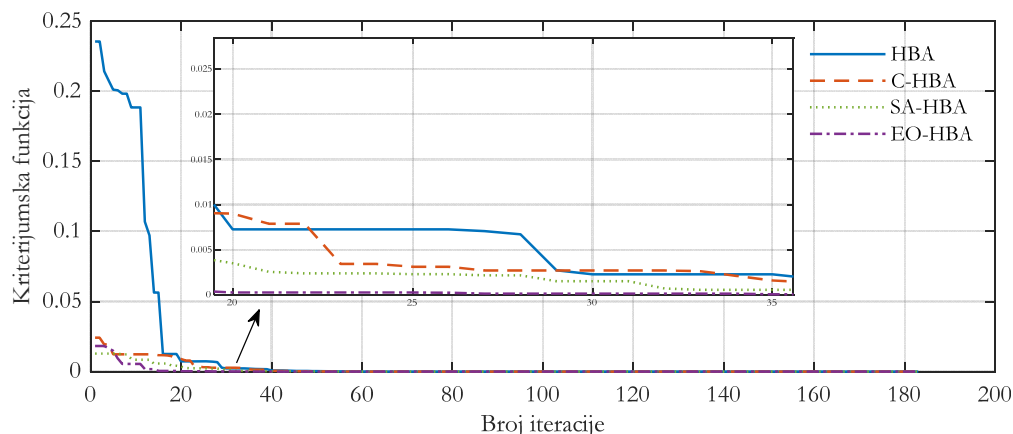


Slika 3.2.3 Grafičko poređenje struja-klizanje karakteristika za drugu mašinu

Na osnovu prethodno sprovedene numeričke i grafičke analize može se zaključiti da HBA algoritam demonstrira najbolje performanse u procesu estimacije parametara posmatrane asinhronne mašine. Uprkos njegovoj jasno izraženoj prednosti u odnosu na druge metode opisane u literaturi, dalji cilj istraživanja usmjeren je ka unapređenju ovog algoritma, kako u pogledu tačnosti procjene parametara, tako i u pogledu ubrzanja konvergencije. U tom kontekstu razvijene su tri hibridne modifikacije HBA algoritma: haotična varijanta (C-HBA), hibridizacija sa metodom Simulated Annealing (SA-HBA) i hibridni EO-HBA. U cilju statistički validne analize, sve predložene modifikacije implementirane su pod istim uslovima kao i izvorna verzija HBA algoritma, a njihovi rezultati prikazani su u tabeli 3.2.4. Pored toga, konvergenijsko ponašanje originalnog algoritma i njegovih hibridnih verzija prikazano je na slici 3.2.4.

Tabela 3.2.4 Poređenje originalnog HBA algoritma i predloženih hibridnih varijanti za drugu mašinu

Algoritam	HBA	C-HBA	SA-HBA	EO-HBA
<i>Best</i>	1.832742029211665e-9	5.296867811621339e-12	1.025089302691779e-9	1.225083246112710e-10
<i>Worst</i>	9.156165549578361e-6	5.646588814026137e-5	4.362460285053748e-4	4.439200342747316e-04
<i>Mean</i>	7.108506617670341e-7	2.163942613220437e-6	1.606904626213932e-5	1.606332112852432e-05
<i>Median</i>	1.088046902002784e-7	7.784220827744141e-8	1.271732345019180e-7	1.032299469276688e-07
<i>STD</i>	1.710362628602592e-6	1.026695753842219e-5	7.958615508484184e-5	8.084785447474260e-05



Slika 3.2.4 Konvergenijske karakteristike HBA i predloženih hibridnih algoritama za drugu mašinu

Analiza vrijednosti kriterijumskih funkcija prikazanih u prethodnoj tabeli pokazuje da sve tri hibridne varijante ostvaruju primjetno poboljšanje u odnosu na izvorni HBA algoritam. Najniža vrijednost kriterijumske funkcije, odnosno najtačnija procjena parametara, ostvarena je primjenom C-HBA algoritma. Kada je riječ o konvergenijskom ponašanju, najbrže približavanje optimalnom rješenju postiže EO-HBA hibridna varijanta.

3.3 Rezultati estimacije parametara – primjer 3

Za razliku od dvije prethodno opisane mašine, autori u [37] vrše estimaciju parametara jednokaveznog modela mašine pomoću genetičkog algoritma (GA) na osnovu izmjerenih vrijednosti struje i faktora snage za nekoliko vrijednosti klizanja. Takođe, autori u [7] koriste hibridni SA-ERWCA algoritam za estimaciju parametara jednokaveznog modela identične mašine. U Tabeli 3.3.1 prikazani su podaci sa natpisne pločice ove mašine, kao i izmjerene vrijednosti klizanja, struje i faktora snage, na osnovu kojih se estimiraju parametri.

Tabela 3.3.1 Podaci sa natpisne pločice treće mašine

Parametar	Vrijednost	Mjereni podaci		
P_n	0.75 kW	Klizanje	Struja statora (A)	Faktor snage
U	380 V	0.06	1.86	0.62
f	50 Hz	0.10	2.39	0.74
p	1	0.15	3.07	0.78

Za jednokavezni model treće asinhronne mašine razmatrane u ovom radu parametri se određuju tako što se minimizuje odgovarajuća kriterijumska funkcija definisana u nastavku:

$$CF = \sum_{i=1}^3 \left(\frac{PF_{cal,i}}{PF_{m,i}} - 1 \right)^2 + \sum_{i=1}^3 \left(\frac{I_{cal,i}}{I_{m,i}} - 1 \right)^2, \quad (3.5)$$

Identičan skup postojećih metaheurističkih algoritama (HBA, AVOA, EO, GBO, LSO i OOBO) koji je korišćen i za prethodne dvije mašine, primjenjen je za estimaciju parametara jednokaveznog modela treće asinhronne mašine razmatrane u ovom radu. Analogno prethodnim slučajevima, u cilju statističke validnosti, svaki algoritam pokrenut je 30 puta. Tabela 3.3.2 prikazuje ključne statističke pokazatelje ostvarenih rezultata, uključujući minimalnu vrijednost kriterijumske funkcije (best), maksimalnu vrijednost (worst), srednju vrijednost (mean), medijanu (median) i standardnu devijaciju (STD).

Tabela 3.3.2 Usporedni rezultati metaheurističkih algoritama za estimaciju parametara treće mašine

Algoritam	HBA	AVOA	EO
<i>Best</i>	1.776601684735269e-5	3.305513590971987e-5	1.632924024964057e-4
<i>Worst</i>	1.776601684735487e-5	0.001552697212875	8.142093209532037e-4
<i>Mean</i>	1.776601684735321e-5	3.866805649884507e-4	5.085931169840135e-4
<i>Median</i>	1.776601684735318e-5	2.632630771871155e-4	5.058862706480154e-4
<i>STD</i>	3.622258826751545e-19	3.433883682900823e-4	2.015273421394502e-4
Algoritam	GBO	LSO	OOBO
<i>Best</i>	2.939068444709504e-5	3.131981581644842e-5	1.776601698112213e-5
<i>Worst</i>	7.445106733321562e-4	0.001780732416928	1.776607509519671e-5
<i>Mean</i>	2.340051337482359e-4	8.950286601026204e-4	1.776602362316205e-5
<i>Median</i>	1.635905895504677e-4	7.456677197429169e-4	1.776602014966674e-5
<i>STD</i>	2.007013739464375e-4	5.720271232520881e-4	1.178118325903504e-11

Rezultati komparativne analize šest metaheurističkih algoritama ukazuju na to da HBA postiže najviši nivo preciznosti i stabilnosti u procesu estimacije parametara. Najniža vrijednost kriterijumske funkcije, uz minimalnu disperziju rezultata među ponovljenim izvođenjima, potvrđuje njegovu konzistentnost i efikasnost u okviru posmatranog optimizacionog zadatka.

S obzirom na dokazanu superiornost u poređenju sa ostalim algoritmima, u nastavku će biti izvršeno detaljnije poređenje HBA algoritma sa drugim metodama prisutnim u literaturi. U dostupnoj literaturi, za estimaciju parametara jednokaveznog modela predmetne asinhronne mašine korišćeni su SA-ERWCA [7] i GA [37]. Tabela 3.3.3 prikazuje adekvatnu komparativnu analizu, u pogledu estimiranih vrijednosti parametara i dobijene minimalne vrijednosti kriterijumske funkcije.

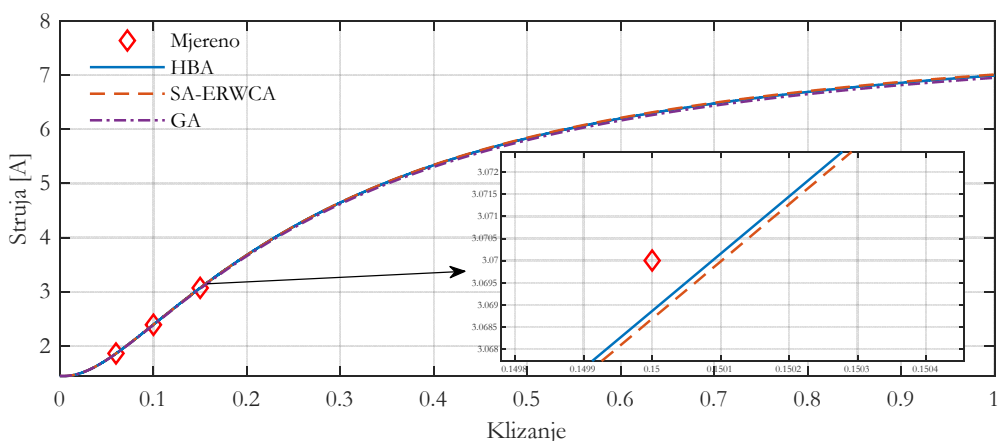
Tabela 3.3.3 Komparativna analiza HBA algoritma i ostalih algoritama iz literature (za treću mašinu)

Parametar	HBA	SA-ERWCA	GA
R_1	10.1144491384097	10.094	10.28
X_1	8.01304350799907	9.506	8.19
R_2	10.4489338557797	10.238	10.48
X_2	19.3126016006993	17.315	19.21

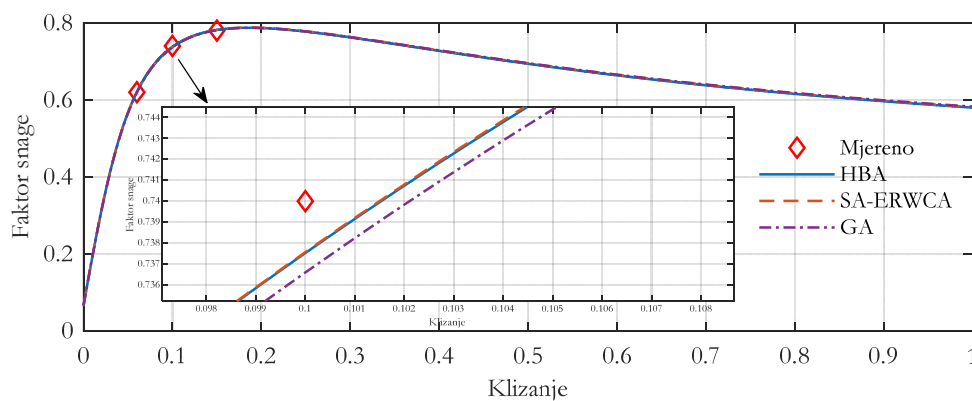
X_m	143.596005191000	141.961	143.17
CF	1.776601684735269e-5	1.8358e-05	6.3291e-05

Upoređivanjem dobijenih vrijednosti kriterijumske funkcije nedvosmisleno se može zaključiti da primjena HBA algoritma dovodi do najniže vrijednosti ove funkcije. Na taj način je dokazana superiornost ovog algoritma u odnosu na ostale koji se mogu naći u literaturi.

Radi sveobuhvatnije procjene kvaliteta dobijenih parametara, izvedeno je poređenje karakteristika struja–klizanje i faktor snage–klizanje za posmatranu asinhronu mašinu. Navedene karakteristike izračunate su primjenom odgovarajućih analitičkih izraza koji odgovaraju jednokaveznom modelu, pri čemu su korišćeni parametri predstavljeni u prethodnoj tabeli. Uz analitičke krive, na graficima su prikazani i eksperimentalno izmjerene karakteristike struja-klizanje i faktor snage-klizanje. Prikaz odnosa struja–klizanje dat je na slici 3.3.1, dok je poređenje karakteristika faktor snage–klizanje predstavljeno na slici 3.3.2.



Slika 3.3.1 Grafičko poređenje struja-klizanje karakteristika za treću mašinu

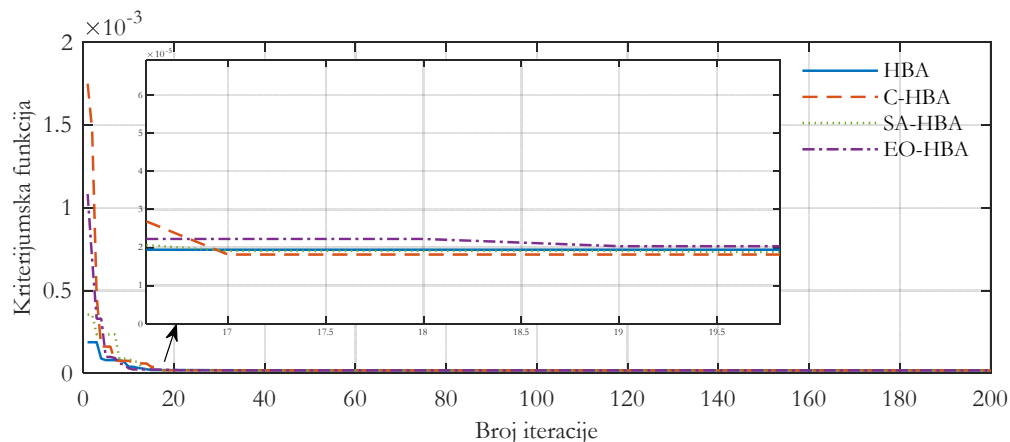


Slika 3.3.2 Grafičko poređenje faktor snage-klizanje karakteristika za treću mašinu

Uzimajući u obzir rezultate numeričke i grafičke analize, može se zaključiti da HBA algoritam ostvaruje najviši nivo tačnosti i stabilnosti u procesu estimacije parametara posmatrane asinhronne mašine. Iako se njegova prednost u odnosu na druge metode iz literature jasno uočava, dalji dio analize usmjeren je na ispitivanje mogućnosti dodatnog unapređenja performansi primjenom hibridnih varijanti C-HBA, SA-HBA i EO-HBA, koje su ranije uvedene u ovom radu. Radi obezbjeđenja statistički uporedivih rezultata, sve hibridne verzije testirane su pod istim eksperimentalnim uslovima kao i osnovni HBA algoritam, a dobijeni rezultati prikazani su u tabeli 3.3.4. Konvergencijsko ponašanje osnovne i hibridnih verzija algoritma prikazano je na slici 3.3.3.

Tabela 3.3.4 Poređenje originalnog HBA algoritma i predloženih hibridnih varijanti za treću mašinu

Algoritam	HBA	C-HBA	SA-HBA	EO-HBA
<i>Best</i>	1.776601684735269e-5	1.776601684735238e-5	1.776601684735252e-5	1.776601684735258e-5
<i>Worst</i>	1.776601684735487e-5	1.776601684735361e-5	1.776601684735354e-5	1.776601684735372e-5
<i>Mean</i>	1.776601684735321e-5	1.776601684735308e-5	1.776601684735305e-5	1.776601684735309e-5
<i>Median</i>	1.776601684735318e-5	1.776601684735314e-5	1.776601684735304e-5	1.776601684735307e-5
<i>STD</i>	3.622258826751545e-19	3.110120692625854e-19	2.205850650946544e-19	2.350997785610772e-19



Slika 3.3.3 Konvergencijske karakteristike HBA i predloženih hibridnih algoritama za treću mašinu

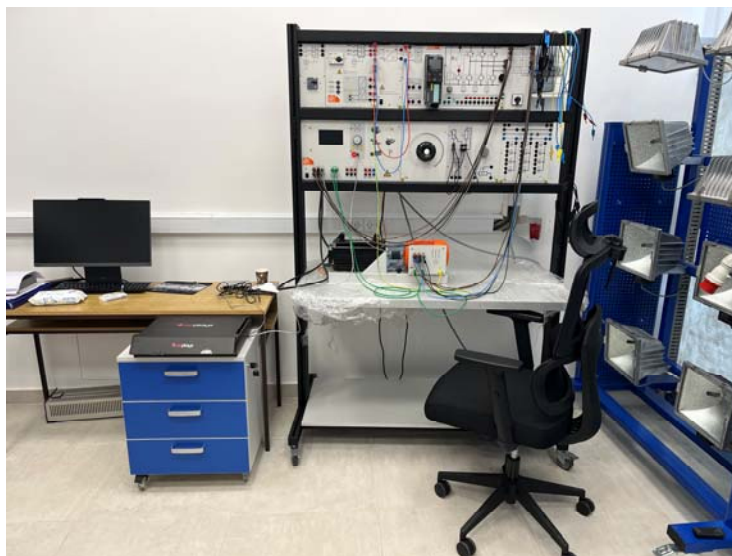
Najniža vrijednost kriterijumske funkcije, odnosno najpreciznija estimacija parametara, dobijena je korišćenjem C-HBA algoritma. Sa aspekta konvergencijskog ponašanja, najbrže dostizanje optimalnog rješenja ostvaruje takođe C-HBA algoritam.

Poglavlje 4

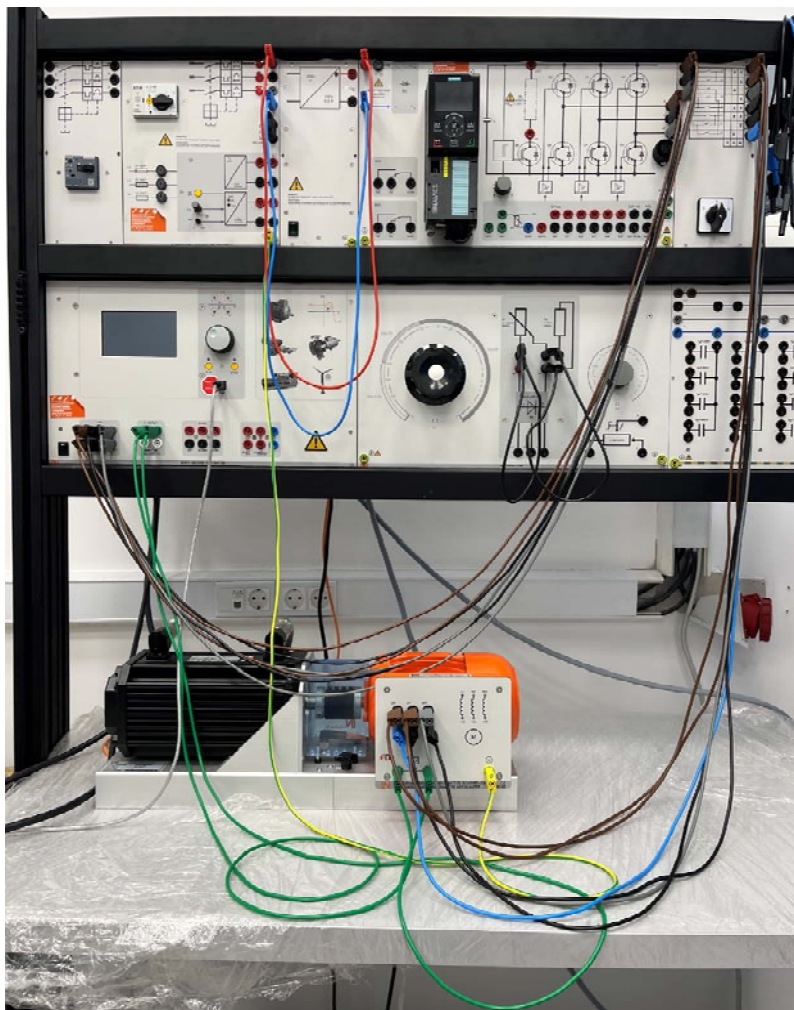
Rezultati estimacije parametara laboratorijske asinhronne mašine

U ovom poglavlju sprovedena je estimacija parametara kavezne asinhronne mašine koja se nalazi u Laboratoriji za energetske pretvarače Elektrotehničkog fakulteta u Podgorici. Za razliku od prethodnog poglavlja, gdje su korišćeni podaci preuzeti iz dostupne literature, ovdje se analiza zasniva na eksperimentalnim mjerenjima izvršenim na realnoj mašini.

Eksperimentalna postavka korišćena za analizu predmetne asinhronne mašine detaljno je prikazana na slikama 4.1 i 4.2. Ovi prikazi obuhvataju osnovne komponente laboratorijskog sistema, uključujući samu mašinu, mjerne instrumente i pripadajuću opremu potrebnu za prikupljanje relevantnih podataka. Radi potpunijeg uvida u karakteristike mašine, u tabeli 4.1 prikazani su tehnički podaci preuzeti sa natpisne pločice.



Slika 4.1 Izgled eksperimentalne postavke – slika 1



Slika 4.2 Izgled eksperimentalne postavke – slika 2

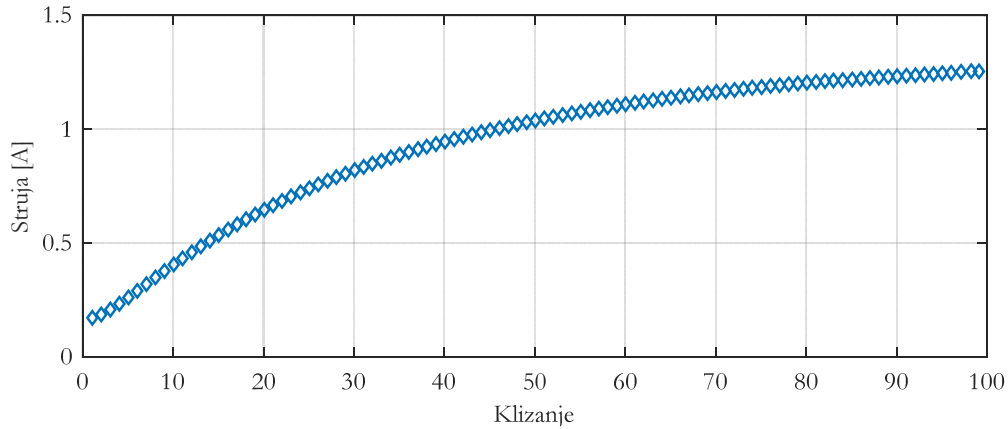
Tabela 4.1 Podaci sa natpisne pločice laboratorijske mašine

Parametar	Vrijednost	Parametar	Vrijednost
P_n	0.37 kW	I	0.95 A (Δ), 0.55 A (Y)
U	400 V (Δ), 690 V (Y)	PF_n	0.76
f	50 Hz	n_n	1400 ob/min

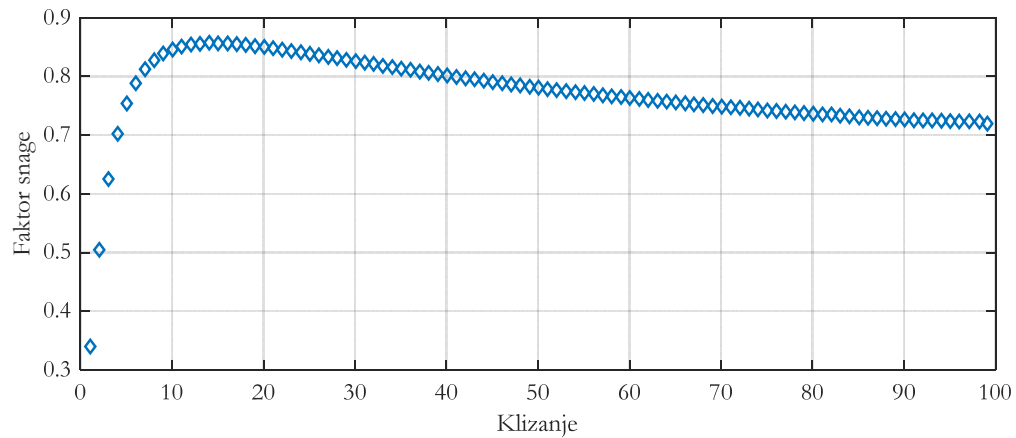
U prethodno datoj tabeli, I predstavlja nominalnu struju, PF_n nominalni faktor snage, dok n_n označava nominalnu brzinu.

Na osnovu prikazane mašine i odgovarajuće eksperimentalne postavke izvedena su mjerenja neophodna za dalju analizu. U okviru eksperimenta snimljene su zavisnosti struja–klizanje i faktor snage–klizanje, pri čemu je za svaku od karakteristika registrovano ukupno

100 mjernih tačaka kako bi se obezbijedila dovoljna rezolucija i preciznost podataka. Eksperimentalno dobijene karakteristike prikazane su na slikama 4.3 i 4.4, a predstavljaju osnovu za postupak estimacije parametara jednokaveznog i dvokaveznog modela asinhronne mašine.



Slika 4.3 Eksperimentalno snimljene karakteristike struja-klizanje



Slika 4.4 Eksperimentalno snimljene karakteristike faktor snage-klizanje

Slično trećoj asinhronoj mašini koja je razmatrana u prethodnom poglavlju, kriterijumska funkcija definisana je na sljedeći način:

$$CF = \sum_{i=1}^n \left(\frac{PF_{cal,i}}{PF_{m,i}} - 1 \right)^2 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{I_{cal,i}}{I_{m,i}} - 1 \right)^2, \quad (3.6)$$

gdje je n broj mjernih tačaka (u ovom slučaju iznosi 100).

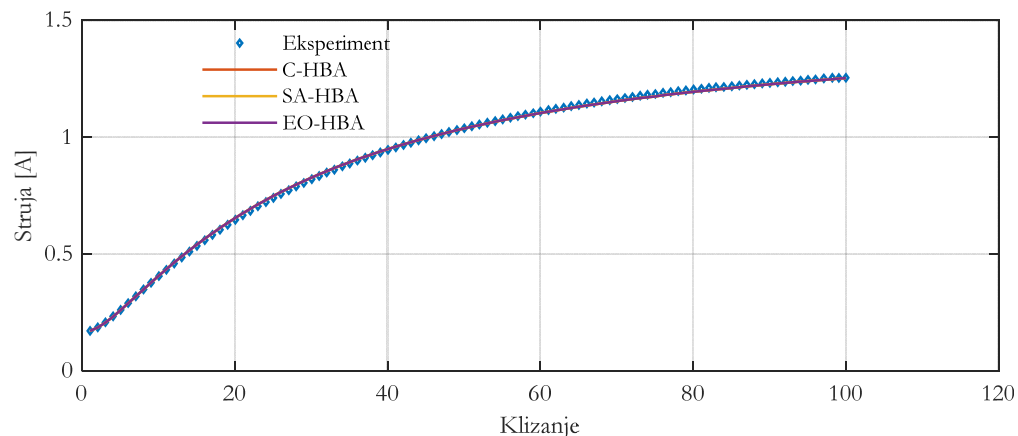
U narednom dijelu analize, eksperimentalno dobijene karakteristike struja-klizanje i faktor snage-klizanje iskorišćene su kao ulazni podaci za estimaciju parametara jednokavez-

nog i dvokaveznog modela posmatrane laboratorijske asinhronne mašine. Za tu svrhu primijenjene su predložene hibridne varijante HBA algoritma, čiji su principi rada i motivacija za uvođenje detaljno obrađeni u prethodnim poglavljima. Uvođenje ove mašine u analizu omogućava dodatnu validaciju performansi hibridnih algoritama na realnom pogonskom sistemu, kao i provjeru njihove efikasnosti na mašinama koje nijesu obuhvaćene literaturnim podacima. Na taj način obezbjeđuje se šira i pouzdanija procjena robusnosti predloženih optimizacionih metoda.

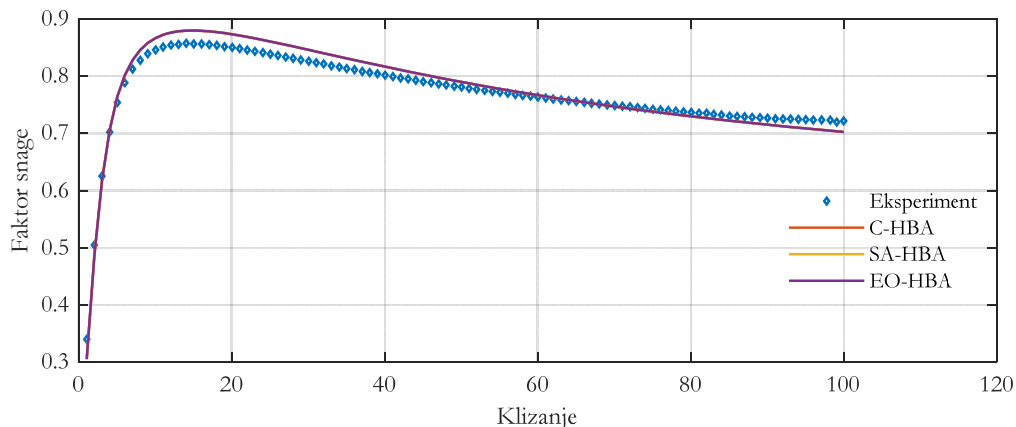
Rezultati estimacije parametara jednokaveznog modela asinhronne mašine dobijeni primjenom hibridnih modifikacija HBA algoritma prikazani su u Tabeli 4.2. Na osnovu tih parametara, na slikama 4.5 i 4.6 izvedeno je poređenje eksperimentalno snimljenih karakteristika moment–klizanje i faktor snage–klizanje sa odgovarajućim analitičkim karakteristikama dobijenim primjenom modela, čime se omogućava ocjena usklađenosti modela sa mjerama u realnim uslovima.

Tabela 4.2 Estimirane vrijednosti parametara jednokaveznog modela asinhronne mašine

Parametar	C-HBA	SA-HBA	EO-HBA
R_1	79.3907270833906	79.3907273819073	79.3907270989501
X_1	61.0242385227084	66.8101097016656	58.0270467764460
R_2	49.6965252649477	49.2377717803066	49.9350045726299
X_2	66.3717887222551	60	69.6946622655909
X_m	1250.66150604461	1244.87563690935	1253.65870021686
CF	0.046622268691032	0.046622268691032	0.046622268691032



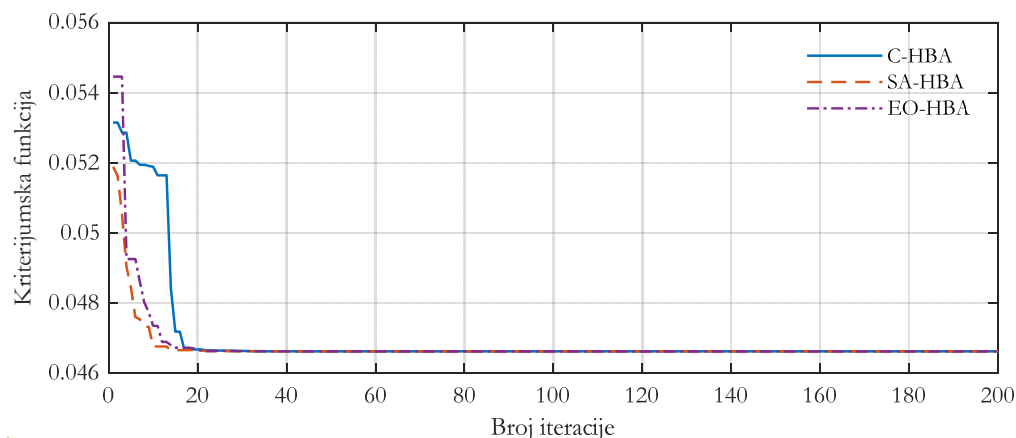
Slika 4.5 Poređenje eksperimentalne karakteristike struja–klizanje sa analitičkim karakteristikama (jednokavezni model)



Slika 4.6 Poređenje eksperimentalne karakteristike faktor snage–klizanje sa analitičkim karakteristikama (jednokavezni model)

Analizom rezultata prikazanih u tabelama 4.2 i 4.3 može se zaključiti da sve hibridne varijante HBA algoritma ostvaruju odličan stepen poklapanja sa eksperimentalno snimljenim rezultatima.

Radi detaljnijeg sagledavanja ponašanja hibridnih algoritama tokom procesa optimizacije, na slici 4.7 prikazane su konvergenzijske krive za C-HBA, SA-HBA i EO-HBA varijante.



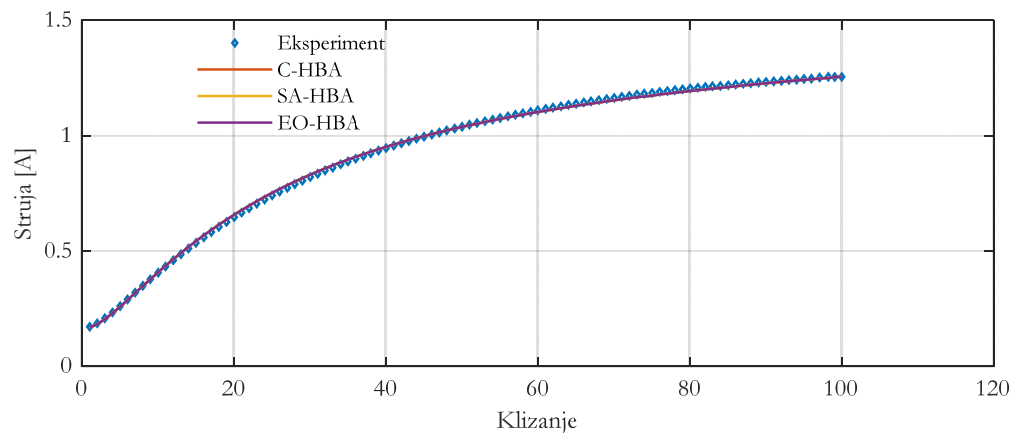
Slika 4.7 Konvergenzijske karakteristike hibridnih algoritama za jednokavezni model

Posmatrajući konvergenzijske krive prikazane na slici 4.7, uočava se da algoritam SA-HBA najbrže smanjuje vrijednost kriterijumske funkcije i najranije dostiže stabilno rješenje. Ovakvo ponašanje jasno ukazuje na njegovu prednost u pogledu brzine konvergencije u odnosu na ostale posmatrane metode.

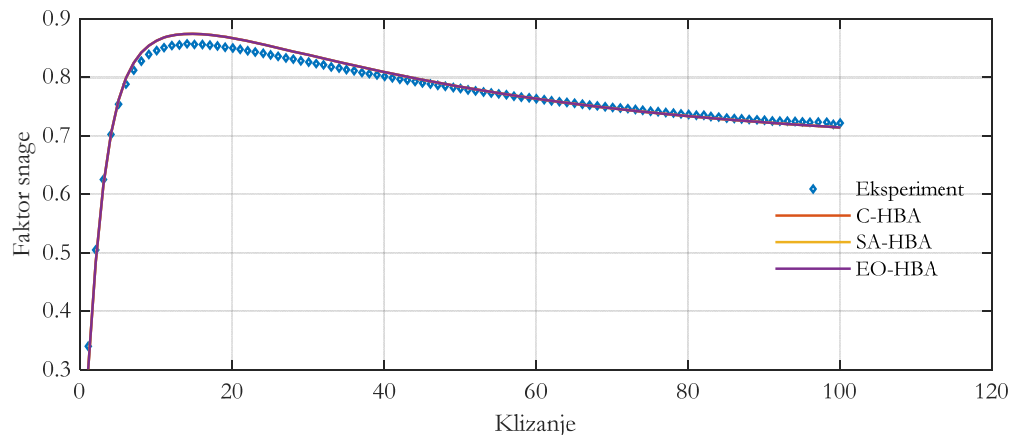
Proces estimacije parametara dvokaveznog modela asinhronne mašine sproveden je korišćenjem tri hibridne verzije HBA algoritma. U Tabeli 4.4 prikazane su estimirane vrijednosti parametara dvokaveznog modela, kao i odgovarajuće vrijednosti kriterijumske funkcije. Na osnovu njih formirane su analitičke karakteristike struja–klizanje i faktor snage–klizanje, koje su zatim upoređene sa odgovarajućim eksperimentalnim mjerama. Grafički prikazi ovih poređenja dati su na slikama 4.8 i 4.9, gdje se jasno uočava stepen slaganja modela sa realnim podacima dobijenim tokom mjerenja.

Tabela 4.4 Estimirane vrijednosti parametara dvokaveznog modela asinhronne mašine

Parametar	C-HBA	SA-HBA	EO-HBA
R_1	71.2763640072141	71.2763626657651	71.2763632918497
X_1	88.3706802573175	88.3706819062448	88.3706814206738
X_m	1250.58294444617	1250.58294630489	1250.58294269279
R_{11}	80.6155972876728	80.6155971267391	80.6155965331912
R_{22}	120	120	120
X_{1d}	100	100	100
X_{2d}	21.4831579225867	21.4831489631720	21.4831506718765
CF	0.035889272156722	0.035889272156722	0.035889272156722



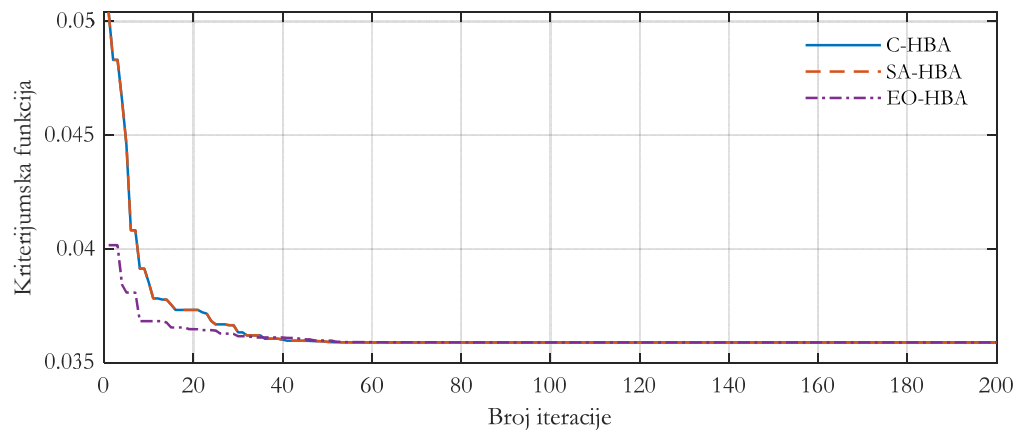
Slika 4.8 Poređenje eksperimentalne karakteristike struja–klizanje sa analitičkim karakteristikama (dvokavezni model)



Slika 4.9 Poređenje eksperimentalne karakteristike faktor snage–klizanje sa analitičkim karakteristikama (dvokavezni model)

Na osnovu prethodno prikazanog, jasno je da sve hibridne varijante HBA algoritma obezbeđuju veoma visok stepen poklapanja između analitičkih i eksperimentalnih talasnih oblika. Takođe, dobijene vrijednosti kriterijumske funkcije ukazuju na veću preciznost dvokaveznog modela, što je u potpunosti usklađeno sa teorijskim razmatranjima.

Radi procjene dinamike optimizacije, prikazane su i konvergenzijske krive hibridnih algoritama na slici 4.10. One omogućavaju poređenje brzine smanjenja kriterijumske tokom iteracija.



Slika 4.10 Konvergenzijske karakteristike hibridnih algoritama za jednokavezni model

Iz prikazanih krivih može se zaključiti da EO-HBA varijanta hibrida najbrže konvergira ka optimalnoj vrijednosti, što ga čini najefikasnijim u pogledu konvergencije među posmatranim metodama.

Zaključak

Istraživanje predstavljeno u ovom radu obuhvatilo je ne samo detaljnu evaluaciju performansi savremenih metaheurističkih algoritama u procesu estimacije parametara asinhronih mašina, već i razvoj, predlog i verifikaciju novih hibridnih varijanti HBA algoritma, čime je postavljen temelj za unapređenje postojećih metoda optimizacije u ovoj oblasti. Rad je organizovan u dvije istraživačke faze: analizu mašina čiji su podaci preuzeti iz literature i verifikaciju rezultata na eksperimentalnoj mašini, što je omogućilo sveobuhvatnu i pouzdanu procjenu predloženih optimizacionih metoda.

U prvoj fazi istraživanja fokus je bio na asinhronim mašinama čiji su podaci dostupni u relevantnoj naučnoj literaturi. Najprije je izvršena uporedna analiza performansi osnovnog HBA algoritma i postojećih metaheurističkih metoda kao što su AVOA, EO, GBO, LSO i OOBO. Sprovedene simulacije jasno su ukazale na značajnu prednost HBA algoritma u odnosu na sve poređene metode, posebno u pogledu minimalnih vrijednosti kriterijumske funkcije, stabilnosti i pouzdanosti procesa optimizacije. Ovakvi rezultati poslužili su kao temelj za razvoj unaprijeđenih rješenja koja bi dodatno povećala efikasnost osnovnog algoritma. U nastavku ove faze analizirane su i tri hibridne varijante HBA algoritma — C-HBA, SA-HBA i EO-HBA — koje su predložene u ovom radu. Testiranjem na više asinhronih mašina iz literature potvrđeno je da sve tri modifikacije postižu vidljiva poboljšanja u odnosu na osnovni HBA algoritam. Time je potvrđeno da se uvođenjem dodatnih mehanizama pretrage i integrisanjem heurističkih komponenti može značajno unaprijediti efikasnost osnovnog algoritma, što predstavlja važan doprinos ovog rada.

Druga faza istraživanja bila je usmjerena na eksperimentalnu verifikaciju razvijenih algoritama na realnoj asinhronoj mašini iz laboratorije Elektrotehničkog fakulteta u Podgorici. Izvršena su detaljna mjerenja moment–klizanje i faktor snage–klizanje karakteristika u velikom broju tačaka, što je omogućilo formiranje visoko kvalitetnog skupa podataka za proces identifikacije parametara. Rezultati optimizacije na eksperimentalnim podacima jasno potvrđuju sve zaključke iz prve faze: hibridne varijante HBA algoritma zadržavaju superiornost u odnosu na osnovni HBA, dok osnovni HBA nastavlja da nadmašuje već korišćene

algoritme iz literature. Dobijeni modeli pokazuju dobro slaganje sa izmjerenim karakteristikama mašine, što nedvosmisleno potvrđuje praktičnu primjenjivost predloženih hibridnih rješenja.

Sveukupno, rezultati obje faze istraživanja pokazuju visok stepen međusobne konzistentnosti i robusnosti razvijenih algoritama. Kombinovanjem literaturnih simulacija i eksperimentalne analize demonstrirano je da predložene hibridne varijante HBA algoritma čine pouzdanu, efikasnu i praktično primjenjivu metodu za estimaciju parametara asinhronih mašina u nelinearnim i kompleksnim optimizacionim uslovima.

Budući pravci istraživanja mogli bi se usmjeriti ka daljem unapređenju i proširenju optimizacionih algoritama primijenjenih u ovom radu. Posebno obećavajuće područje predstavlja razvoj naprednijih hibridnih metaheurističkih tehnika koje bi kombinovale prednosti više optimizacionih paradigmi, uključujući adaptivne mehanizme, inteligentno upravljanje parametrima i integraciju postupaka lokalne pretrage. Dodatni značaj ima i mogućnost proširenja analize na složenije matematičke modele, kao što je trokavezni model asinhronih mašina, koji zahtijeva estimaciju većeg broja parametara i time predstavlja izazovniji, ali i realističniji opis određenih tipova mašina. U tom kontekstu, primjena razvijenih i budućih hibridnih algoritama pružila bi dublji uvid u njihove sposobnosti u rješavanju visoko nelinearnih optimizacionih problema. Dalji razvoj istraživanja mogao bi uključiti i online estimaciju parametara u realnom vremenu, prilagođavanje algoritama dinamičkim radnim uslovima, integraciju sa algoritmima mašinskog učenja, kao i primjenu ovih metoda u širem spektru električnih mašina i industrijskih pogonskih sistema.

Literatura

- [1] I. Boldea, S. A. Nasar, *The Induction Machine Handbook*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2002.
- [2] IEEE Standard 112, *Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*, IEEE, New York City, NY, USA, 2004.
- [3] IEC Standard 60034-28, *Rotating Electrical Machines – Part 28: Test Methods for Determining Quantities of Equivalent Circuit Diagrams for Three-Phase Low-Voltage Cage Induction Motors*, IEC, Geneva, Switzerland, 2012.
- [4] M. H. Haque, “Determination of NEMA Design Induction Motor Parameters from Manufacturer Data,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 23, pp. 997–1004, 2008.
- [5] J. M. C. Guimaraes, J. V. Bernardes, A. E. Hermeto, E. D. C. Bortoni, “Parameter Determination of Asynchronous Machines from Manufacturer Data Sheet,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 29, pp. 689–697, 2014.
- [6] K. S. Huang, Q. H. Wu, D. R. Turner, “Effective Identification of Induction Motor Parameters Based on Fewer Measurements,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 17, pp. 55–60, 2002.
- [7] M. Ćalasan, M. Micev, A. F. Zobaa, S. H. E. Abdel Aleem, “Parameter Estimation of Induction Machine Single-Cage and Double-Cage Models Using a Hybrid Simulated Annealing–Evaporation Rate Water Cycle Algorithm,” *Mathematics*, vol. 8, p. 1024, 2020.
- [8] S. Yamamoto, H. Hirahara, A. Tanaka, T. Ara, “A Simple Method to Determine Double-Cage Rotor Equivalent Circuit Parameters of Induction Motors from No-Load and Locked-Rotor Tests,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, pp. 273–282, 2019.
- [9] R. Natarajan, V. K. Misra, “Parameter Estimation of Induction Motors Using a Spreadsheet Program on a Personal Computer,” *Electric Power Systems Research*, vol. 16, pp. 157–164, 1989.
- [10] M. Akbaba, M. Taleb, A. Rumeli, “Improved Estimation of Induction Machine Parameters,” *Electric Power Systems Research*, vol. 34, pp. 65–73, 1995.
- [11] J. J. Guedes, M. F. Castoldi, A. Goedel, C. M. Agulhari, D. S. Sanches, “Parameters Estimation of Three-Phase Induction Motors Using Differential Evolution,” *Electric Power Systems Research*, vol. 154, pp. 204–212, 2018.
- [12] H. R. Mohammadi, A. Akhavan, “Parameter Estimation of Three-Phase Induction Motor Using Hybrid of Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization,” *Journal of Engineering*, 2014, Article ID 148204.
- [13] A. İ. Çanakoğlu, A. G. Yetgin, H. Temurtaş, M. Turan, “Induction Motor Parameter Estimation Using Metaheuristic Methods,” *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, vol. 22, pp. 1177–1192, 2014.
- [14] A. G. Abro, J. Mohamad-Saleh, “Multiple-Global-Best Guided Artificial Bee Colony Algorithm for Induction Motor Parameter Estimation,” *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, vol. 22, pp. 620–636, 2014.

- [15] F. Duan, R. Zivanovic, S. Al-Sarawi, D. Mba, "Induction Motor Parameter Estimation Using Sparse Grid Optimization Algorithm," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 12, pp. 1453–1461, 2016.
- [16] H. A. Toliyat, E. Levi, M. Raina, "A Review of RFO Induction Motor Parameter Estimation Techniques," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 18, pp. 271–283, 2003.
- [17] D. Lindenmeyer, H. W. Dommel, A. Moshref, P. Kundur, "An Induction Motor Parameter Estimation Method," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 23, pp. 251–262, 2001.
- [18] J. Tang, Y. Yang, F. Blaabjerg, J. Chen, L. Diao, Z. Liu, "Parameter Identification of Inverter-Fed Induction Motors: A Review," *Energies*, vol. 11, p. 2194, 2018.
- [19] S. A. Odhano, P. Pescetto, H. A. Awan, M. Hinkkanen, G. Pellegrino, R. Bojoi, "Parameter Identification and Self-Commissioning in AC Motor Drives: A Technology Status Review," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, pp. 3603–3614, 2019.
- [20] J. Holtz, "Sensorless Control of Induction Motor Drives," *Proceedings of the IEEE*, vol. 90, pp. 1359–1394, 2002.
- [21] P. Manoharan, S. Ravichandran, J. S. V. S. Kumar, M. Abdullah, T. C. Sin, T. J. T. Hashim, "Electrical Equivalent Circuit Parameter Estimation of Commercial Induction Machines Using an Enhanced Grey Wolf Optimization Algorithm," *Biomimetics*, vol. 10, p. 228, 2025.
- [22] S. D. Niño-Callejas, J. C. Palombi-Gómez, O. D. Montoya, "Applying the Sine-Cosine Optimization Algorithm to the Parametric Estimation Problem in Three-Phase Induction Motors," *Ingeniería e Investigación*, vol. 44(2), 2024.
- [23] N. H. B. Santana, I. Yahyaoui, F. D. C. Oliveira, A. E. A. Amorim, D. S. L. Simonetti, H. R. O. Rocha, "Dynamic to Static Model Comparison and Hybrid Metaheuristic Optimization in Induction Motor Parameter Estimation," *Electronics*, vol. 14, p. 524, 2025.
- [24] E. F. R. Oliveira, R. Santos, M. G. Simões, H. M. Paredes, "Estimation of the Double-Cage Model for Three-Phase Induction Machines Using Decision Tree-Based Algorithms," *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, 2025.
- [25] M. Perin, L. A. Pereira, G. B. da Silveira, D. M. S. Almansa, I. Marcelo, L. G. Cavichioli, "Estimation of Electrical Parameters of the Single-, Double- and Triple-Cage Models of Induction Motors Using Manufacturer Data," 2021.
- [26] V. Sakthivel, R. Bhuvaneshwari, S. Subramanian, "Multi-Objective Parameter Estimation of Induction Motor Using Particle Swarm Optimization," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 23, pp. 302–312, 2010.
- [27] V. Sakthivel, R. Bhuvaneshwari, S. Subramanian, "Artificial Immune System for Parameter Estimation of Induction Motor," *Expert Systems with Applications*, vol. 37, pp. 6109–6115, 2010.
- [28] D. C. Huynh, M. W. Dunnigan, "Parameter Estimation of an Induction Machine Using Advanced Particle Swarm Optimization Algorithms," *IET Electric Power Applications*, vol. 4, pp. 748–760, 2010.

- [29] A. Boglietti, A. Cavagnino, M. Lazzari, “Computational Algorithms for Induction-Motor Equivalent Circuit Parameter Determination—Part I: Resistances and Leakage Reactances,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, pp. 3723–3733, 2011.
- [30] A. Boglietti, A. Cavagnino, M. Lazzari, “Computational Algorithms for Induction Motor Equivalent Circuit Parameter Determination—Part II: Skin Effect and Magnetizing Characteristics,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, pp. 3734–3740, 2011.
- [31] Z. Ling, L. Zhou, S. Guo, Y. Zhang, “Equivalent Circuit Parameters Calculation of Induction Motor by Finite Element Analysis,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, p. 833–836, 2014.
- [32] D. Klimenta, A. Hannukainen, A. Arkkio, “Estimating the Parameters of Induction Motors in Different Operating Regimes from a Set of Data Containing the Rotor Cage Temperature,” *Electrical Engineering*, vol. 100, pp. 139–150, 2018.
- [33] M. Ranta, M. Hinkkanen, “Online Identification of Parameters Defining the Saturation Characteristics of Induction Machines,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, pp. 2136–2145, 2013.
- [34] F. Córcoles, L. Monjo, J. Pedra, “Parameter Estimation of Squirrel-Cage Motors with Parasitic Torques in the Torque–Slip Curve,” *IET Electric Power Applications*, vol. 9, pp. 377–387, 2015.
- [35] E. R. C. Farias, E. T. Cari, I. Erlich, F. Shewarega, “Online Parameter Estimation of a Transient Induction Generator Model Based on the Hybrid Method,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 33, pp. 1529–1538, 2018.
- [36] S. H. Lee, A. Yoo, H. J. Lee, Y. D. Yoon, B. M. Han, “Identification of Induction Motor Parameters at Standstill Based on Integral Calculation,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, pp. 2130–2139, 2017.
- [37] I. Kostov, V. Spasov, V. Rangelova, “Application of Genetic Algorithms for Determining the Parameters of Induction Motors,” *Tehnički Vjesnik*, vol. 16, pp. 49–53, 2009.
- [38] M. Gomez-Gonzalez, F. Jurado, I. Pérez, “Shuffled Frog-Leaping Algorithm for Parameter Estimation of a Double-Cage Asynchronous Machine,” *IET Electric Power Applications*, vol. 6, pp. 484–490, 2012.
- [39] I. Pérez, M. Gomez-Gonzalez, F. Jurado, “Estimation of Induction Motor Parameters Using Shuffled Frog-Leaping Algorithm,” *Electrical Engineering*, vol. 95, pp. 267–275, 2013.
- [40] L. A. Pereira, M. Perin, L. F. Pereira, J. R. Ruthes, F. L. de Sousa, E. C. de Oliveira, “Performance Estimation of Three-Phase Induction Motors from No-Load Startup Test without Speed Acquisition,” *ISA Transactions*, vol. 96, pp. 376–389, 2020.
- [41] M. Čalasan, *Električni pogoni*, nerecenzirana skripta, Podgorica, 2018.
- [42] G. Joksimović, *Asinbrone mašine*, Narodna knjiga, Podgorica, 2019.
- [43] E. G. Talbi, „*Metaheuristics: from design to implementation*,“ Wiley, New Jersey, 2009.
- [44] A. Faramarzi, M. Heidarinejad, B. Stephens, and S. Mirjalili, “Equilibrium optimizer: A novel optimization algorithm,” *Knowledge-Based Syst.*, vol. 191, 2020, doi: 10.1016/j.knsys.2019.105190.

- [45] F. A. Hashim, E. H. Houssein, K. Hussain, M. S. Mabrouk, and W. Al-Atabany, “Honey Badger Algorithm: New metaheuristic algorithm for solving optimization problems,” *Math. Comput. Simul.*, vol. 192, pp. 84–110, 2022, doi: 10.1016/j.matcom.2021.08.013.
- [46] F. J. Rodriguez, C. García-Martinez, M. Lozano, “Hybrid metaheuristics based on evolutionary algorithms and simulated annealing: Taxonomy, comparison, and synergy test,” *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 16, no. 6, pp. 787–800, 2012, doi: 10.1109/TEVC.2012.2182773.
- [47] M. Ausloos, M. Dirickx, *The Logistic Map and the Route to Chaos*, Berlin, Germany: Springer, 2006.
- [48] D. Delahaye, S. Chaimatanan, M. Mongeau, “Simulated annealing: From basics to applications,” in *International Series in Operations Research and Management Science*, M. Gendreau and J.-Y. Potvin, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 1–35. doi: 10.1007/978-3-319-91086-4_1.

IZJAVA O ISTOVJETNOSTI ŠTAMPANE I EL- EKTRONSKE VERZIJE DOKTORSKOG RADA

Ime i prezime autora: Miljan Janketić

Broj indeksa/upisa: 1012/21

Studijski program: Automatika i industrijska elektrotehnika

Naslov rada: **Primjena hibridnih modifikacija metaheurističkih algoritama
za estimaciju parametara zamjenskih šema asinhronne mašine**

Mentor: Prof. dr Martin Čalasan

Potpisani: Miljan Janketić

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

Istovremeno izjavljujem da dozvoljavam objavljivanje mojih ličnih podataka u vezi sa dobijanjem akademskog naziva doktora nauka, odnosno zvanja doktora umjetnosti, kao što su ime i prezime, godina i mjesto rođenja, naziv disertacije i datum odbrane rada.

Potpis magistranda



U Podgorici, decembar 2025.

IZJAVA O KORIŠĆENJU

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku da u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore pohrani moj master rad pod naslovom:

Primjena hibridnih modifikacija metaheurističkih algoritama za estimaciju parametara zamjenskih šema asinhronne mašine

koja je moje autorsko djelo.

Rad sa svim priložima predao sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

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

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

U Podgorici, decembar 2025.

Potpis magistranda



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