



UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET PODGORICA

Spec. Sci Ksenija Brakočević

**PREDLOG NOVIH STRUKTURA I DIZAJNA
REGULATORA U POGONIMA SA MOTOROM
JEDNOSMJERNE STRUJE**

- MAGISTARSKI RAD -

Podgorica, 2022. godine

PODACI I INFORMACIJE O MAGISTRANDU:

Ime i prezime: Ksenija Brakočević

Datum i mjesto rođenja: 16.05.1997. godine, Podgorica, Crna Gora

Naziv završenog osnovnog studijskog programa i godina diplomiranja:

Energetika i automatika, 2019. godina

Naziv završenog specijalističkog studijskog programa i godina diplomiranja:

Energetika i automatika, smjer Elektroenergetski sistemi, 2020. godina

INFORMACIJE O MAGISTARSKOM RADU:

Elektrotehnički fakultet Podgorica

Postdiplomske magistarske akademske studije

Smjer: Elektroenergetski sistemi

Naslov rada: Predlog novih struktura i dizajna regulatora u pogonima sa motorom jednosmjerne struje

OCJENA I ODBRANA MAGISTARSKOG RADA:

Datum prijave magistarskog rada: 1.7.2021.godine

Datum sjednice Vijeća univerzitetske jedinice na kojoj je prihvaćena tema:
18.10.2021.godine

Komisija za ocjenu teme:

Prof. dr Milovan Radulović

Prof. dr Vladan Vujičić

Doc. dr Martin Čalasan

Mentor:

Doc. dr Martin Čalasan

Univerzitet Crne Gore

Elektrotehnički fakultet

Ime i prezime autora: Ksenija Brakočević, Spec. Sci

ETIČKA IZJAVA

U skladu sa članom 22 Zakona o akademskom integritetu i članom 24 Pravila studiranja na postdiplomskim studijama, pod krivičnom i materijalnom odgovornošću, izjavljujem da je magistarski rad pod naslovom

"Predlog novih struktura i dizajna regulatora u pogonima sa motorom jednosmjerne struje"

moje originalno djelo.

**Podnosilac izjave,
Ksenija Brakočević, Spec. Sci**

U Podgorici, dana 27.05.2022. godine

Sadržaj:

Predgovor.....	6
Rezime	7
Abstract.....	8
1. UVOD.....	9
2. MAŠINE JEDNOSMJERNE STRUJE	12
2.1 Konstrukcija mašina jednosmjerne struje	12
2.2 Osnovne jednačine i blok dijagram MJSS	13
3. REGULATORI U POGONU SA MJSS	16
3.1. Opšte informacije o regulatorima.....	17
3.2. Pregled postojećih regulatora u pogonima za regulaciju brzine MJSS.....	17
3.3. Simulacioni rezultati – pregled literature	20
4. PREDLOG NOVIH STRUKTURA REGULATORA U POGONIMA SA MJSS I ALGORITMA ZA ESTIMACIJU NJIHOVIH PARAMETARA.....	25
4.1. Nove strukture regulatora u pogonima sa MJSS.....	25
4.2. AOA algoritam.....	27
4.3. Estimacija parametara PID regulatora.....	28
4.4. Estimacija parametara PIDD regulatora.....	30
4.5. Estimacija parametara FOPID regulatora	32
4.6. Estimacija parametara TID regulatora	35
5. HAOTIČNI ARITHMETIC OPTIMISATION ALGORITHM	38
5.1. Primjena ChAOA algoritma u estimaciji parametara regulatora pogona sa MJSS.....	38
a) PID regulator.....	38
b) PIDD regulator	40
c) FOPID regulator	41
d) TID regulator	43
5.2. Komparativna analiza rezultata u odnosu na karakteristične vrijednosti odziva na step promjenu brzine.....	44
5.3. Komparativna analiza rezultata u odnosu na vrijednosti kriterijumskih funkcija.....	48

6. ISPITIVANJE ROBUSTNOSTI SISTEMA	52
6.1. Rezultati analize za pogon sa PID regulatorom	52
6.2. Rezultati analize za pogon sa PID regulatorom	53
6.3. Rezultati analize za pogon sa FOPID regulatorom	54
6.4. Rezultati analize za pogon sa TID regulatorom	55
6.5. Zaključak o analizi robustnosti	56
6.6. Dejstvo step promjene brzine obrtanja.....	57
6.7. Uticaj promjene momenta na brzinu obrtanja	62
7. STATISTIKA PREDLOŽENOG ChAOA	64
7.1. Chebyshiev mapa	65
7.2. Circle mapa	67
7.3. Gauss/mouse mapa.....	69
7.4. Iterative mapa.....	71
7.5. Logistic mapa	73
7.6. Piecewise mapa	75
7.7. Sine mapa	77
7.8. Singer mapa.....	79
7.9. Sinusoidal mapa	81
7.10. Tent mapa.....	83
7.11. Zaključak o analizi statistike ChAOA.....	85
8. ZAKLJUČAK	90
9. LITERATURA	91

Predgovor

Mašine jednosmjerne struje su jedne od najstarijih električnih mašina koje su, posebno u prošlosti, imale brojne primjene i kao motori i kao generatori električne energije. Njihov razvoj doveo je do revolucionarizacije industrije i označio početak široke primjene električnih mašina u mnogim sferama ljudskog života. Iako su razvojem sinhronih i asinhronih mašina, mašine jednosmjerne struje potisnute iz pojedinih grana industrije, principi rada mašina jednosmjerne struje su bazični i univerzalni i predstavljaju osnovu za razumijevanje kako sinhronih tako i asinhronih mašina.

Mašine jednosmjerne struje se najčešće koriste kao dio električnog pogona. Električni pogoni mogu biti regulisani ili neregulirani. Kod regulisanog pogona ključni zadatak, ali i najstrožiji dio projektovanja istog, predstavlja dizajniranje pogodnog regulatora. Da bi pogon bio efikasan neophodno je da regulator bude pouzdan, brz i da obezbjeđuje stabilan rad svih komponenti pogona. Zbog toga je neophodno odabrati odgovarajući tip regulatora za dati pogon, a zatim i tačno proračunati parametre regulatora čime se obezbjeđuje stabilan i efikasan rad cjelokupnog pogona.

Ovaj rad se bavi predlogom novih struktura regulatora i novih algoritama za estimaciju parametara regulatora u pogonu sa motorom jednosmjerne struje. U radu se testira primjena novog meta-heurističnog algoritma - *Arithmetic Optimization Algorithm* za estimaciju parametara regulatora koji su konvencionalno upotrebljavani u ovoj oblasti. Međutim, pomenuti optimizacioni algoritam je primjenjen i za estimaciju parametara regulatora koji nisu tradicionalno korišteni u ovoj oblasti. Takođe, u ovom radu je *Arithmetic Optimization Algorithm* modifikovan primjenom haotičnih mapa u cilju dodatnog poboljšanja performansi. Novi algoritam - *Chaotic Arithmetic Optimization Algorithm* je primjenjen za estimaciju parametara regulatora kao i inicijalni *Arithmetic Optimization Algorithm*. U radu su za estimaciju parametara korištene najčešće upotrebljavane kriterijumske funkcije, ali i njihove modifikovane, nove, verzije. U radu je izložena i statistička analiza rezultata dobijenih primjenom modifikovane verzije *Arithmetic Optimization Algorithm-a*. Pored ove analize izvršena je i analiza robustnosti *Chaotic Arithmetic Optimization Algorithm-a* za sve korišćene tipove regulatora. U radu su izložena i dosadašnja dostignuća u ovoj oblasti i prikazana analiza do sada postignutih rezultata.

Rezime

Ovaj magistarski rad se bavi predlogom novih tipova regulatora, novih regulacionih struktura i novih optimizacionih metoda za estimaciju parametara regulatora u pogonima sa motorom jednosmjerne struje.

U regulisanim pogonima sa motorima jednosmjerne struje kao regulator je najčešće korišćen PID (*Proportional – Integrated – Derivative*) regulator. Zadnjih nekoliko godina se u funkciji regulatora u pogonima sa motorima jednosmjerne struje sve češće koristi i FOPID (*Fractional – Order - Proportional – Integrated – Derivative*) regulator koji predstavlja uopštenu varijantu PID regulatora. Međutim, u ovom radu su analizirani pogoni sa MJSS kako sa PID i FOPID regulatorima, tako i sa dvije nove strukture regulatora - TID (*Tilted – Integrated – Derivative*) i PIDD (*Proportional – Integrated – Double - Derivative*).

Parametri ova četiri regulatora su estimirani pomoću meta-heurističkog optimizacionog algoritma AOA (*Arithmetic Optimization Algorithm*). Osim toga, ovaj optimizacioni algoritam je i modifikovan na način što je integrisan sa deset haotičnih mapa. U radu su prikazani rezultati postignuti primjenom Gauss/mouse mape koja se pokazala kao najbolja sa stanovišta karakteristika odziva brzine i ponovljivosti rezultata. Takođe, testirana je robustnost ChAOA (*Chaotic Arithmetic Optimization Algorithm*) za estimaciju parametara PID, PIDD, TID i FOPID regulatora. Pored toga prikazana je i statistička analiza predloženog ChAOA algoritma aktivacijom svake od deset mapa i pokretanjem algoritma dvadeset puta u cilju estimacije parametara PID-a u pogonu sa MJSS.

Za estimaciju parametara pomenutih regulatora korištena je ITAE (*Integrated Time Absolute Error*) kriterijumska funkcija koja je najčešće korištena za estimaciju parametara regulatora u pogonima sa MJSS u literaturi. Pored ove kriterijumske funkcije korištena je i ITASE (*Integrated Time Absolute Square Error*) kriterijumska funkcija koja nema široku primjenu u ovoj oblasti, ali koja je, kako je u radu prikazano, uspješno integrisana sa AOA i ChAOA algoritmom za estimaciju parametara regulatora. Takođe, predložena je i nova kriterijumska funkcija IAEO (*Integrated Absolute Error Overshoot*) koja predstavlja modifikaciju IAE (*Integrated Absolute Error*) kriterijumske funkcije na način što u istoj figuriše i vrijednost preskoka.

U radu je dat i pregled literature i izvršena analiza dosadašnjih dostignuća u estimaciji parametara regulatora pogona sa MJSS. Sve regulacione strukture koje su predložene u radu su upoređene sa rezultatima iz literature. Takođe, izvršena je analiza svih dobijenih rezultata iz ugla vrijednosti kriterijumskih funkcija, ali i vrijednosti relevantnih parametara za procjenu performansi rada pogona kao što su preskok, vrijeme uspona i vrijeme smirenja. Na bazi svih rezultata pokazana je efikasnost primjene predloženog algoritma, njegove modifikovane varijante, kao i predloženih kriterijumskih funkcija i strukture regulatora.

Ključne riječi: motori jednosmjerne struje, regulatori, optimizacioni algoritam, kriterijumska funkcija

Abstract

The theme of this master thesis is a suggestion of new types of controllers, new regulation structures, and new optimization methods for estimation of parameters of controller in electric drive with the direct current motor.

The most frequently used type of controller in regulated electric drives with direct current motor is PID (*Proportional – Integrated – Derivative*). In the last couple of years, there has been an increase in the use of FOPID (*Fractional – Order - Proportional – Integrated – Derivative*) controller in drives with the direct current motor. FOPID controller represents a more generalized version of PID and has five instead of three parameters whose values need to be estimated. In this thesis, drives with PID and FOPID controllers have been analyzed, but also use of TID (*Tilted – Integrated – Derivative*) and PIDD (*Proportional – Integrated – Double - Derivative*) have been suggested and successfully tested in regulating the speed of the direct current motor.

Parameters of these four controllers have been estimated by using a meta-heuristic optimization algorithm AOA (*Arithmetic Optimization Algorithm*). This optimization algorithm has been modified by integrating AOA with ten chaotic maps. In this paper results that are shown correspond to results acquired by activating Gauss/mouse map. The robustness of ChAOA for estimating parameters of PID, PIDD, TID, and FOPID has been tested. In addition, statistical analysis of ChAOA has been executed and presented in a way that each of the ten chaotic maps has been activated and the algorithm run twenty times in order to estimate parameters of PID controller in drive with the direct current motor.

The criterion function that has been used for estimation of parameters of previously mentioned controllers was ITAE (*Integrated Time Absolute Error*), which is the most commonly used criterion function for estimating parameters of controllers in drives with the direct current motor. Also, ITASE (*Integrated Time Absolute Square Error*), which doesn't have frequent use in this area, has been successfully implemented and integrated with AOA and ChAOA for estimating the parameters of controllers. The new criterion function IAEO (*Integrated Absolute Error Overshoot*) has been suggested. This new criterion represents a modification of IAE (*Integrated Absolute Error*) criterion in a way that in the new criterion IAEO overshoot was integrated in order to minimize overshoot that appears during estimation of parameters of certain controllers.

In this thesis overview of the literature has been presented, too. All the suggested regulation structures have been compared with the ones from the literature and the analysis from the point of values of criterion as well as values of overshoot, rising, and settling time has been carried out. Based on all the results, the efficiency of the application of the proposed algorithm, its modified variant, as well as the proposed criterion functions and the structure of the controller are shown.

Key words: DC motor, controller, optimization algorithm, criterion function.

1. UVOD

Mašine jednosmjerne struje su jedne od najstarijih razvijenih električnih mašina koje su imale komercijalnu primjenu. Kao i sve električne mašine i one mogu da rade kao motori (motori jednosmjerne struje - MJSS) ili kao generatori (generatori jednosmjerne struje - GJSS).

Istorijski razvoj mašina jednosmjerne struje

Otkriće mašina jednosmjerne struje se povezuje sa velikim brojem naučnika koji su na različite načine doprinijeli teorijskom utemeljenju njihovog principa rada, razvoju konstrukcije i poboljšanju karakteristika. Najprije treba pomenuti istraživanja Orsteda, Gausa i posebno Faradeja, sa početka 19. vijeka. Otkriće Orsteda i Ampera da električna struja proizvodi magnetno polje dovelo je do niza eksperimenata u ovoj oblasti koji su u konačnom rezultirali razvojem prvih varijanti mašina jednosmjerne struje. Faradej je ispitujući rezultate Orsteda i Ampera o elektromagnetnoj sili prvi izveo eksperimente kojima je pokazao da se može formirati rotaciono kretanje provodnika sa strujom u magnetnom polju, a što je bio osnov za definisanje principa rada MJSS. Zbog toga se Faradej pominje kao jedna od ključnih figura u otkriću MJSS. Međutim, Faradejev motor je laboratorijski eksperiment i nije imao upotrebnu funkciju. Naučnik koji je unaprijedio Faradejev eksperiment je bio Džozef Henri, koji je deset godina kasnije napravio uređaj čiji je pokretni dio bio ravni elektromagnet koji se klatio na horizontalnoj osi. Polaritet elektromagneta se mijenjao njegovim rotiranjem kako su parovi žica sa krajeva magneta pravili kontakt sa dvije elektrohemijske ćelije. Dva stalna magneta su naizmjenično privlačila i odbijala krajeve elektromagneta čime se on klatio naprijed-nazad 75 puta u minuti. Iako je Henrijev uređaj poboljšao performanse Faradejevog eksperimenta, i dalje je ostao u domenu laboratorijskog eksperimenta bez mogućnosti za širu upotrebu. Godinu dana nakon Henrijevog eksperimenta Vilijam Sturdžon je osmislio komutator i sa njim i prvi rotacioni jednosmjerni motor. Sturdžonovo otkriće je dalje razvio Tomas Dejvenport koji je razvio prvi primjenjivi MJSS koji je i patentirao. Međutim Dejvenportov motor je bio finansijski neisplativ što je ograničilo njegovu primjenu. Ruski naučnik Jakobi fon Moriz je 1834. godine razvio rotacioni motor jednosmjerne struje velike snage sa kojim je postavio svjetski rekord. Jakobi je nakon toga kreirao motor još veće snage oborivši sopstveni rekord 1838. godine. Jakobijeva dostignuća su inspirisala druge naučnike da razvijaju MJSS većih snaga. Antonio Paćinoti je 1864. godine razvio armaturni prsten koji je unaprijedio dizajn MJSS jer je armaturni prsten prenosio struju kroz grupne namotaje. Komercijalnu upotrebu MJSS omogućio je motor koji je razvio Džulijen Spreig. Njegov motor je mogao da održi konstantnu brzinu pod različitim opterećenjima. Ovaj razvoj je doveo do veće potražnje i upotrebe MJSS [1].

MJSS imaju primjenu u industriji, električnoj vuči, automobilima, kao i uređajima koji se koriste u domaćinstvu. Glavni nedostaci primjene MJSS su visoka cijena, potreba za redovnim održavanjem i kraći vijek trajanja u odnosu na motore naizmjenične struje. Upravo to je dovelo do potiskivanja primjene MJSS u industriji, gdje nabrojane mane dolaze do izražaja. Uprkos tome, mašine jednosmjerne struje imaju kvalitetne regulacione karakteristike što je omogućilo njihovu široku primjenu kao motora manjih snaga i gdje je neophodan širok raspon regulacije brzine. Pored toga treba naglasiti da mašine jednosmjerne struje imaju veliki značaj za razumijevanje rotacionih mašina što samim tim uvijek opravdava i objašnjava aktuelnost bavljenja ovom temom tj. ovim mašinama [2-6].

Zadatak magistarskog rada

Električni pogon predstavlja sistem više energetske komponenti čiji je zadatak obavljanje nekog mehaničkog rada, ili proizvodnja električne energije. U praktičnim aplikacijama, električni motori su spregnuti sa prenosnikom, dok su napajani iz nekog izvora napajanja i regulisani kontrolerom [7, 8]. Glavni problem regulacije pogona je odabir adekvatnog regulatora i parametara regulatora. Zadatak ovog magistarskog rada tiče se odabira regulatora za pogone sa MJSS i projektovanja njegovih parametara.

Parametri regulatora mogu se odrediti klasičnim metodama, gdje se posebno ističe *Ziegel-Nichols* metoda. Međutim primjenom ove metode obavezno se pojavljuje povećan preskok regulisane veličine. U praksi se veoma često koristi i metod simetričnog optimuma. Glavni nedostatak ove metode jeste u tome što se za njenu primjenu vrše brojne aproksimacije u cilju svođenja reda prenosnih funkcija, a što se odražava na odziv regulisane veličine.

U naučnim publikacijama za rešavanje problema odabira parametara regulatora pogona sa MJSS koriste se brojni meta-heuristični algoritmi. Ovi algoritmi se primjenjuju jer omogućavaju brzo pronalaženje optimalnog rešenja problema na koji se primjenjuju. Pored toga meta-heuristični algoritmi ne zavise od početnih uslova i mogu pretraživati veliki opseg tj. veliki dijapazon vrijednosti promjenjivih. Regulatori koji se koriste za regulaciju brzine motora jednosmjerne struje su dominantno PID (*Proportional-Integrated-Derivative*) regulator i zadnjih par godina FOPID (*Fractional Order Proportional Integrated Derivative*) regulator. Postoji veliki broj radova koji se bave primjenom meta-heurističnih algoritama za pronalaženje parametara ovih regulatora sa ciljem postizanja što boljeg odziva pogona. Algoritmi koji su primjenjivani na pronalaženje parametara PID regulatora su *Opposition based Henry gas solubility optimization (OB/HGSO)* [9], *Henry gas solubility optimization (HGSO)* [9], *Harris Hawks Optimization (HHO)* [10], *Sine Cosine Algorithm (SCA)* [11], *Improved Sine Cosine Algorithm (ISCA)* [12], *Slime Mould Algorithm (SMA)* [13], *Salp Swarm Algorithm (SSA)* [14], *Gray Wolf Optimization (GWO)* [15], *Invasive Weed Optimization (IWO)* [16], *Particle Swarm*

Optimization (PSO) [17], *Stochastic Fractal Search (SFS)* [18], *Whale Optimization Algorithm (WOA)* [19], *Improved Whale Optimization Algorithm (IWOA)* [19], *Atom Search Optimization (ASO)* [20] i *Chaotic Atom Search Optimization (chASO)* [20]. Za pronalaženje parametara FOPID regulatora korišteni su *Gray Wolf Optimization (GWO)* [21], *Atom Search Optimization (ASO)* [20] i *Chaotic Atom Search Optimization (chASO)* [20]. Opisi korištenih algoritama i njihove primjene mogu se naći u [22-33].

Na osnovu pregleda literature jasno je da još uvijek nije pronađen najbolji algoritam za estimaciju parametara regulatora za regulaciju brzine motora jednosmjerne struje. U ovom radu će biti predložena primjena novog optimizacionog algoritma za pronalaženje parametara regulatora za regulaciju brzine motora jednosmjerne struje. Primjenjivost algoritma će biti testirana za pronalaženje parametara konvencionalno primjenjivanih regulatora, ali i na regulatore koji nisu korišteni u ovoj problematici.

Proces estimacije parametara regulatora se svodi na proces minimizacije funkcije cilja. Funkcija cilja, odnosno kriterijumska funkcija, predstavlja matematički zapis razlike željenog odziva i ostvarenog odziva. U literaturi su za tretiranje problematike estimacije parametara regulatora pogona sa MJSS korištene kriterijumske funkcije: minimiziranje integrala apsolutne greške (IAE), integrala kvadrata greške (ISE), integrala kvadrata greške pomnoženog sa vremenom (ITSE), integrala apsolutne greške pomnožene vremenom (ITAE), integrala proizvoda kvadrata vremena i kvadrata apsolutne greške (ISTSE), FD i ZGL [34, 35].

U ovom magistarskom radu biće predložena i testirana nova kriterijumska funkcija za estimaciju parametara regulatora. Štaviše, u radu će se predložiti i nove strukture regulatora za pogone sa MJSS. Osim toga, u radu će biti dat i pregled dosadašnjih istraživanja i upoređeni rezultati dobijeni novim regulacionim pristupima (nove strukture regulatora i novi optimizacioni algoritam) sa onim iz literature.

Organizacija rada

Rad je organizovan u devet poglavlja:

- ✚ Drugo poglavlje pruža osnovne informacije o MJSS u pogledu konstrukcije, principa rada i blok dijagrama;
- ✚ Treće poglavlje daje osnovne informacije o regulatorima u pogonima sa MJSS.
- ✚ U četvrtom poglavlju su predstavljene nove strukture regulatora za električne pogone sa MJSS, kao i novi algoritam za estimaciju parametara regulatora.
- ✚ U petom poglavlju predstavljena je haotična varijanta predloženog algoritma za estimaciju parametara regulatora u pogonima sa MJSS.
- ✚ U šestom poglavlju je izvršeno ispitivanje robustnosti sistema sa raznim strukturama regulatora.
- ✚ U sedmom poglavlju testirana je ponovljivost rezultata primjenom predloženog haotičnog algoritma.
- ✚ Na kraju, u Zaključku, dat je osvrt na cjelokupan rad i smjernice budućih istraživanja.

2. MAŠINE JEDNOSMJERNE STRUJE

Mašine jednosmjerne struje (slika 2.1) su rotacione mašine koje kao i druge električne mašine mogu da rade kao generatori ili motori. Kod generatora jednosmjerne struje (GJSS) ulazna veličina je mehanička snaga na osovini generatora, a izlazna veličina je električna snaga na priključnim krajevima. Motori jednosmjerne struje (MJSS) vrše obrnut proces konverzije energije - ulazna veličina je električna snaga, dok se na izlazu mašine dobija obrtni momenat na osovini motora (mehanička snaga).

2.1 Konstrukcija mašina jednosmjerne struje

Mašinu jednosmjerne struje čine nepokretni dio – stator i pokretni dio – rotor (slika 2.2).

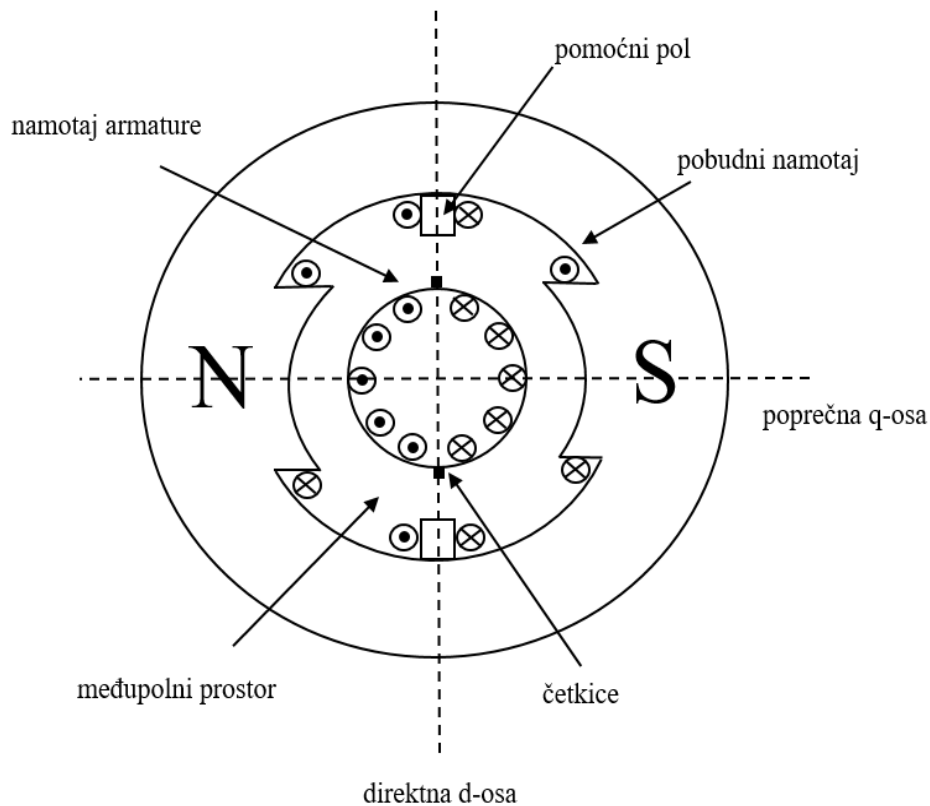
Stator čini jaram koji je najčešće od masivnog gvožđa. Kod konstrukcije mašina manjih snaga na jaram se lijepe (pričvršćuju) stalni magneti odgovarajućeg polariteta koji formiraju magnetno polje u mašini. Kod mašina većih snaga na jaram se kače polovi, koji se izvode slaganjem limova. Na polove se postavljaju namotaji koji se na odgovarajući način vežu u cilju definisanja smjera fluksa. Naime, propuštanjem jednosmjerne struje kroz namotaj na statoru (koji se još zove i pobudni), formira se magnetno polje u mašini [2,4].



Slika 2.1: Mašina jednosmjerne struje (preuzeto: www.pogoni.etf.rs)

Rotor je pokretni dio mašine i cilindričnog je oblika. Isti se formira aksijalnim slaganjem gvozdenih limova duž vratila mašine. U obod rotora se urezuju žljebovi u koje se postavlja namotaj rotora, koji se još naziva i namotaj armature. Namotaj armature je u kontaktu sa lamelama kolektora koji je postavljen na osovini rotora. Na kolektor se postavljaju grafitne četkice koje omogućavaju električnu vezu namotaja rotora i ostatka mašine [2,4].

Između statora i rotora se nalazi vazdušni procjep zahvaljujući kome je moguće obrtanje rotora. Vazdušni procjep je neuniforman, jer mašina jednosmjerne struje uvijek ima istaknute polove [2,4].



Slika 2.2: Šematski prikaz dvopolne mašine jednosmjerne struje

Prilikom opisa konstrukcije mašine jednosmerne struje treba pomenuti još i pomoćne polove koji se javljaju kod statora, a kroz čije namotaje teče struja armature. Ovi namotaji se koriste za poništavanje efekta reakcije armature, kao i za poboljšanje procesa komutacije. Kod mašina većih snaga mogu postojati i žljebovi za kompenzacioni namotaj kojim takođe protiče armaturna struja. Kompenzacioni namotaj se takođe koristi za djelimično poništavanje reakcije armature [2,4].

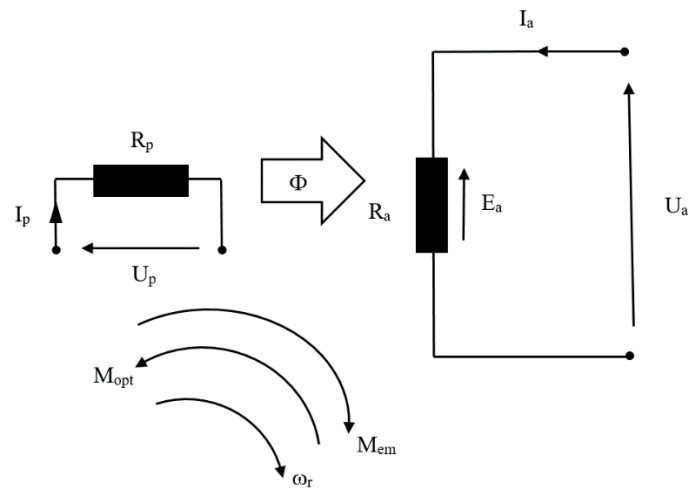
2.2 Osnovne jednačine i blok dijagram MJSS

Da bi mašina jednosmjerne struje radila kao motor neophodno je dovesti napon na namotaj pobude, a zatim postepeno dovesti i napon na namotaj armature. U motornom režimu rada, struja koja protiče kroz namotaj armature dovodi do stvaranja elektromagnetskog momenta koji pokreće rotor, a samim tim i opterećenje na osovini motora [2,4].

Kako se rotor rotira u magnetnom polju statora dolazi do indukovanja elektromotorne sile u njegovim namotajima. Naponska jednačina MJSS ima sljedeći oblik:

$$U = E + R_a I_a + dU_c \cong E + R_a I_a, \quad (2.1)$$

gdje je E indukovana elektromotorna sila, R_a otpornost armature, I_a struja armature, a dU_c pad napona na četkicama. Grafički prikaz razvoja momenta, brzine, kao i svih električnih veličina dat je na slici 2.3.



Slika 2.3: Šematski prikaz motornog režima rada

MJSS imaju odlične regulacione karakteristike koje su posledica raspregnutog formiranja fluksa i momenta u mašini. Na bazi toga, brzina MJSS, koja ima oblik:

$$\omega_r = \frac{U - R_a I_a}{k\Phi}, \quad (2.2)$$

može se regulisati na nekoliko načina – preko napona armature, preko fluksa, ili preko dodavanja otpora u kolo armature.

Međutim, prethodna naponska jednačina predstavlja naponsku jednačinu u stacionarnom stanju. Da bi se u potpunosti opisala i dinamika mašine, mora se uzeti u obzir i efekat induktivnosti namotaja rotora. Samim tim naponska jednačina ima sljedeći oblik:

$$U = L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + E. \quad (2.3)$$

Za konstantnu vrijednost fluksa, elektromotorna sila se može proračunati na sljedeći način:

$$E = K_b \frac{d\theta}{dt} = K_b \omega. \quad (2.4)$$

Mehanička jednačina kretanja rotora mašine je:

$$M_{em} - M_{opt} - B\omega = J \frac{d\omega}{dt} = M_{ubr}, \quad (2.5)$$

gdje je M_{em} elektromagnetni moment, M_{opt} moment opterećenja, J moment inercije, B koeficijent trenja, a ω brzina obrtanja.

Elektromagnetni moment mašine je, pri konstantnom fluksu u mašini, srazmjern struji armature:

$$M_{em} = KI_a(s). \quad (2.6)$$

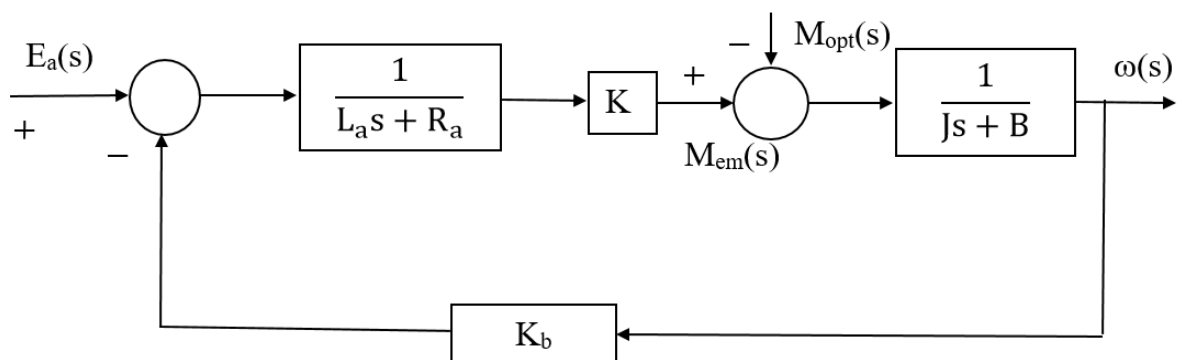
Prethodne jednačine prevedene u Laplasov domen imaju sljedeći oblik:

$$E(s) = K_b \omega(s), \quad (2.7)$$

$$U(s) = (L_a(s) + R_a)I_a(s) + E(s), \quad (2.8)$$

$$M_{em}(s) - M_{opt}(s) = (Js + B)\omega(s). \quad (2.9)$$

Koristeći prethodne jednačine može se nacrtati blok dijagram motora na čijem ulazu je napon napajanja, a na izlazu brzina obrtanja (slika 2.4).



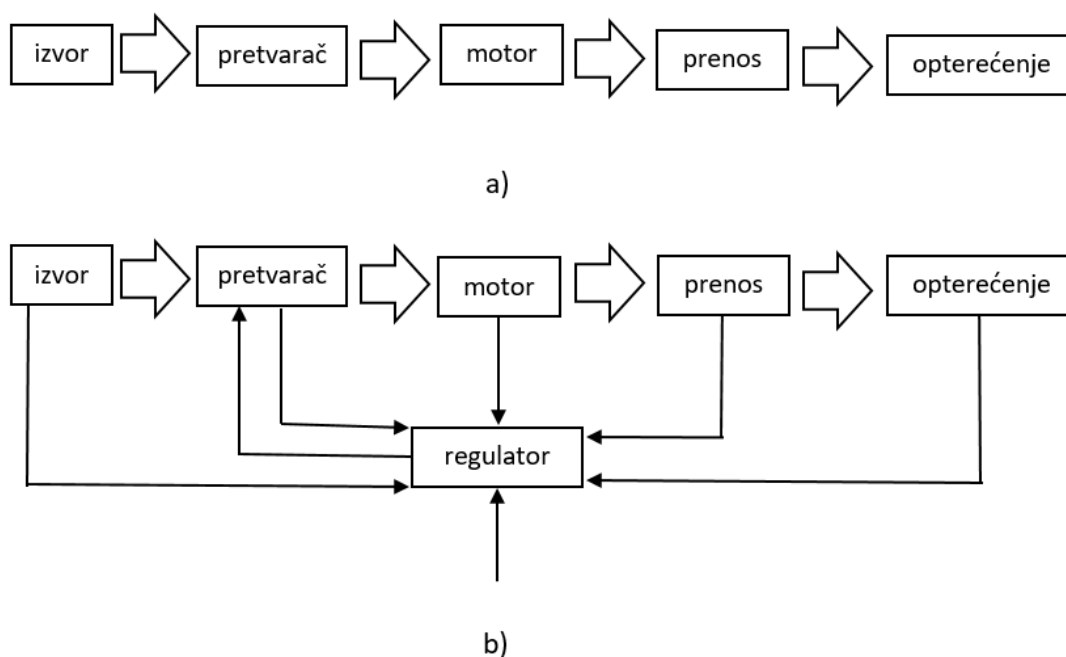
Slika 2.4: Blok dijagram MJSS

3. REGULATORI U POGONU SA MJSS

Električni pogon predstavlja sistem koji vrši konverziju električne energije u mehaničku, ili obratno. Električni pogoni imaju niz prednosti u odnosu na ostale vidove pogona. Pomenute prednosti se prije svega odnose na širok dijapazon snaga i brzina, prilagodljivost različitim radnim uslovima, dobrim upravljačkim karakteristikama, izdrživošću na preopterećenja, velikom vijeku trajanja, i, što je danas posebno aktuelno, isti su ekološki i minimalno zagađuju životnu sredinu [7, 8].

Električni pogoni se dijele na regulisane i neregulisane (slika 3.1), u zavisnosti da li postoji centralni regulacioni uređaj. Elementi koji čine strukturu električnog pogona su izvor energije, energetski pretvarač, električni motor, mehanički prenosnik i regulacioni sistem.

Izvor električne energije je danas uglavnom trofazni ili jednofazni, ali postoje i realizacije gdje kao izvor figuriše jednosmjerni napon, npr. akumulatorske baterije.



Slika 3.1: Šematski prikaz a) neregulisanog i b) regulisanog pogona

Energetski pretvarač ima ulogu prilagođenja električne energije izvora na vrijednosti koje su pogodne za rad motora. Prilagođenje se može odnositi na djelovanje na napon, frekvenciju, struju ili broj faza. Djelovanjem na ove vrijednosti utiče se na sam rad motora tj. vrši se upravljanje pogonom. U prošlosti su se kao energetski pretvarači koristili generatori i transformatori. U savremenim pogonima tu ulogu su preuzeli uređaji energetske elektronike na bazi tiristora i drugih vrsta poluprovodničkih pretvarača. Kod MJSS tu se prije svega koriste ispravljači i čoperi.

Mehanički prenosnik prilagođava i prenosi brzinu i momenat. U mehaničke prenosnike spadaju kajišni i zupčasti prenosnici sa fiksnim prenosnim odnosom, prenosnici sa promjenjivim prenosnim odnosom i prenosnici rotacionog kretanja u translatorno.

Regulacioni sistem, koji je od fokusa u ovom radu principijelno funkcioniše na način što se na ulaz regulacionog sistema dovode signali senzora i referentni signali. Na bazi tih ulaznih signala računa se signal greške, koji se dalje obrađuje po primijenjenom upravljačkom algoritmu da bi se dobio upravljački signal koji djeluje najčešće na energetski pretvarač kojim se napaja mašina. Pored ovakve realizacije postoje i izvedbe gdje se direktno djeluje na energetski pretvarač u pogonima bez regulatora ili izvedbe gdje se vrši kaskadno ili ugniježdeno upravljanje gdje je jedan upravljački signal ulazni signal drugom regulatoru i sl.

3.1. Opšte informacije o regulatorima

Uloga regulatora u pogonu je da u skladu sa definisanim algoritmom tj. zakonom upravljanja obrađuje regulaciono odstupanje (signal greške) djelujući pomoću izvršnog elementa na sami proces, odnosno pogon. Samim tim jedan od glavnih zadataka prije implementacije upravljanja jeste projektovati regulator sa stanovišta njegove strukture, a koji će omogućiti kvalitetne performanse sistema bez narušavanja robustnosti [7, 8].

Primjenom linearnih zakona upravljanja, koji predstavljaju najstarije i najrasprostranjenije metode upravljanja, omogućava se uspješno rešavanje većine upravljačkih problema. Pored toga, praktična implementacija linearnih zakona upravljanja je uglavnom moguća na jednostavan i pristupačan način. Linearnim zakonima upravljanja moguće je postići tri dejstva - proporcionalno, integralno i diferencijalno.

Proporcionalno dejstvo (proporcionalni regulator - P) određuje veličinu statičke greške sistema. Međutim, prevelika vrijednost pojačanja tj. proporcionalnog dejstva može dovesti do nestabilnosti sistema.

Integralno dejstvo (integralni regulator - I) povezuje grešku sa brzinom promjene upravljačke promjenjive. Integralnim dejstvom se povećava inertnost sistema, tj. sistem sporije reaguje na spoljašnje uticaje i otklanja grešku rada sistema u stacionarnom stanju. Ipak, integralno dejstvo može dovesti i do destabilizacije sistema usljed kašnjenja dejstva.

Diferencijalnim dejstvom (diferencijalni regulator - D) se prati brzina promjene signala greške. Diferencijalnim dejstvom se omogućava kočenje sistema tj. usporava promjena odziva kada signal greške opada i isto djelovanje je izraženije što je opadanje greške brže.

3.2. Pregled postojećih regulatora u pogonima za regulaciju brzine MJSS

Regulatori koji su do sada imali najširu primjenu u regulaciji MJSS su bili PID regulatori. Njihova jednostavnost, mala cijena i kvalitetan odziv koji postižu su glavni razlozi za njihovu rasprostranjenu primjenu [36-47].

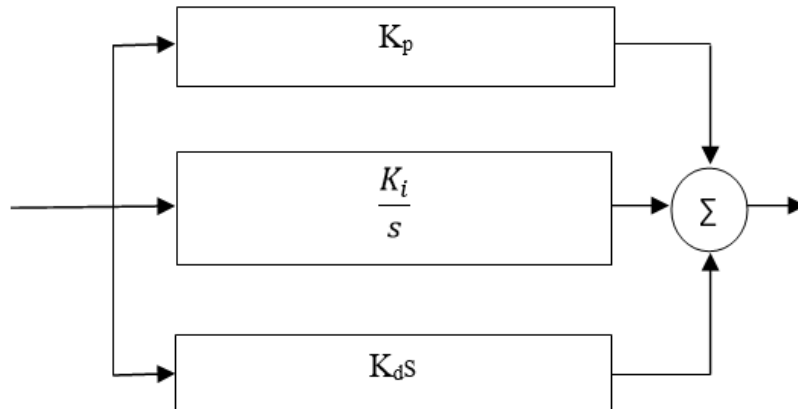
PID regulatori imaju tri podesiva parametra: pojačanje, integralnu vremensku konstantu i diferencijalnu vremensku konstantu. PID regulator u sebi objedinjuje proporcionalno,

integralno i diferencijalno dejstvo što omogućava postizanje kvalitetnih performansi u pogledu brzine reagovanja, stabilnosti, tačnosti rada kao i trajanja prelaznog procesa.

Prenosna funkcija PID regulatora je:

$$G_{PID} = K_p + K_i s^{-1} + K_d s \quad (3.1)$$

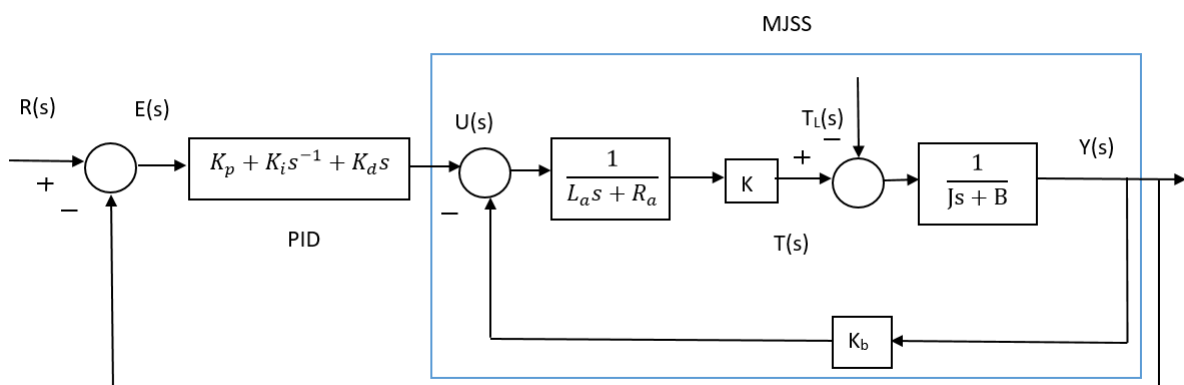
Šema PID regulatora prikazana je na slici 3.2.



Slika 3.2: Šema PID regulatora

Na slici 3.3. je predstavljen blok dijagram MJSS sa PID regulatorom. Prenosna funkcija ovog sistema je:

$$G_{DC-PID} = \frac{K(K_d s^2 + K_p s + K_i)}{((L_a + R_a)(J s + B) + K_b K) s + K(K_d s^2 + K_p s + K_i)} \quad (3.2)$$



Slika 3.3: Blok dijagram MJSS s PID regulatorom

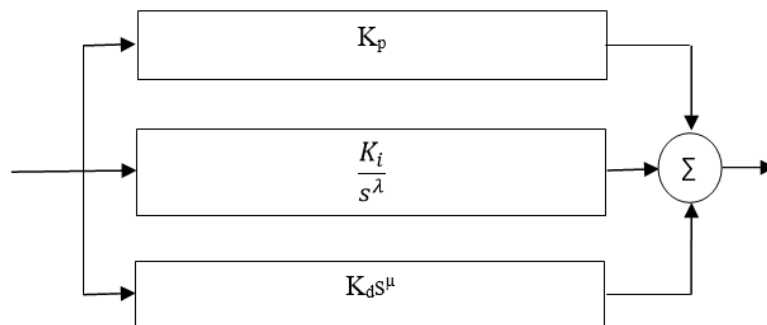
Posljednjih godina umjesto PID regulatora u rešavanju problema regulacije brzine jednosmjernih motora koriste se i FOPID regulatori. Ovaj tip regulatora predstavlja uopšteniju varijantu tradicionalnog PID-a koja implementira necjelobrojni izvod i integral. FOPID

regulatori imaju još dva dodatna podesiva parametra u odnosu na PID regulatore, tj. parametre λ i μ koji se odnose na stepen necjelobrojne integracije i stepen necjelobrojne diferencijacije.

Prenosna funkcija FOPID-a je:

$$G_{FOPID} = K_p + K_i s^{-\lambda} + K_d s^\mu \quad (3.3)$$

Šema FOPID regulatora je prikazana na slici 3.4.

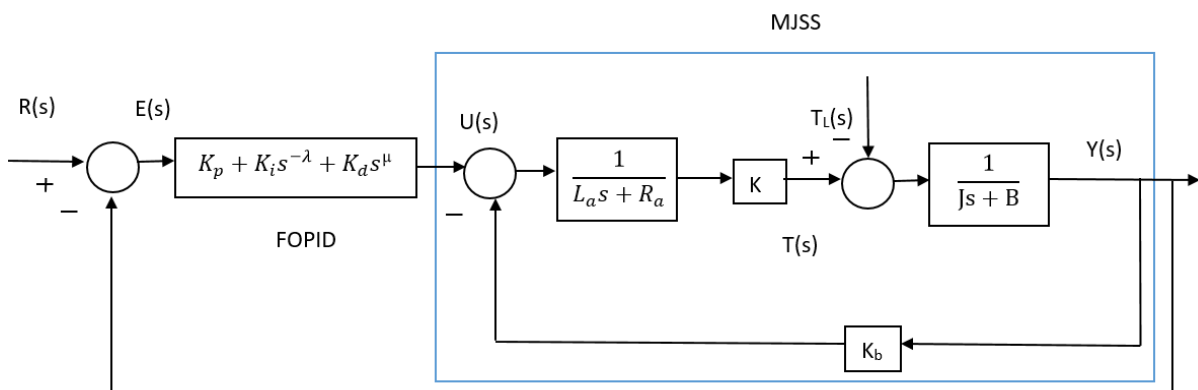


Slika 3.4: Šema FOPID regulatora

Na slici (3.5) je predstavljen blok dijagram MJSS sa FOPID regulatorom, prenosna funkcija ovog sistema je:

$$G_{DC-FOPID}(s) = \frac{K(K_d s^{\lambda+\mu} + K_p s^\lambda + K_i)}{((Js + B)(L_a s + R_a) + K_b K) s^\lambda + K(K_d s^{\lambda+\mu} + K_p s^\lambda + K_i)} \quad (3.4)$$

Kao što je ranije pomenuto FOPID regulator predstavlja uopšteniju verziju PID regulatora - tj. uočava se da kada se za vrijednosti λ i μ usvoji 1 dobiće se PID regulator.



Slika 3.5: Blok dijagram MJSS s FOPID regulatorom

Pored PID-a i FOPID-a u regulaciji brzine jednosmjernih mašina ranije su se koristili PI i PD regulatori. Postoje takođe i primjene fuzzy logike i *deep learning*-a u svrhe regulacije brzine DC motora.

3.3. Simulacioni rezultati – pregled literature

U ovom potpoglavlju će biti upoređeni step odzivi brzine pogona sa MJSS sa parametrima regulatora koji su estimirani primjenom različitih meta-heurističnih optimizacionih algoritama iz literature. Parametri MJSS koji se razmatra su dati u Tabeli 3.1.

Tabela 3.1 - Parametri MJSS

R_a	0.4Ω
L_a	2.7H
J	0.0004kg.m ²
B	0.0022N.m.s/rad
K	0.015N.m/A
K_b	0.05V.s

Optimizacioni algoritmi koji su primjenjivani za pronalaženje parametara regulatora pogona sa MJSS su: *Opposition based Henry gas solubility optimization (OB/HGSO)* [9], *Henry gas solubility optimization (HGSO)* [9], *Harris Hawks Optimization (HHO)* [10], *Sine Cosine Algorithm (SCA)* [11], *Improved Sine Cosine Algorithm (ISCA)* [12], *Slime Mould Algorithm (SMA)* [13], *Salp Swarm Algorithm (SSA)* [14], *Gray Wolf Optimization (GWO)* [15], *Invasive Weed Optimization (IWO)* [16], *Stochastic Fractal Search (SFS)* [18], *Particle Swarm Optimization (PSO)* [17], *Whale Optimization Algorithm (WOA)* [19], *Improved Whale Optimization Algorithm (IWOA)* [19], *Atom Search Optimization (ASO)* [20] i *Chaotic Atom Search Optimization (chASO)* [20]. Regulatori koji su korišteni u pogonu sa MJSS su PID i FOPID regulatori.

Kriterijumska funkcija koja je najviše primjenjivana u naučnim publikacijama, za ovaj optimizacioni problem, je integral apsolutne greške pomnožene vremenom (engl. *integral time absolute error – ITAE*) čija je matematička formulacija:

$$ITAE = \int t|e(t)|dt \quad (3.5)$$

gdje je t – vrijeme, $e(t)$ – greška, tj. razlika referentne i stvarne brzine MJSS.

Pored ove kriterijumske funkcije korišteni su i integral kvadrata greške (engl. *integral square error – ISE*)

$$ISE = \int e(t)^2 dt \quad (3.6)$$

i integral proizvoda kvadrata vremena i kvadrata apsolutne greške (engl. *integral squared time and absolute error – ISTAE*) :

$$ITSAE = 1000 \times \int t^2 e(t)^2 dt \quad (3.7)$$

Rezultati komparativne analize za parametre regulatora iz naučnih publikacija koje se bave ovom oblašću su prikazani u Tabeli 3.2.

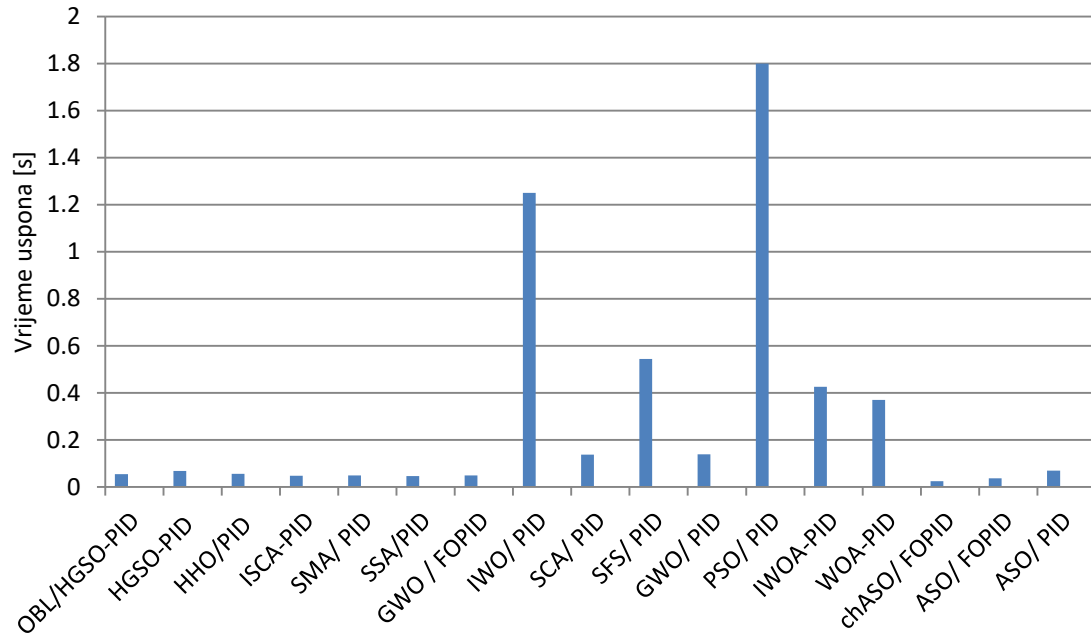
Na osnovu dobijenih rezultata može se izvesti nekoliko zaključaka:

- Pokazuje se da je preskok eliminisan za algoritme OBL/HGSO, HGSO, HHO, ISCA, SMA, SFS i ASO. Za algoritme SSA, GWO, SCA i chASO se javlja preskok manji od 1%. Treba naglasiti da GWO FOPID ima bolje vrijednosti za sva tri razmatrana parametra u odnosu na GWO PID. ASO PID daje bolje rezultate u pogledu preskoka u odnosu na ASO FOPID, ali treba uočiti da su vremena smirenja i uspona za primjenu ASO FOPID-a znatno poboljšana.
- U pogledu vremena uspona najbolji rezultat takođe daje chASO/FOPID u vrijednosti od 0.0262s; zatim slijedi vrijeme uspona od 0.0386s ASO FOPIDA. Algoritmi ISCA PID, SMA PID, SFS PID, GWO FOPID imaju vrijednosti vremena uspona od oko 0.04s dok algoritmi OBL/HGSO PID i HHO PID imaju vrijeme uspona od oko 0.05s (Slika 3.6).
- Najbolje vrijeme smirenja postiže chASO/FOPID 0.0425s i za njim ASO/FOPID 0.0636s. Algoritmi za koje je vrijeme smirenja manje od 0.1s su OBL/HGSO PID, ISCA PID, SMA PID, SSA PID, GWO FOPID, SSA PID dok ostali algoritmi daju parametre za koje je vrijeme smirenja veće (Slika 3.7).
- Najbolje vrijednosti vremena uspona i smirenja postiže chASO/FOPID i za njim ASO/FOPID, dok se za oba algoritma javlja preskok reda 0.01% odnosno 0.1%, respektivno. Treba primijetiti da se primjenom ASO/PID postižu znatno lošiji rezultati što ilustruje primjenjivost haotičnih optimizacionih algoritama, ali i FOPID-a u cilju dobijanja boljih rezultata.
- Značaj izbora primijenjenog optimizacionog algoritma ogleda se u rezultatima dobijenim za primjenu ISCA i SMA koji daju minimalan ili gotovo nepostojeći preskok i konkurentne vrijednosti vremena smirenja i vremena uspona.

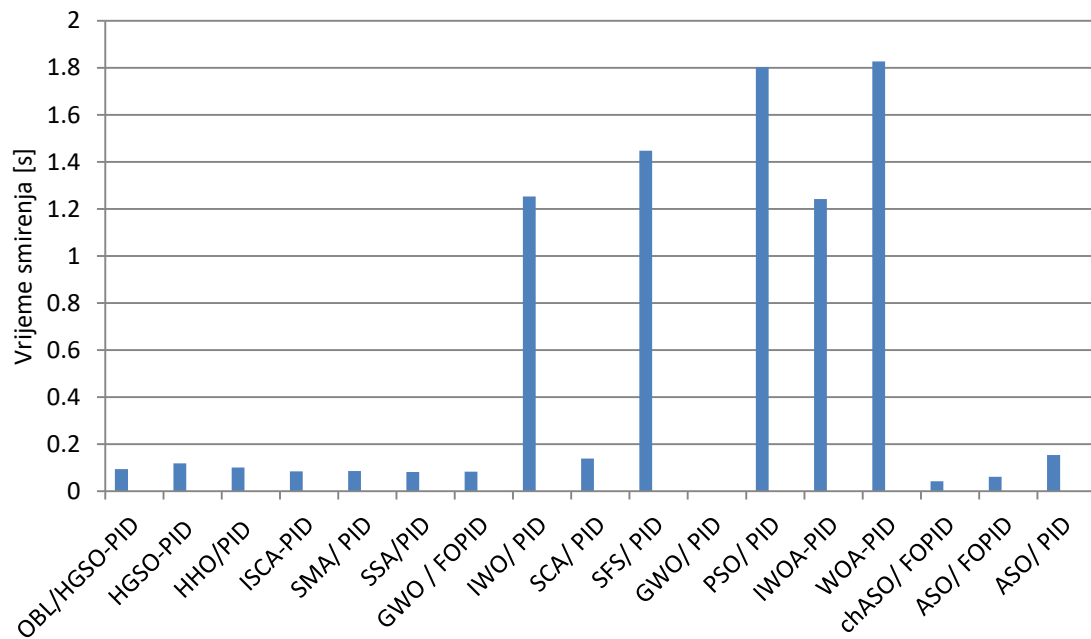
Na slici 3.8 su prikazani step odzivi koji se dobijaju primijenjenom PID regulatora, dok su na slici 3.9 prikazani step odzivi primijenjenih FOPID regulatora. Prikazane slike grafički potvrđuju prethodnu analizu o kvalitetu odziva brzine MJSS.

Tabela 3.2 - Rezultati komparativne analize

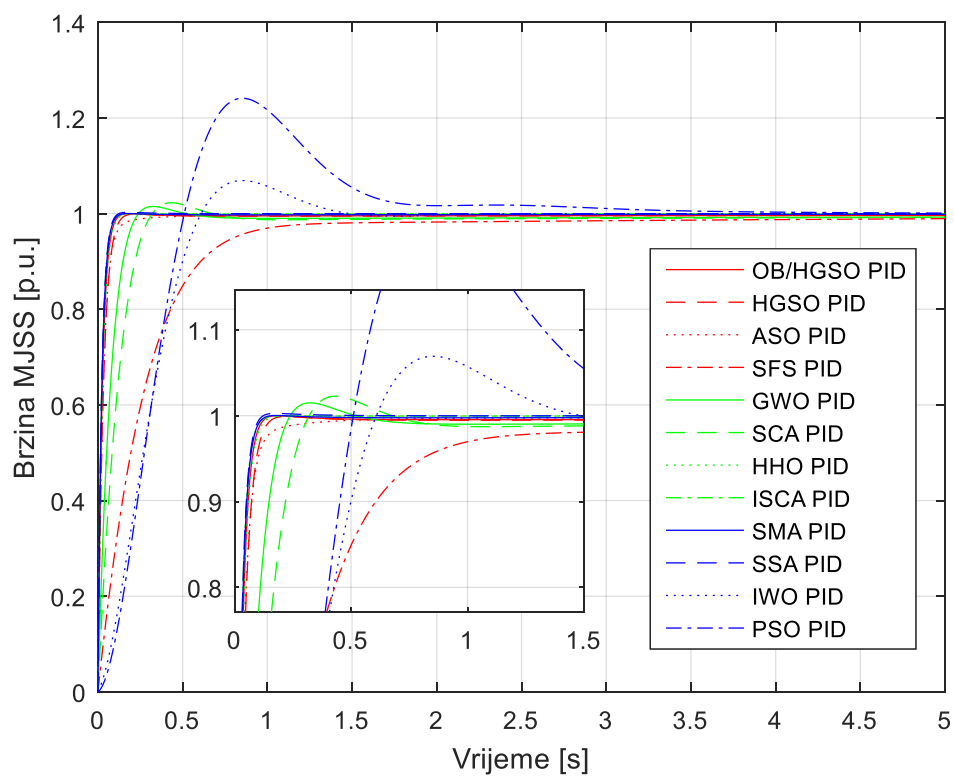
Optimizacioni algoritam i tip regulatora	Literatura	K_p	K_i	K_d	λ	μ	Preskok (%)	Vrijeme uspona (s)	Vrijeme smiraja (s)	Kriterijumska funkcija
OBL/HGSO-PID	[9]	16.9327	0.9508	2.8512			0	0.0546	0.0946	ITAE
HGSO-PID	[9]	13.4430	1.2059	2.2707			0	0.0684	0.1186	ITAE
HHO/PID	[10]	15.8581	3.6963	2.7732			0	0.0568	0.1003	ITAE
ISCA-PID	[12]	18.8156	4.7628	3.3181			0	0.0476	0.0846	ITAE
SMA/ PID	[13]	18.6458	2.5235	3.1921			0	0.0491	0.0857	ITAE
SSA/PID	[14]	19.5893	5.2483	3.2937			0.2580	0.0472	0.0811	ITSE
GWO / FOPID	[21]	18.3286	4.9418	3.2612	0.9998	0.9845	0.2969	0.0499	0.0833	ITAE
IWO/ PID	[16]	1.5782	0.4372	0.0481			6.9759	0.4189	1.2533	ISTAE
SCA/ PID	[11]	11.3163	0.5544	1.8072			0.192	0.0833	0.1382	ITAE
SFS/ PID	[18]	1.6315	0.2798	0.2395			0	0.5436	1.4475	ITAE
GWO/ PID	[15]	6.8984	0.5626	0.9293			1.5062	0.1388	0.2052	ITAE
PSO/ PID	[17]	1.5234	1.3801	0.0159			24.206	0.3560	1.8028	ITAE
IWOA-PID	[19]	1.5767	0.4297	0.0574			6.1968	0.4262	1.2418	ITAE
WOA-PID	[19]	1.4358	1.6726	0.0416			26.3018	0.3708	1.8268	ITAE
chASO/ FOPID	[20]	19.7722	9.1117	8.1189	0.8401	0.9112	0.0619	0.0262	0.0425	ITAE
ASO/ FOPID	[20]	19.3282	7.9728	4.7805	0.9755	0.9428	0.1560	0.0386	0.0636	ITAE
ASO/ PID	[20]	11.9437	2.0521	2.4358			0	0.0692	0.1535	ITAE



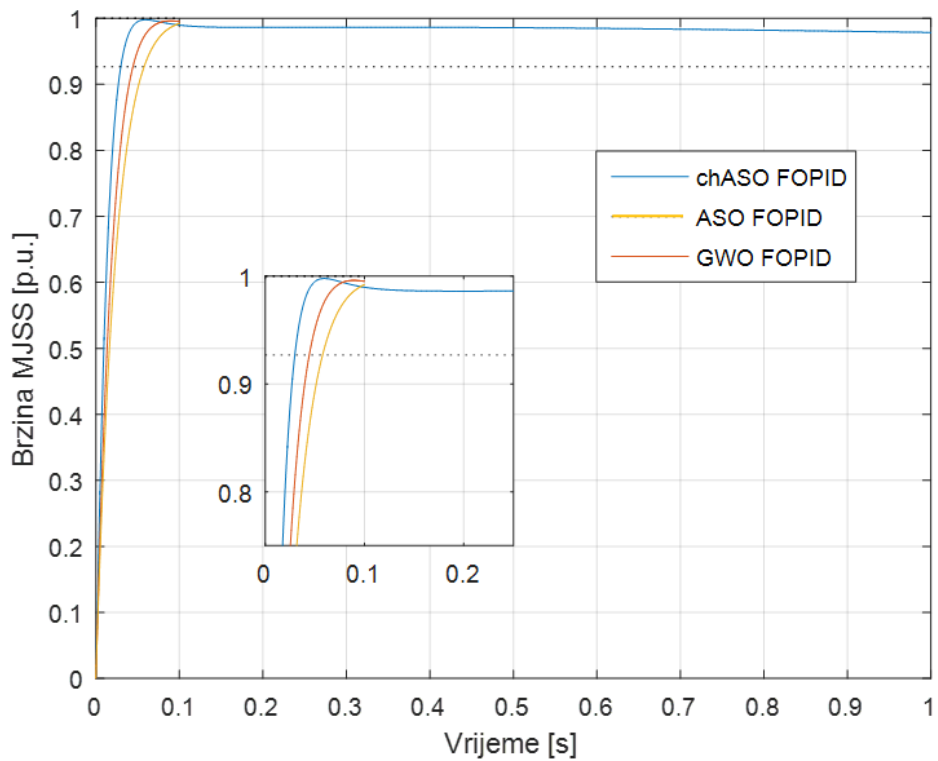
Slika 3.6: Vrijeme uspona za metode prikazane u Tabeli 3.2



Slika 3.7: Vrijeme smirenja za metode prikazane u Tabeli 3.2



Slika 3.8: Step odzivi PID regulatora



Slika 3.9: Step odzivi FOPID regulatora

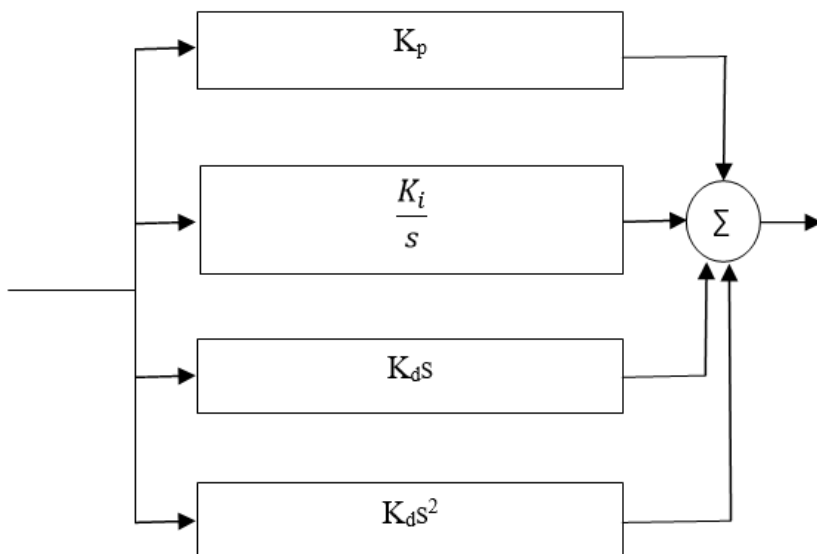
4. PREDLOG NOVIH STRUKTURA REGULATORA U POGONIMA SA MJSS I ALGORITMA ZA ESTIMACIJU NJIHOVIH PARAMETARA

U ovom poglavlju će biti predstavljene nove strukture regulatora za električne pogone sa MJSS, kao i novi algoritam - *Arithmetic Optimization Algorithm* (AOA) [48] za estimaciju parametara regulatora. Osim toga, u poglavlju će biti predstavljene i nove kriterijumske funkcije za estimacione procese.

4.1. Nove strukture regulatora u pogonima sa MJSS

Pored PID i FOPID regulatora koji su konvencionalno primjenjivani u pogonima sa MJSS u ovom radu je razmatrana primjena i TID (*Tilted-Integrated-Derivative*) i PIDD (*Proportional-Integrated-Double-Derivative*) regulatora [50,51].

PIDD regulator predstavlja varijantu PID regulatora koji ima dvostruki diferencijalni član. Na slici 4.1. je prikazana šema ovog regulatora.



Slika 4.1: Šema PIDD regulatora

Prenosna funkcija ovog regulatora je:

$$G_{PIDD} = K_p + K_i s^{-1} + K_d s + K_d s^2 \quad (4.1)$$

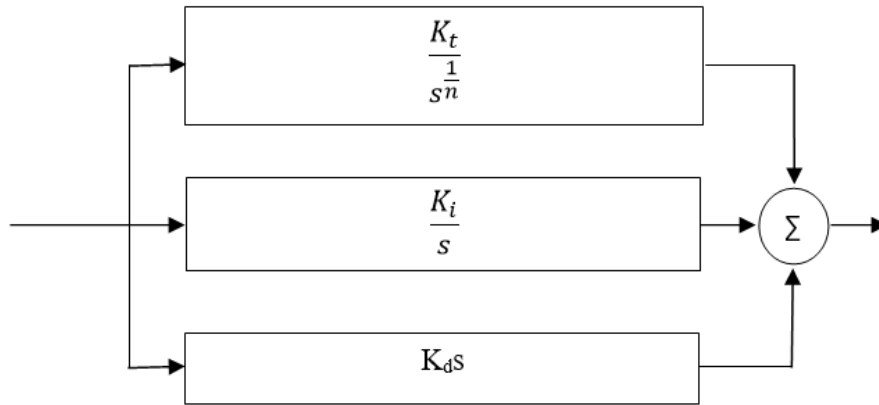
Koristeći prethodnu jednačinu može se izvesti jednačina za prenosnu funkciju pogona PIDD regulatora sa MJSS:

$$G_{DC-PIDD} = \frac{K(K_p + K_d s + K_d s^2 + K_i s^{-1})}{((B + Js)(R_a + L_a s) + KK_b) \left(\left(\frac{K(K_p + K_d s + K_d s^2 + K_i s^{-1})}{(B + Js)(R_a + L_a s) + KK_b} \right) + 1 \right)} \quad (4.2)$$

TID regulator je vrsta frakcionog regulatora iako je po strukturi sličan PID regulatoru. TID regulator umjesto proporcionalne komponente ima tiltovanu. Prenosna funkcija ovog regulatora je:

$$G_{TID} = K_t s^{-\frac{1}{n}} + K_i s^{-1} + K_d s \quad (4.3)$$

Šema TID regulatora je prikazana na slici 4.2.



Slika 4.2: Šema TID regulatora

Na osnovu prethodnog može se izvesti prenosna funkcija pogona TID regulatora sa MJSS:

$$G_{DC-TID} = \frac{K(K_d s + K_i s^{-1} + K_t s^{-\frac{1}{n}})}{((B + Js)(R_a + L_a s) + KK_b) \left(\frac{K(K_d s + K_i s^{-1} + K_t s^{-\frac{1}{n}})}{(B + Js)(R_a + L_a s) + KK_b} + 1 \right)} \quad (4.4)$$

4.2. AOA algoritam

Arithmetic Optimization Algorithm [48] je meta-heuristični algoritam koji koristi distribuirano ponašanje glavnih aritmetičkih operacija množenje (M), dijeljenje (D), oduzimanje (S) i sabiranje (A). U nastavku je dat pseudo-kod algoritma koji je primijenjen za nalaženje parametara regulatora pogona sa motorom jednosmjerne struje:

- 1: Inicijalizacija *Arithmetic Optimization Algorithm* za parametre α , μ .
- 2: Inicijalizacija nasumična pozicija rešenja. (Solutions: $i=1, \dots, N$.)
- 3: while ($C_{Iter} < M_{Iter}$) do
- 4: Računanje *Fitness Function* ($F F$) za data rešenja
- 5: Nalaženje najboljeg rešenja (Određivanje najboljeg dosadašnjeg rešenja).
- 6: Ažuriranje matematičkog optimizacionog akceleratora (MOA):

$$MOA(C_{Iter}) = Min + C_{Iter} \times \frac{Max - Min}{M_{Iter}} \quad (4.5)$$

- 7: Ažuriranje matematičkog optimizatora vjerovatnoće (MOP):

$$MOP(C_{Iter}) = 1 - \frac{C_{Iter}^{\frac{1}{\alpha}}}{M_{Iter}^{\frac{1}{\alpha}}} \quad (4.6)$$

- 8: for ($i=1$ u Rešenjima) do
- 9: for ($j=1$ u Pozicijama) do
- 10: Generisanje naizmjeničnih vrijednosti između $[0, 1]$ (r_1, r_2 , and r_3)
- 11: if $r_1 > MOA$ then
- 12: Faza pretrage
- 13: if $r_2 > 0.5$ then
- 14: (1) Primjena djelitelja (D “ ÷ ”).
- 15: Ažuriranje i -tih pozicija rešenja

$$x_{i,j}(C_{Iter} + 1) = best(x_j) \div (MOP + \epsilon) \times ((UB_j - LB_j) \times \mu + LB_j) \quad (4.7)$$

- 16: else
- 17: (2) Primjena množitelja (M “ × ”).
- 18: Ažuriranje i -tih pozicija rešenja

$$x_{i,j}(C_{Iter} + 1) = best(x_j) \times (MOP) \times ((UB_j - LB_j) \times \mu + LB_j) \quad (4.8)$$

- 19: end if
- 20: else
- 21: Faza pretrage
- 22: if $r_3 > 0.5$ then

23: (1) Primjena oduzimanja (S “ - ”).

24 Ažuriranje i -tih pozicija rešenja

$$x_{i,j}(C_{Iter} + 1) = best(x_j) - (MOP) \times ((UB_j - LB_j) \times \mu + LB_j) \quad (4.9)$$

25: else

26: (2) Primjena sabiranja (A “ + ”).

27: Ažuriranje i -tih pozicija rešenja

$$x_{i,j}(C_{Iter} + 1) = best(x_j) + (MOP) \times ((UB_j - LB_j) \times \mu + LB_j) \quad (4.10)$$

28: end if

29: end if

30: end for

31: end for

32: $C_{Iter} = C_{Iter} + 1$

33: end while

34: Vrati najbolje rešenje (x).

Ovaj algoritam je predstavljen u radu “*The Arithmetic Optimization Algorithm*“ [48]. Algoritam je upoređivan sa *Genetic Algorithm, Particle Swarm Optimization, Biogeography-based Optimization, Flower Pollination Algorithm, Grey Wolf Optimizer, Bat Algorithm, Firefly Algorithm, Cuckoo Search Algorithm, Moth-Flame Optimization, Gravitational Serach Algorithm* i *Differential Evolution*. Takođe AOA algoritam je testiran u rešavanju nekoliko inženjerskih problema iz oblasti mehanike i pokazao je izuzetne karakteristike po pitanju brzine konvergencije, ponovljivosti rezultata i efikasnosti.

4.3. Estimacija parametara PID regulatora

PID regulator u sebi objedinjuje proporcionalno, integralno i diferencijalno dejstvo. Zbog kvalitetnih regulacionih karakteristika, ali i relativno jednostavne implementacije, ovaj tip regulatora našao je široku primjenu u problemima regulacije brzine različitih pogona, pa tako i pogona sa MJSS.

Prenosna funkcija pogona sa MJSS sa PID regulatorom je:

$$G_{DC-PID} = \frac{K(K_d^2 + K_p s + K_i)}{((L_a + R_a)(Js + B) + K_b K)s + K(K_d^2 + K_p s + K_i)} \quad (4.11)$$

Kriterijumske funkcije koje su primjenjivane za pronalaženje parametara PID regulatora primjenom AOA algoritma u ovom magistarskom radu su *Integrated Time Absolute Error* (ITAE) i *Integrated Time Absolute Square Error* (ITASE). Jednačina ITAE kriterijumske funkcije je:

$$ITAE = \int t|e(t)|dt \quad (4.12)$$

Jednačina ITASE kriterijumske funkcije je:

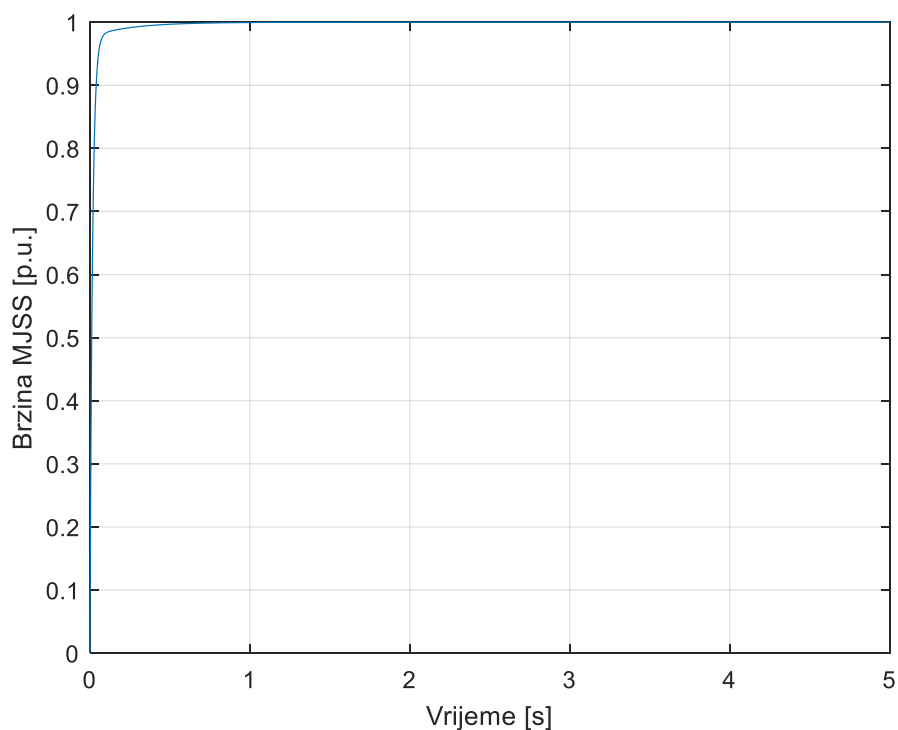
$$ITASE = \int t|e(t)|^2dt \quad (4.13)$$

ITAE kriterijum predstavlja integral proizvoda vremena i apsolutne greške, dok ITASE kriterijum predstavlja integral proizvoda vremena i kvadrata apsolutne greške.

Primjenom ITAE kriterijuma i AOA algoritma za pronalaženje parametara PID regulatora pogona sa MJSS dobijene su vrijednosti traženih parametara:

$$K_p=20, K_i=5.13894, K_d=4.64316.$$

Za ove parametre PID regulatora postiže se step odziv gdje je vrijednost preskoka 0%, vrijeme uspona 0.0363s i vrijeme smirenja 0.0854s. Na slici 4.3 je prikazan opisani step odziv, a prenosna funkcija sistema je data u jednačini (4.14).



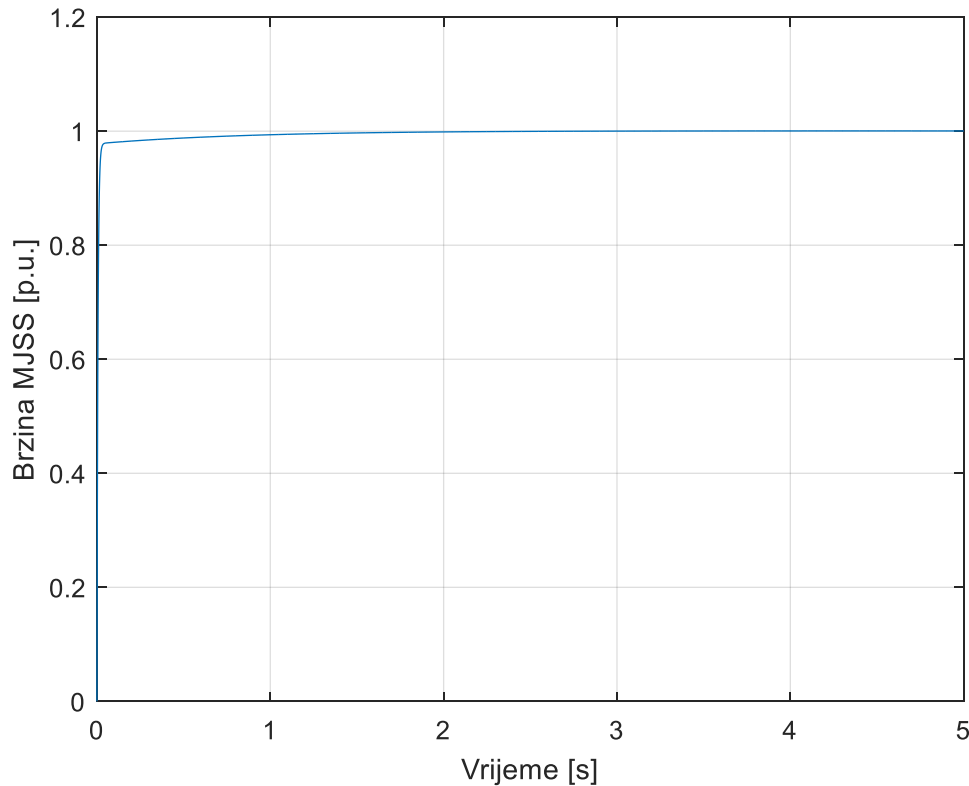
Slika 4.3: Step odziv sa parametrima $K_p=20$, $K_i=5.13894$, $K_d=4.64316$

$$G_{DC-PID} = \frac{0.06965 s^2 + 0.3 s + 0.07708}{0.00108 s^3 + 0.07575 s^2 + 0.3016 s + 0.07708} \quad (4.14)$$

Primjenom ITASE kriterijuma i AOA algoritma za pronalaženje parametara PID regulatora pogona sa MJSS dobijene su vrijednosti traženih parametara:

$$K_p=20, K_i=5.55421, K_d=13.489.$$

Za ove parametre PID regulatora postiže se step odziv gdje je vrijednost preskoka 0%, vrijeme uspona 0.0126s i vrijeme smirenja 0.0806s. Na slici 4.4 je prikazan opisani step odziv, a prenosna funkcija sistema je data jednačinom (4.15).



Slika 4.4: Step odziv sa parametrima $K_p=20$, $K_i=5.55421$, $K_d=13.489$

$$G_{DC-PID} = \frac{0.2023 s^2 + 0.3 s + 0.08331}{0.00108 s^3 + 0.2084 s^2 + 0.3016 s + 0.08331} \quad (4.15)$$

4.4. Estimacija parametara PIDD regulatora

Prenosna funkcija pogona sa MJSS sa PIDD regulatorom je:

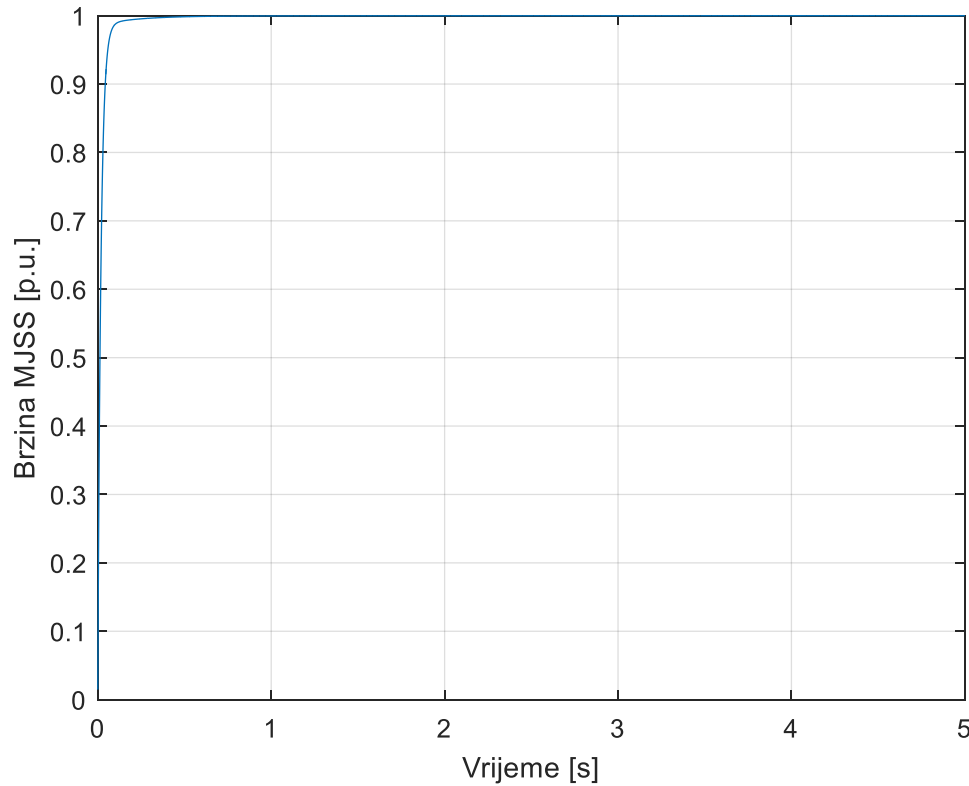
$$G_{DC-PIDD} = \frac{K(K_p + K_d s + K_{d2} s^2 + K_i s^{-1})}{((B + Js)(R_a + L_a s) + KK_b) \left(\frac{K(K_p + K_d s + K_{d2} s^2 + K_i s^{-1})}{(B + Js)(R_a + L_a s) + KK_b} + 1 \right)} \quad (4.16)$$

U ovom slučaju će se koristiti iste kriterijumske funkcije kao i kod određivanja parametara PID regulatora.

Primjenom ITAE kriterijuma i AOA algoritma za pronalaženje parametara PIDD regulatora pogona sa MJSS dobijene su sljedeće vrijednosti traženih parametara:

$$K_p=20, \quad K_i=5.02631, \quad K_d=4.02853, \quad K_{d2}=0.00107173.$$

Za ove parametre PIDD regulatora postiže se step odziv gdje je vrijednost preskoka 0%, vrijeme uspona 0.0414s i vrijeme smirenja 0.0822s. Na slici 4.5 je prikazan opisani step odziv, a prenosna funkcija sistema je data jednačinom (4.17).



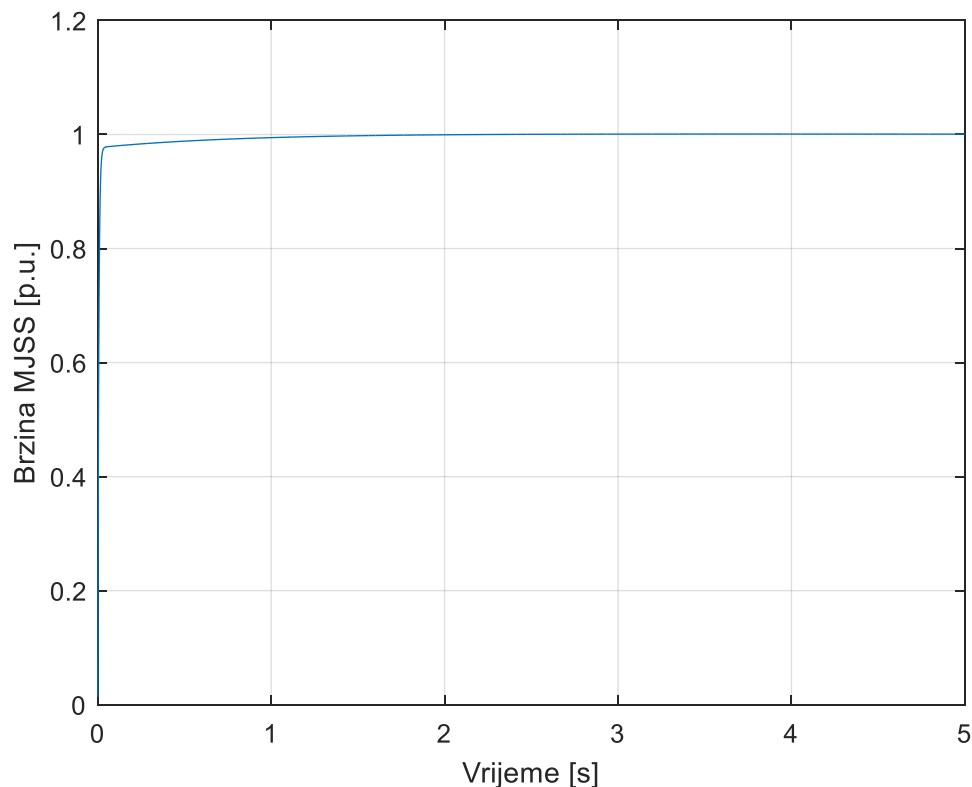
Slika 4.5: Step odziv sa parametrima $K_p=20$, $K_i=5.02631$, $K_d=4.02853$, $K_{d2}=0.00107173$

$$G_{DC-PIDD} = \frac{1.736 \times 10^{-8} s^6 + 6.536 \times 10^{-5} s^5 + 0.0006926 s^4 + 0.00201 s^3 + 0.0009489 s^2 + 0.0001229 s}{1.184 \times 10^{-6} s^6 + 7.854 \times 10^{-5} s^5 + 0.0007334 s^4 + 0.00203 s^3 + 0.0009516 s^2 + 0.0001229 s} \quad (4.17)$$

Primjenom ITASE kriterijuma i AOA algoritma za pronalaženje parametara PIDD regulatora pogona sa MJSS dobijene su sljedeće vrijednosti traženih parametara:

$$K_p=20; K_i=6.27889; K_d=12.6176; K_{d2}=0.001.$$

Za ove parametre PIDD regulatora postiže se step odziv gdje je vrijednost preskoka 0, vrijeme uspona 0.0137s i vrijeme smirenja 0.1168s. Na slici 4.6 je prikazan opisani step odziv, a prenosna funkcija sistema je data jednačinom (4.18).



Slika 4.6: Step odziv sa parametrima $K_p=20$, $K_i=6.27889$, $K_d=12.6176$, $K_{d2}=0.001$

$$G_{DC-PIDD} = \frac{1.62 \times 10^{-8} s^6 + 0.0002045 s^5 + 0.001479 s^4 + 0.00224 s^3 + 0.001064 s^2 + 0.0001535 s}{1.183 \times 10^{-6} s^6 + 0.0002177 s^5 + 0.001519 s^4 + 0.00226 s^3 + 0.001066 s^2 + 0.0001535 s} \quad (4.18)$$

4.5. Estimacija parametara FOPID regulatora

Prenosna funkcija pogona sa MJSS sa FOPID regulatorom je:

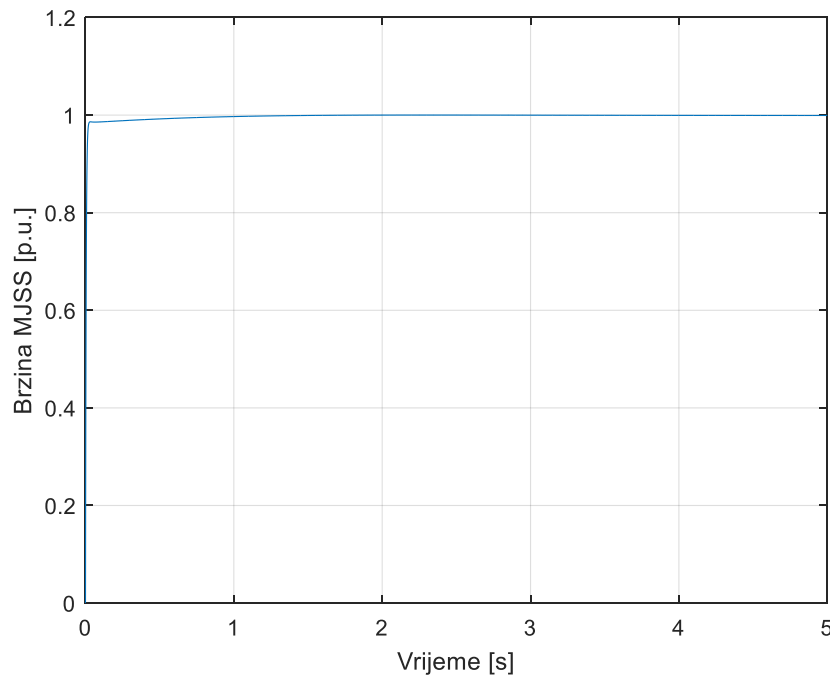
$$G_{DC-FOPID} = \frac{K(K_d^{\lambda+\mu} + K_p s^\lambda + K_i)}{((L_a + R_a)(Js + B) + K_b K)s^\lambda + K(K_d^{\lambda+\mu} + K_p s^\lambda + K_i)} \quad (4.19)$$

Primjenom ITAE kriterijuma i AOA algoritma za pronalaženje parametara FOPID regulatora pogona sa MJSS dobijene su sljedeće vrijednosti traženih parametara:

$$K_p=18.1138; K_i=20; K_d=20; \lambda=0.517179; \mu=0.979839.$$

Za ove parametre FOPID regulatora postiže se step odziv gdje je vrijednost preskoka 0.0083%, vrijeme uspona 0.0100s i vrijeme smirenja 0.0205s. Na slici 4.7 je prikazan opisani step odziv, a prenosna funkcija sistema je data jednačinom (4.20).

$$G_{DC-FOPID} = \frac{0.3s^{1.497} + 0.27171s^{0.51718} + 0.3}{0.00108s^{2.5172} + 0.0061s^{1.5172} + 0.3s^{1.497} + 0.27334s^{0.51718} + 0.3} \quad (4.20)$$



Slika 4.7: Step odziv sa parametrima $K_p=18.1138$, $K_i=20$, $K_d=20$, $\lambda=0.517179$, $\mu=0.979839$

S obzirom na to da se primjenom FOPID regulatora javlja mali preskok, u ovom slučaju, predložena je i nova kriterijumska funkcija koja je prilagođena smanjenju preskoka. Nova kriterijumska funkcija (IAEO) je opisana jednačinom (4.21):

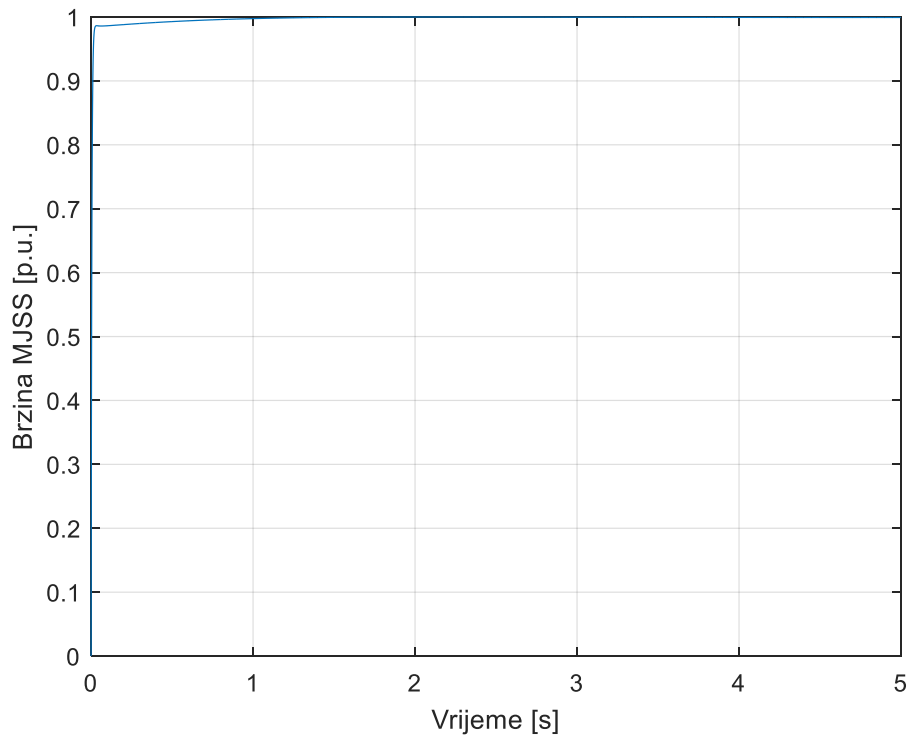
$$IAEO = \int (|e(t)| + 15O(t))dt \quad (4.21)$$

Kao što je uočljivo iz prethodne jednačine novi kriterijum predstavlja kombinaciju integrala apsolutne greške i preskoka (O). Nakon velikog broja pokušaja, testiranja i simulacija uzeto je da je član koji množi vrijednost preskoka optimalno pomnožiti sa konstantom 15.

Primjenom IAEO kriterijuma i AOA algoritma za pronalaženje parametara FOPID regulatora pogona sa MJSS dobijene su sljedeće vrijednosti traženih parametara:

$$K_p=20; K_i=20; K_d=19.386; \lambda =0.514386; \mu =0.979726;$$

Za ove parametre FOPID regulatora postiže se step odziv gdje je vrijednost preskoka 0%, vrijeme uspona 0.0103s i vrijeme smirenja 0.0210s. U odnosu na primjenu prethodnih kriterijumskih funkcija uočava se poboljšanje odziva u smislu preskoka, dok se vrijeme uspona i smirenja minimalno povećavaju. Na slici 4.8 je prikazan opisani step odziv, a prenosna funkcija sistema je data jednačinom (4.22).



Slika 4.8: Step odziv sa parametrima $K_p=20$, $K_i=20$, $K_d=19.386$, $\lambda =0.514386$, $\mu =0.979726$

$$G_{DC-FOPID} = \frac{0.29079s^{1.4941} + 0.3s^{0.51439} + 0.3}{0.00108s^{2.5144} + 0.0061s^{1.5144} + 0.29079s^{1.4941} + 0.30163s^{0.51439} + 0.3} \quad (4.22)$$

4.6. Estimacija parametara TID regulatora

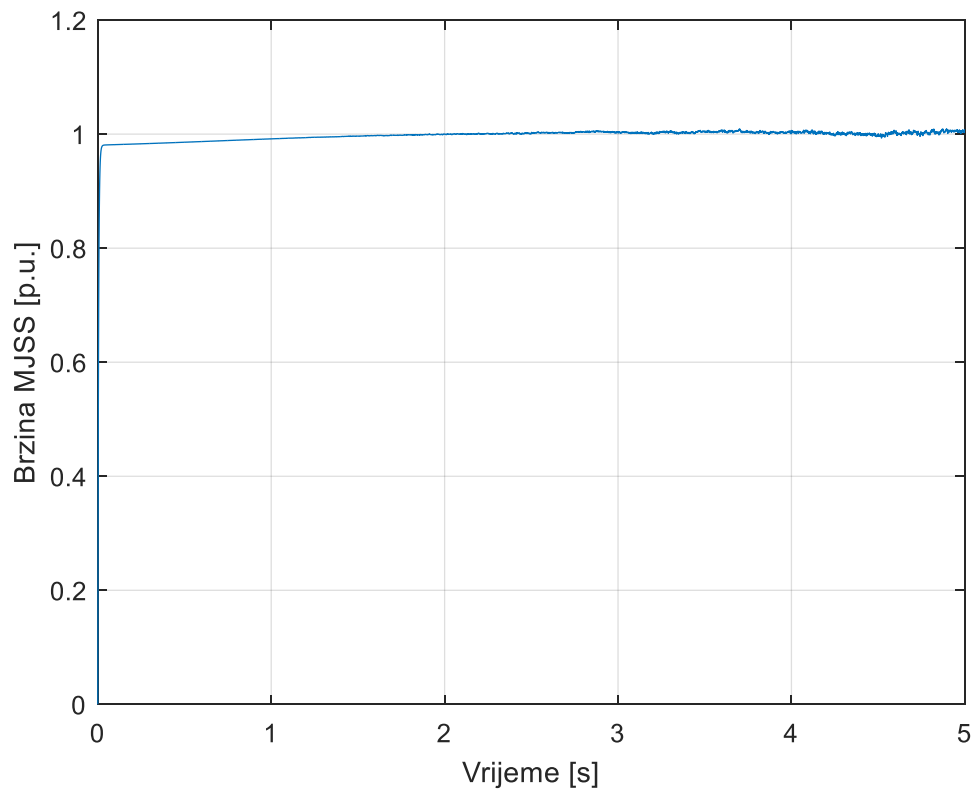
Prenosna funkcija pogona sa MJSS sa TID regulatorom je:

$$G_{DC-TID} = \frac{K \left(K_d s + K_i s^{-1} + K_t s^{-\frac{1}{n}} \right)}{\left((B + Js)(R_a + L_a s) + KK_b \right) \left(\frac{K \left(K_d s + K_i s^{-1} + K_t s^{-\frac{1}{n}} \right)}{(B + Js)(R_a + L_a s) + KK_b} + 1 \right)} \quad (4.23)$$

Primjenom ITASE kriterijuma i AOA algoritma za pronalaženje parametara TID regulatora pogona sa MJSS dobijene su sljedeće vrijednosti parametara:

$$K_t=20; K_i=2.43582; K_d=20; n=2.36893.$$

Za ove parametre TID regulatora postiže se step odziv gdje je vrijednost preskoka 0.4996%, vrijeme uspona 0.0096s i vrijeme smirenja 0.0286s. Na slici 4.9 je prikazan opisani step odziv.



Slika 4.9: Step odziv sa parametrima $K_t=20$, $K_i=2.43582$, $K_d=20$, $n=2.36893$

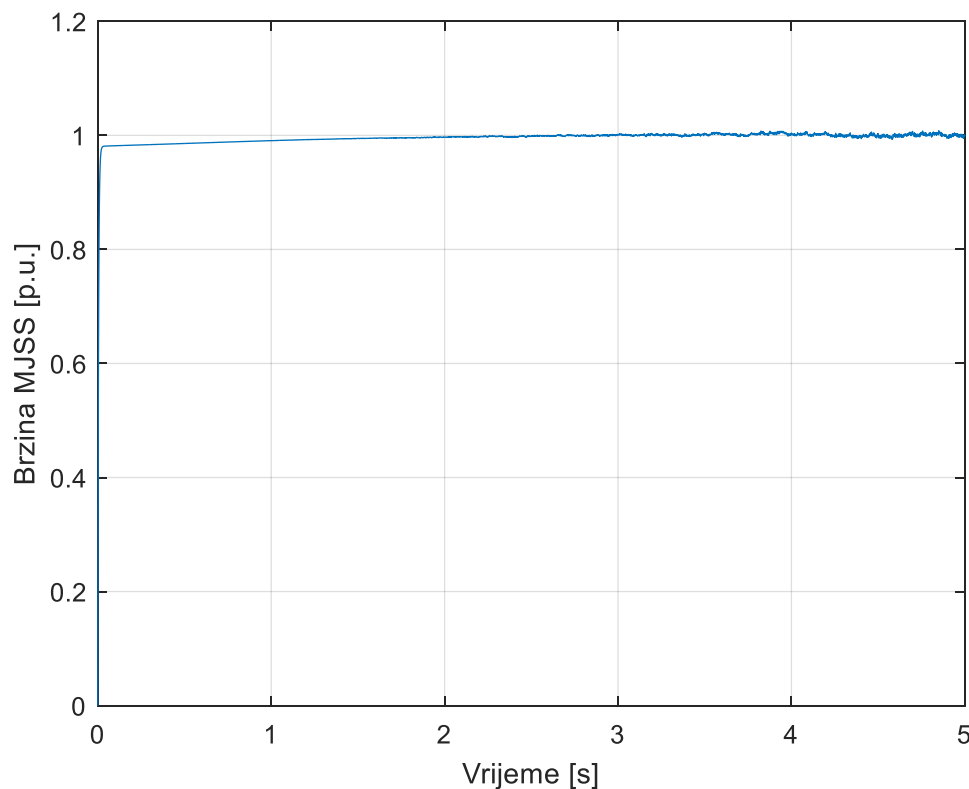
Prenosna funkcija sistema je data sljedećom jednačinom:

$$G_{DC-TID} = \frac{0.000324s^4 + 0.00183s^3 + 0.000324s^{2.5779} + 0.00052846s^2 + 0.00183s^{1.5779} + 0.00022288s + 0.000489s^{0.57787} + 5.9556 \times 10^{-5}}{1.1664 \times 10^{-6}s^5 + 0.00033718s^4 + 0.0018707s^3 + 0.000324s^{2.5779} + 0.00054835s^2 + 0.00183s^{1.5779} + 0.00022553s + 0.000489s^{0.57787} + 5.9556 \times 10^{-5}} \quad (4.24)$$

Pored ITASE kriterijuma u ovom slučaju primijenjen je i IAEO kriterijum i AOA algoritam za pronalaženje parametara TID regulatora pogona sa MJSS u cilju smanjenja preskoka. U ovom slučaju dobijene su sljedeće vrijednosti traženih parametara:

$$K_t=20, K_i=0.028074, K_d=20, n=2.7449.$$

Za ove parametre TID regulatora postiže se step odziv gdje je vrijednost preskoka 0.2288%, vrijeme uspona 0.0096s i vrijeme smirenja 0.0277s. Može se uočiti da je vrijednost preskoka značajno smanjena, a vrijednosti vremena uspona i smirenja nisu narušene. Na slici 4.10 je prikazan opisani step odziv, a prenosna funkcija sistema je data jednačinom (4.25).



Slika 4.10: Step odziv sa parametrima $K_t=20$, $K_i=0.028074$, $K_d=20$, $n=2.7449$

$$G_{DC-TID} = \frac{0.000324s^4 + 0.00183s^3 + 0.000324s^{2.6357} + 0.00048945s^2 + 0.00183s^{1.6357} + 2.5688 \times 10^{-6}s + 0.000489s^{0.63569} + 6.8641 \times 10^{-7}}{1.1664 \times 10^{-6}s^5 + 0.00033718s^4 + 0.0018707s^3 + 0.000324s^{2.6357} + 0.00050934s^2 + 0.00183s^{1.6357} + 5.2257 \times 10^{-6}s + 0.000489s^{0.63569} + 6.8641 \times 10^{-7}} \quad (4.25)$$

Detaljno poređenje svih dobijenih karakterističnih veličina sistema će biti predstavljeno u sledećem poglavlju.

5. HAOTIČNI ARITHMETIC OPTIMISATION ALGORITHM

U cilju poboljšavanja regulacije razmatranog pogona sa MJSS sa stanovišta estimacije parametara regulatora, razvijena je modifikacija prethodno predstavljenog AOA algoritma.

Jedan od glavnih problema meta-heurističkih algoritama je različitost njihovih rezultata i divergiranje rešenja dobijenih u ponovljenim pokretanjima programa. Hibridizacije i modifikacije postojećih meta-heurističkih algoritama mogu dovesti do poboljšanja performansi u različitim aspektima (brzina izvršenja, kovergentnost rešenja, bolji rezultati i slično).

U ovom radu je predložena integracija haotičnih mapa [49] sa AOA algoritmom čime se poboljšava sama inicijalizacija pretrage rešenja, ubrzava algoritam i dobijaju konvergentna rešenja s boljim rezultatima. AOA algoritam je modifikovan primjenom haotičnih mapa na način što se inicijalizacija početne grupe rešenja ne odvija nasumično već odabirom vrijednosti iz neke od deset haotičnih mapa. Na ovaj način se poboljšava pretraga, ubrzava algoritam i dobijaju konvergentnija rešenja. Rezultati koji će biti prikazani u nastavku postignuti su aktivacijom Gauss/mouse mape.

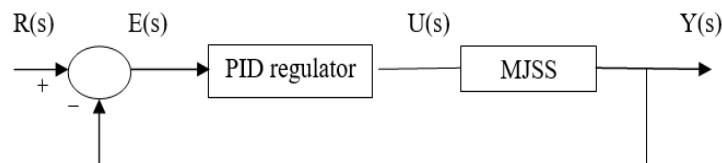
Primjenjivost predložene modifikacije AOA algoritma, tj. primjenjivost novog ChAOA algoritma nije ograničena samo na razmatrani problem, već se može primjenjivati i u svrhe estimacije parametara drugih procesa, regulatora ili uređaja.

5.1. Primjena ChAOA algoritma u estimaciji parametara regulatora pogona sa MJSS

U nastavku će biti izloženi rezultati estimacije parametara različitih regulatora (PID, PIDD, FOPID i TID) pogona sa MJSS.

a) PID regulator

Blok dijagram razmatranog pogona sa PID regulatorom je prikazan na slici 5.1.



Slika 5.1: Blok dijagram razmatranog pogona

Prenosna funkcija razmatranog pogona je:

$$G_{DC-PID} = \frac{K(K_d^2 + K_p s + K_i)}{((L_a + R_a)(Js + B) + K_b K)s + K(K_d^2 + K_p s + K_i)} \quad (5.1)$$

ChAOA algoritam je primjenjivan za estimaciju parametara PID regulatora, tj. proporcionalnog K_p , integralnog K_i i diferencijalnog člana K_d . Kriterijumska funkcija koja je korištena jeste ITASE, opisana jednačinom (4.13).

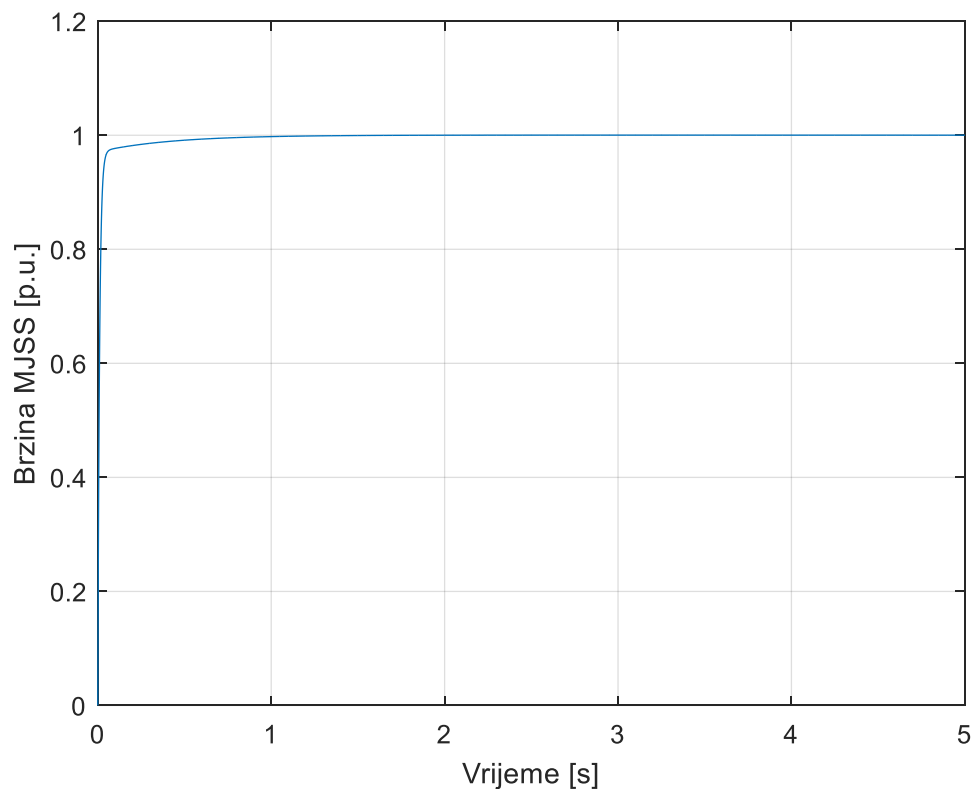
Primjenom opisanog optimizacionog pristupa dobijeni su sledeći parametri PID regulatora:

$$K_p=20, K_i=5.43564, K_d=7.33131.$$

Prenosna funkcija ovog pogona je sljedeća:

$$G_{DC-PID} = \frac{0.11s^2 + 0.3s + 0.08153}{0.00108s^3 + 0.1161s^2 + 0.3016s + 0.08153} \quad (5.2)$$

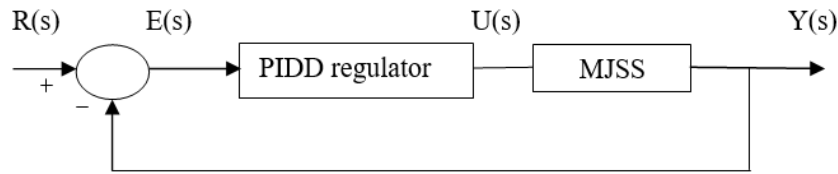
Za dobijene parametre regulatora, tj. za određenu prenosnu funkciju sistema, izvršen je proračun karakterističnih veličina. Vrijeme uspona je 0.0237s, vrijeme smirenja je 0.1576s, a preskok je 0%. Na slici 5.1 je prikazan step odziv prenosne funkcije (5.2).



Slika 5.2: Step odziv sa parametrima $K_p=20$, $K_i=5.43564$, $K_d=7.33131$

b) PID regulator

Blok dijagram razmatranog pogona sa PID regulatorom je prikazan na slici 5.3.



Slika 5.3: Blok dijagram razmatranog pogona

Prenosna funkcija razmatranog pogona je sljedeća:

$$G_{DC-PID} = \frac{K(K_p + K_d s + K_{d2} s^2 + K_i s^{-1})}{((B + Js)(R_a + L_a s) + KK_b) \left(\left(\frac{K(K_p + K_d s + K_{d2} s^2 + K_i s^{-1})}{(B + Js)(R_a + L_a s) + KK_b} \right) + 1 \right)} \quad (5.3)$$

U ovom slučaju određene su optimalne vrijednosti parametara PID regulatora - proporcionalnog K_p , integralnog K_i i parametara dva diferencijalna člana K_d i K_{d2} . Kriterijumska funkcija koja je za korištena za razmatranu optimizaciju sa ChAOA algoritmom je ITASE funkcija opisana relacijom (4.13).

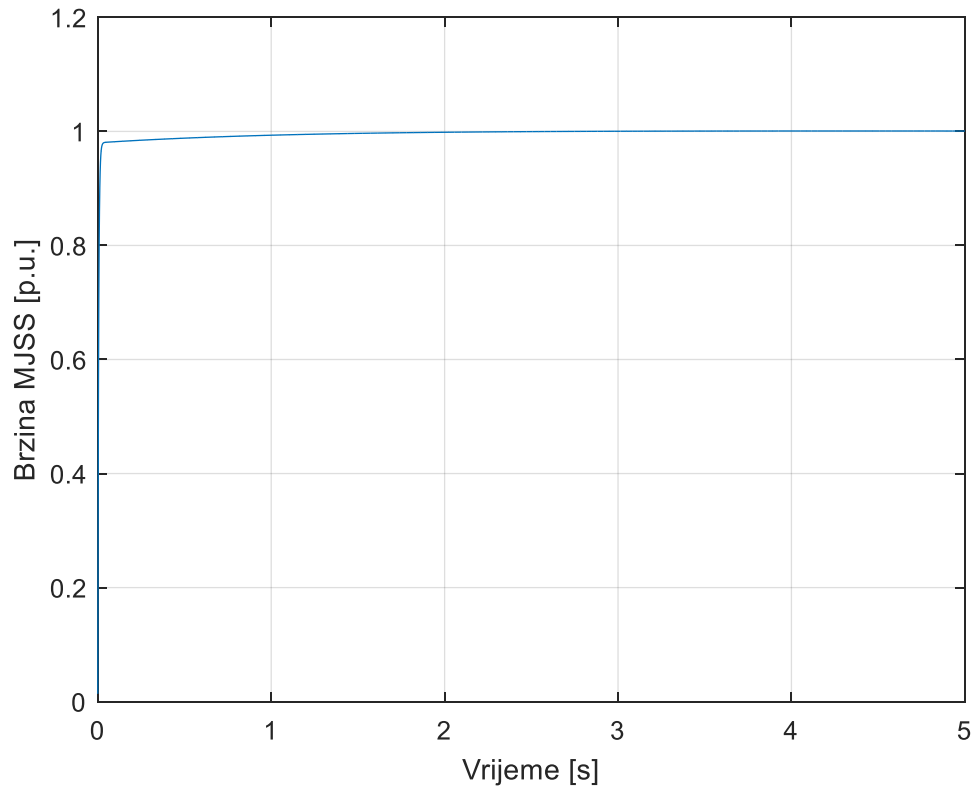
Primjenom opisane optimizacione logike dobijeni su sledeći parametri PID regulatora:

$$K_p=20, K_i=6.13822, K_d=15.548, K_{d2}=0.001.$$

Prenosna funkcija ovog pogona je (5.4):

$$G_{DC-PID} = \frac{1.62 \times 10^{-8} s^6 + 0.000252 s^5 + 0.001747 s^4 + 0.00231 s^3 + 0.001051 s^2 + 0.0001501 s}{1.183 \times 10^{-6} s^6 + 0.0002651 s^5 + 0.001787 s^4 + 0.002329 s^3 + 0.001053 s^2 + 0.0001501 s} \quad (5.4)$$

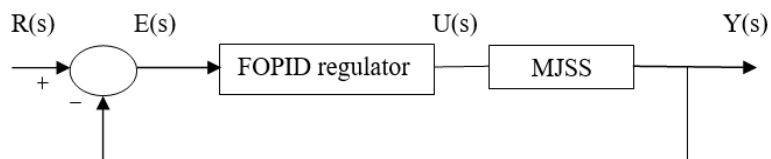
Za ovako regulisan pogon, vrijeme uspona je 0.0110s, vrijeme smirenja je 0.0354s, dok je preskok 0%. Na slici 5.4 je prikazan step odziv prenosne funkcije (5.4).



Slika 5.4: Step odziv sa parametrima $K_p=20$, $K_i=6.13822$, $K_d=15.548$, $K_{d2}=0.001$

c) FOPID regulator

Blok dijagram razmatranog pogona sa FOPID regulatorom je prikazan na slici 5.5.



Slika 5.5: Blok dijagram razmatranog pogona

Prenosna funkcija razmatranog pogona je

$$G_{DC-FOPID} = \frac{K(K_d s^{\lambda+\mu} + K_p s^{\lambda} + K_i)}{((L_a + R_a)(Js + B) + K_b K) s^{\lambda} + K(K_d s^{\lambda+\mu} + K_p s^{\lambda} + K_i)} \quad (5.5)$$

ChAOA algoritam se primjenjuje za pretragu parametara FOPID regulatora - proporcionalnog K_p , integralnog K_i i diferencijalnog člana K_d , kao i vrijednosti parametara μ i λ koje opisuju stepen necjelobrojne integracije, odnosno stepen necjelobrojnog diferenciranja.

Kriterijumska funkcija koja je korištena za razmatranu optimizaciju sa ChAOA algoritmom je modifikovana ITASE funkcija koju opisuje relacija (4.13).

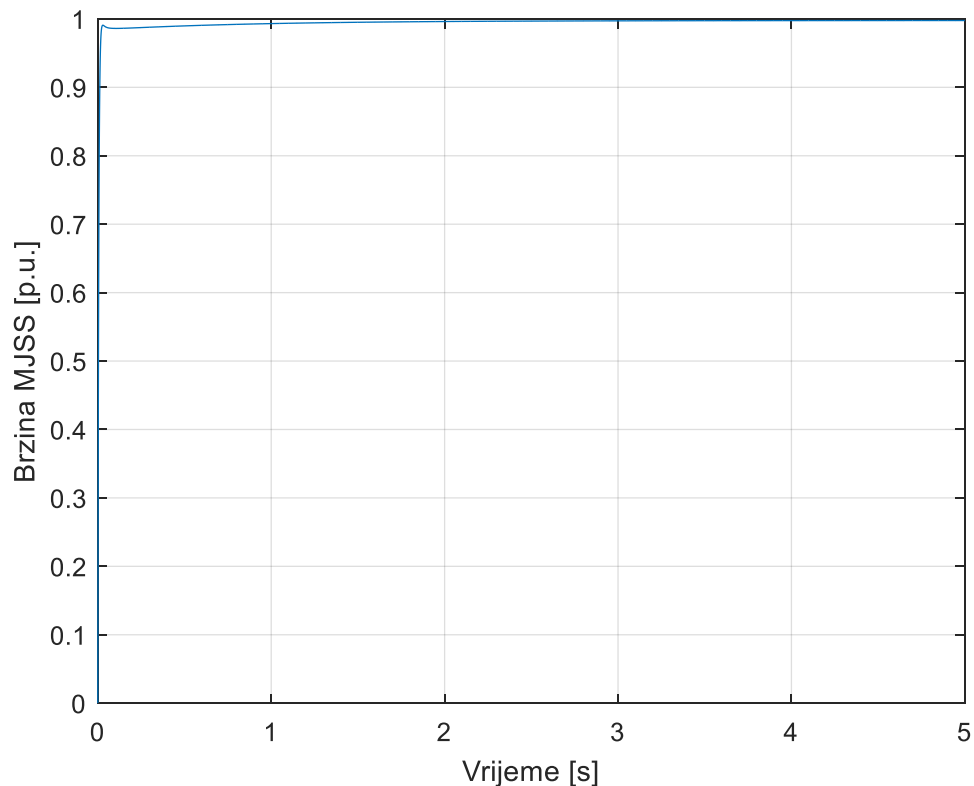
Primjenom opisane optimizacione logike dobijeni su sljedeći parametri FOPID regulatora:

$$K_p=20, K_i=18.9283, K_d=20, \lambda =0.552751, \mu =0.951552.$$

Prenosna funkcija ovog pogona je sljedeća:

$$G_{DC-FOPID} = \frac{0.3s^{1.5043} + 0.3s^{0.55275} + 0.28392}{0.00108s^{2.5528} + 0.0061s^{1.5528} + 0.3s^{1.5043} + 0.30163s^{0.55275} + 0.28392} \quad (5.6)$$

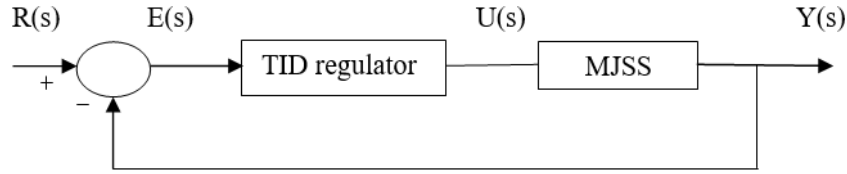
Za ovako regulisan sistem vrijeme uspona je 0.0108s, vrijeme smirenja je 0.0193s, preskok je 0%. Na slici 5.6 je prikazan step odziv prenosne funkcije.



Slika 5.6: Step odziv sa parametrima $K_p=20, K_i=18.9283, K_d=20, \lambda =0.552751, \mu =0.951552$

d) TID regulator

Blok dijagram razmatranog pogona sa TID regulatorom je prikazan na slici 5.7.



Slika 5.7: Blok dijagram razmatranog pogona

Prenosna funkcija razmatranog pogona je:

$$G_{DC-TID} = \frac{K \left(K_d s + K_i s^{-1} + K_t s^{-\frac{1}{n}} \right)}{\left((B + Js)(R_a + L_a s) + KK_b \right) \left(\frac{K \left(K_d s + K_i s^{-1} + K_t s^{-\frac{1}{n}} \right)}{(B + Js)(R_a + L_a s) + KK_b} + 1 \right)} \quad (5.7)$$

ChAOA algoritam je primjenjivan za estimaciju parametara TID regulatora – parametara K_t , K_i , K_d i vrijednost stepena n . Kriterijumska funkcija koja je korištena za razmatranu optimizaciju sa ChAOA algoritmom je modifikovana ITASE funkcija koju opisuje relacija (4.13).

Primjenom opisanog optimizacionog pristupa dobijeni su sljedeći parametri TID regulatora:

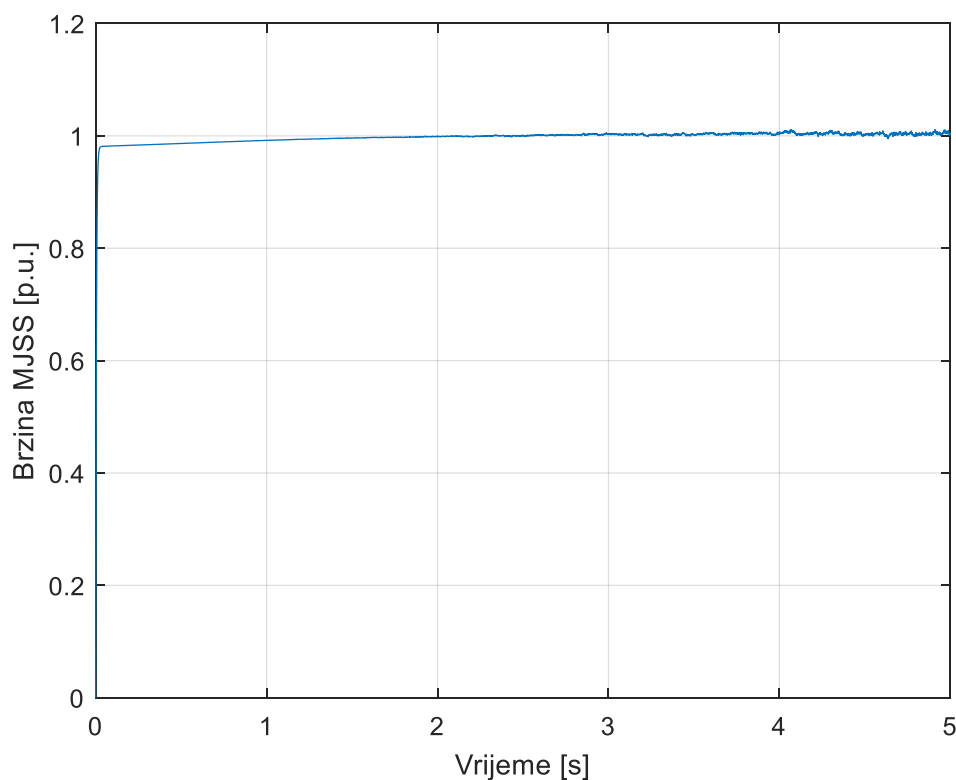
$$K_t=20; K_i=2.68495; K_d=20; n=3;$$

Prenosna funkcija ovog pogona je sljedeća:

$$G_{DC-tid} = \frac{0.000324s^4 + 0.00183s^3 + 0.000324s^{2.6667} + 0.0005325s^2 + 0.00183s^{1.6667} + 0.00024567s + 0.000489s^{0.66667} + 6.5647 \times 10^{-5}}{1.1664 \times 10^{-6}s^5 + 0.00033718s^4 + 0.0018707s^3 + 0.000324s^{2.6667} + 0.00055238s^2 + 0.00183s^{1.6667} + 0.00024833s + 0.000489s^{0.66667} + 6.5647 \times 10^{-5}} \quad (5.8)$$

U ovom slučaju, vrijeme uspona je 0.0096s, vrijeme smirenja je 0.0272s, preskok je 0.4040%.

Na slici 5.8 je prikazan step odziv prenosne funkcije (5.8).



Slika 5.8: Step odziv sa parametrima $K_t=20$, $K_i=2.68495$, $K_d=20$, $n=3$

5.2. Komparativna analiza rezultata u odnosu na karakteristične vrijednosti odziva na step promjenu brzine

U ovom potpoglavlju su upoređeni rezultati odziva brzine MJSS na dejstvo referentne step smetnje za sve parametre i strukture regulatora korišćene u ovom master radu, a koje su opisane u prethodnim poglavljima.

Poredeći rezultate AOA i chAOA algoritma primjenjivane na PID, PIDD, FOPID i TID regulator pri čemu su korištene ITAE, ITASE ili IAEO kriterijumske funkcije, a koji su prikazani u Tabeli 5.1, uočava se sljedeće:

- Najbolje vrijednosti u odnosu na vrijeme uspona postiže TID AOA (ITASE i IAEO) i TID chAOA (ITASE) u vrijednosti od 0.0096s. Drugo i treće najbolje vrijeme uspona postiže AOA FOPID ITASE od 0.01s i FOPID AOA IAEO od 0.0103s.

- Najbolju vrijednost vremena smirenja postiže FOPID chAOA (ITASE) u vrijednosti od 0.0193s, zatim FOPID AOA (ITASE) u vrijednosti 0.0205s i FOPID AOA (IAEO) u vrijednosti od 0.0210s.

- Uočava se da je preskok za sve slučajeve nepostojeći ili minimalan. Nešto veći preskok se javlja kod TID regulatora, ali je i u tim slučajevima preskok daleko ispod 1%.

- Realizacije sa FOPID i TID regulatorom daju najbolje rezultate u odnosu na vrijeme uspona i smirenja uz minimalan preskok.

- Uočava se da su rezultati dobijeni primjenom chAOA algoritma bolji u odnosu na rezultate dobijene primjenom AOA algoritma.

Objedinjenim posmatranjem rezultata iz literature i rezultata baziranih na primjeni AOA i chAOA algoritama uočava se da svako od predloženih rešenja izuzev PID AOA ITAE i PID AOA ITAE postiže bolje vrijeme uspona od do sada najboljeg postignutog rezultata za chASO FOPID od 0.0262s čime su globalno najbolja vremena uspona ona koja su prethodno navedena analizom rezultata AOA i chAOA. Dakle najbolje vrijeme uspona postižu novopredložene kombinacije AOA i chAOA algoritama sa TID-om gdje se postiže vrijeme uspona od 0.0096s, zatim kombinacije AOA i FOPID-a sa vremenom uspona od 0.01s i 0.0103s.

Sve predložene realizacije osim AOA PID i AOA PID kombinacija postižu bolje vrijeme smirenja od do sada najboljeg rezultata iz literature za chASO FOPID-a od 0.0425s. Prema tome najbolja vremena smirenja postižu realizacije sa FOPID-om: chAOA ITASE, AOA ITASE i AOA IAEO u vrijednostima 0.0193s, 0.0205s i 0.0210s što su više nego duplo bolji rezultati od najboljeg rezultata iz literature od 0.0425s.

U odnosu na primjenjivane regulatore sve predložene kombinacije PID regulatora sa AOA i chAOA algoritmom i kriterijumskim funkcijama daju bolje rezultate vremena uspona i vremena smirenja nego svi dobijeni primjenom PID-a sa drugim algoritmima iz literature navedenih u Tabeli 3.2. Nove metode regulacije primjenom FOPID regulatora daju bolje rezultate od svih prethodno primjenjivanih iz Tabele 3.2.

Za TID regulator u svim predloženim realizacijama se može uočiti da se postižu kvalitetne vrijednosti kako vremena uspona tako i vremena smirenja uz minimalan preskok (daleko ispod 1%). PID regulator takođe daje kvalitetne rezultate. U realizaciji AOA PID se ne javlja preskok, a vremena uspona i vremena smirenja su uporediva sa rezultatima koji se dobijaju za AOA PID. Kod realizacije sa chAOA sa PID regulatorom se takođe ne javlja preskok, a vremena uspona i smirenja su manja nego kod chAOA PID. Rezultati ove komparativne analize su predstavljeni u Tabeli 5.2.

Tabela 5.1 - Rezultati komparativne analize predloženih rezultata u odnosu na karakteristike step odziva

<i>Regulator</i>	<i>Primijenjeni metod</i>	K_p	K_i	K_d	K_{d2}	n	λ	μ	<i>Preskok [%]</i>	<i>Vrijeme uspona [s]</i>	<i>Vrijeme smirenja [s]</i>
PID	AOA ITAE	20	5.13894	4.64316					0	0.0363	0.0854
PID	AOA ITASE	20	5.55421	13.489					0	0.0126	0.0806
PIDD	AOA ITAE	20	5.02631	4.02853	0.00107173				0	0.0414	0.0822
PIDD	AOA ITASE	20	6.27889	12.6176	0.001				0	0.0137	0.1168
FOPID	AOA ITASE	18.1138	20	20			0.517179	0.979839	0.0083	0.0100	0.0205
FOPID	AOA IAEO	20	20	19.386			0.514386	0.979726	0	0.0103	0.0210
TID	AOA ITASE	20	2.43582	20		2.36893			0.4996	0.0096	0.0286
TID	AOA IAEO	20	0.028074	20		2.7449			0.2288	0.0096	0.0277
PID	chAOA ITASE	20	6.14739	6.70014					0	0.0237	0.1576
PIDD	chAOA ITASE	20	6.13822	15.548	0.001				0	0.0110	0.0354
FOPID	chAOA ITASE	20	18.9283	20			0.552751	0.951552	0	0.0108	0.0193
TID	chAOA ITASE	20	2.68495	20		3			0.4040	0.0096	0.0272

Tabela 5.2: Rezultati komparativne analize predloženih rezultata i rezultata iz literature u odnosu na karakteristike step odziva

<i>Regulator</i>	<i>Primijenjeni metod</i>	K_p	K_i	K_d	K_{d2}	n	λ	μ	<i>Preskok [%]</i>	<i>Vrijeme uspona [s]</i>	<i>Vrijeme smiraja [s]</i>
PID	AOA ITAE	20	5.13894	4.64316					0	0.0363	0.0854
PID	AOA ITASE	20	5.55421	13.489					0	0.0126	0.0806
PIDD	AOA ITAE	20	5.02631	4.02853	0.00107173				0	0.0414	0.0822
PIDD	AOA ITASE	20	6.27889	12.6176	0.001				0	0.0137	0.1168
FOPID	AOA ITASE	18.1138	20	20			0.517179	0.979839	0.0083	0.0100	0.0205
FOPID	AOA IAEO	20	20	19.386			0.514386	0.979726	0	0.0103	0.0210

TID	AOA ITASE	20	2.43582	20		2.36893			0.4996	0.0096	0.0286
TID	AOA IAEO	20	0.028074	20		2.7449			0.2288	0.0096	0.0277
PID	chAOA ITASE	20	6.14739	6.70014					0	0.0237	0.1576
PIDD	chAOA ITASE	20	6.13822	15.548	0.001				0	0.0110	0.0354
FOPID	chAOA ITASE	20	18.9283	20			0.552751	0.951552	0	0.0108	0.0193
TID	chAOA ITASE	20	2.68495	20		3			0.4040	0.0096	0.0272
PID	OBL/HGSO-PID [9]	16.9327	0.9508	2.8512					0	0.0546	0.0946
PID	HGSO-PID [9]	13.4430	1.2059	2.2707					0	0.0684	0.1186
PID	HHO/PID [10]	15.8581	3.6963	2.7732					0	0.0568	0.1003
PID	ISCA-PID [12]	18.8156	4.7628	3.3181					0	0.0476	0.0846
PID	SMA/ PID [13]	18.6458	2.5235	3.1921					0	0.0491	0.0857
PID	SSA/PID [14]	19.5893	5.2483	3.2937					0.2580	0.0472	0.0811
FOPID	GWO / FOPID [21]	18.3286	4.9418	3.2612			0.9998	0.9845	0.2969	0.0499	0.0833
PID	IWO/ PID[16]	1.5782	0.4372	0.0481					6.9759	0.4189	1.2533
PID	SCA/ PID [11]	11.3163	0.5544	1.8072					0.192	0.0833	0.1382
PID	SFS/ PID [18]	1.6315	0.2798	0.2395					0	0.5436	1.4475
PID	GWO/ PID [15]	6.8984	0.5626	0.9293					1.5062	0.1388	0.2052
PID	PSO/ PID [17]	1.5234	1.3801	0.0159					24.206	0.3560	1.8028
PID	IWOA-PID [19]	1.5767	0.4297	0.0574					6.1968	0.4262	1.2418
PID	WOA-PID [19]	1.4358	1.6726	0.0416					26.3018	0.3708	1.8268
FOPID	chASO/ FOPID [20]	19.7722	9.1117	8.1189			0.8401	0.9112	0.0619	0.0262	0.0425
FOPID	ASO/ FOPID [20]	19.3282	7.9728	4.7805			0.9755	0.9428	0.1560	0.0386	0.0636
PID	ASO/ PID [20]	11.9437	2.0521	2.4358					0	0.0692	0.1535

5.3. Komparativna analiza rezultata u odnosu na vrijednosti kriterijumskih funkcija

U ovom poglavlju će biti upoređeni rezultati iz literature, rezultati ranije izloženi u poglavlju 3, sa rezultatima iz poglavlja 4 i 5. Poređenje je izvršeno u odnosu na vrijednosti proračunatih kriterijumskih funkcija ITAE, ITASE i IAEO čije su jednačine date u poglavljima 4 i 5.

Poređenjem rezultata iz literature uočava se da najbolju vrijednost ITAE kriterijuma postižu redom SSA PID, GWO FOPID i ISCA PID u vrijednostima 6.4679×10^{-4} , 8.2225×10^{-4} i 0.0023 respektivno. U odnosu na ITASE kriterijum najbolje vrijednosti postižu chASO FOPID, ASO FOPID i SSA PID, u vrijednostima 5.5594×10^{-5} , 9.8912×10^{-5} , 1.1720×10^{-4} respektivno. U odnosu na kriterijum IAEO najbolje vrijednosti postižu chASO FOPID, ISCA PID i ASO FOPID u vrijednostima 0.0198, 0.0225 i 0.0277 respektivno. Rezultati ove komparativne analize su prikazani u Tabeli 5.3.

Tabela 5.3 - Vrijednosti kriterijumskih funkcija

<i>Optimizacioni algoritam i tip regulatora</i>	K_p	K_i	K_d	λ	μ	<i>ITAE</i>	<i>ITASE</i>	<i>IAEO</i>
OBL/HGSO-PID [9]	16.9327	0.9508	2.8512			0.0537	3.8326 e-04	0.0454
HGSO-PID [9]	13.4430	1.2059	2.2707			0.0519	4.5677e-04	0.0512
HHO/PID [10]	15.8581	3.6963	2.7732			0.0062	1.7020e-04	0.0282
ISCA-PID [12]	18.8156,	4.7628	3.3181			0.0023	1.1775e-04	0.0225
SMA/ PID [13]	18.6458	2.5235	3.1921			0.0245	1.7278e-04	0.0321
SSA/PID [14]	19.5893	5.2483	3.2937			6.4679e-04	1.1720e-04	0.0227
GWO / FOPID [21]	18.3286	4.9418	3.2612	0.9998	0.9845	8.2225e-04	1.3931e-04	0.0242
IWO/ PID [16]	1.5782	0.4372	0.0481			0.0878	0.0267	0.3480
SCA/ PID [11]	11.3163	0.5544	1.8072			0.0848	9.3563e-04	0.0697
SFS/ PID [18]	1.6315	0.2798	0.2395			0.2410	0.0201	0.3218
GWO/ PID [15]	6.8984	0.5626	0.9293			0.1093	0.0021	0.1094
PSO/ PID [17]	1.5234	1.3801	0.0159			0.2874	0.0541	0.6620
IWOA-PID [19]	1.5767	0.4297	0.0574			0.0886	0.0259	0.3397
WOA-PID [19]	1.4358	1.6726	0.0416			0.2736	0.0625	0.6798
chASO/ FOPID [20]	19.7722	9.1117	8.1189	0.8401	0.9112	0.0046	5.5594e-05	0.0198
ASO/ FOPID [20]	19.3282	7.9728	4.7805	0.9755	0.9428	0.0102	9.8912e-05	0.0277
ASO/ PID [20]	11.9437	2.0521	2.4358			0.0267	2.9801e-04	0.0449

U Tabeli 5.4 su izložene vrijednosti ITAE, ITASE i IAEO kriterijuma za nove estimacione pristupe opisane u poglavljima 4 i 5. Zaključci su sljedeći:

- Uočava se da najbolje rezultate u odnosu na ITAE kriterijum postižu AOA PID (ITAE), AOA PIDD (ITAE) i chAOA PID (ITASE) u vrijednostima 0.0025, 0.0027 i 0.0082.
- U odnosu na ITASE kriterijum najbolje vrijednosti postižu FOPID chAOA (ITASE), FOPID AOA (IAEO) i FOPID AOA (ITASE) u vrijednostima 2.9799×10^{-5} , 3.0212×10^{-5} i 3.3127×10^{-5} .
- U odnosu na IAEO kriterijum najbolje vrijednosti postižu FOPID chAOA (ITASE), FOPID AOA (IAEO) i FOPID AOA (ITASE) u vrijednostima 0.0143, 0.0144 i 0.0148.

U Tabeli 5.5 su prikazani objedinjeni rezultati po pitanju vrijednosti kriterijumskih funkcija za pristupe predložene u literaturi i za pristupe predložene u prethodnim poglavljima ovog master rada. Zaključci su sljedeći:

- Uočava se da u odnosu na ITAE kriterijum najbolje rezultate daje SSA PID od 6.4679×10^{-4} , zatim GWO FOPID 8.2225×10^{-4} i ISCA PID 0.0023.
- Za ITASE kriterijum najbolji rezultat postiže FOPID chAOA (ITASE) 2.9799×10^{-5} , zatim FOPID AOA (IAEO) 3.0212×10^{-5} i FOPID AOA (ITASE) 3.3127×10^{-5} .
- U odnosu na IAEO najbolji rezultat postižu FOPID chAOA (ITASE) od 0.0143, FOPID AOA (IAEO) od 0.0144 i FOPID AOA (ITASE) od 0.0148.

Tabela 5.4. - Poređenje rezultata sa stanovišta vrijednosti različitih kriterijumskih funkcija

Regulator	Primijenjeni metod	K_p	K_i	K_d	K_{d2}	N	λ	μ	ITAE	ITASE	IAEO
PID	AOA ITAE	20	5.13894	4.64316					0.0025	7.2891e-05	0.0210
PID	AOA ITASE	20	5.55421	13.489					0.0137	8.2910e-05	0.0231
PIDD	AOA ITAE	20	5.02631	4.02853	0.00107173				0.0027	8.6131e-05	0.0213
PIDD	AOA ITASE	20	6.27889	12.6176	0.001				0.0148	7.6769e-05	0.0240
FOPID	AOA ITASE	18.1138	20	20			0.517179	0.979839	0.0090	3.3127e-05	0.0148
FOPID	AOA IAEO	20	20	19.386			0.514386	0.979726	0.0093	3.0212e-05	0.0144
TID	AOA ITASE	20	2.43582	20		2.36893			0.0363	2.2314e-04	0.0298
PID	chAOA ITASE	20	6.14739	6.70014					0.0082	6.1092e-05	0.0235
PIDD	chAOA ITASE	20	6.13822	15.548	0.001				0.0166	8.6003e-05	0.0236
FOPID	chAOA ITASE	20	18.9283	20			0.552751	0.951552	0.0084	2.9799e-05	0.0143
TID	chAOA ITASE	20	2.68495	20		3			0.0322	1.8203e-04	0.0276

Tabela 5.5 - Poređenje rezultata sa stanovišta vrijednosti različitih kriterijumskih funkcija – sumarni rezultati

Regulator	Primijenjeni metod	K_p	K_i	K_d	K_{d2}	N	λ	μ	ITAE	ITASE	IAEO
PID	AOA ITAE	20	5.13894	4.64316					0.0025	7.2891e-05	0.0210
PID	AOA ITASE	20	5.55421	13.489					0.0137	8.2910e-05	0.0231
PIDD	AOA ITAE	20	5.02631	4.02853	0.00107173				0.0027	8.6131e-05	0.0213
PIDD	AOA ITASE	20	6.27889	12.6176	0.001				0.0148	7.6769e-05	0.0240
FOPID	AOA ITASE	18.1138	20	20			0.517179	0.979839	0.0090	3.3127e-05	0.0148
FOPID	AOA IAEO	20	20	19.386			0.514386	0.979726	0.0093	3.0212e-05	0.0144
TID	AOA ITASE	20	2.43582	20		2.36893			0.0363	2.2314e-04	0.0298
PID	chAOA ITASE	20	6.14739	6.70014					0.0082	6.1092e-05	0.0235
PIDD	chAOA ITASE	20	6.13822	15.548	0.001				0.0166	8.6003e-05	0.0236
FOPID	chAOA ITASE	20	18.9283	20			0.552751	0.951552	0.0084	2.9799e-05	0.0143
TID	chAOA ITASE	20	2.68495	20		3			0.0322	1.8203e-04	0.0276
PID	OBL/HGSO	16.9327	0.9508	2.8512					0.0537	3.8326e-04	0.0454
PID	HGSO	13.4430	1.2059	2.2707					0.0519	4.5677e-04	0.0512
PID	HHO	15.8581	3.6963	2.7732					0.0062	1.7020e-04	0.0282
PID	ISCA	18.8156,	4.7628	3.3181					0.0023	1.1775e-04	0.0225

PID	SMA	18.6458	2.5235	3.1921					0.0245	1.7278e-04	0.0321
PID	SSA	19.5893	5.2483	3.2937					6.4679e-04	1.1720e-04	0.0227
FOPID	GWO	18.3286	4.9418	3.2612			0.9998	0.9845	8.2225e-04	1.3931e-04	0.0242
PID	<i>IWO</i>	1.5782	0.4372	0.0481					0.0878	0.0267	0.3480
PID	SCA	11.3163	0.5544	1.8072					0.0848	9.3563e-04	0.0697
PID	SFS	1.6315	0.2798	0.2395					0.2410	0.0201	0.3218
PID	GWO	6.8984	0.5626	0.9293					0.1093	0.0021	0.1094
PID	PSO	1.5234	1.3801	0.0159					0.2874	0.0541	0.6620
PID	IWOA	1.5767	0.4297	0.0574					0.0886	0.0259	0.3397
PID	WOA	1.4358	1.6726	0.0416					0.2736	0.0625	0.6798
FOPID	chASO	19.7722	9.1117	8.1189			0.8401	0.9112	0.0046	5.5594e-05	0.0198
FOPID	ASO	19.3282	7.9728	4.7805			0.9755	0.9428	0.0102	9.8912e-05	0.0277
PID	ASO	11.9437	2.0521	2.4358					0.0267	2.9801e-04	0.0449

6. ISPITIVANJE ROBUSTNOSTI SISTEMA

Robustnost sistema je izuzetno važan pristup za provjeru „ponašanja“ sistema na dejstva različitih promjena pojedinih komponenti ili upravljačkih signala. U tom cilju, u ovom radu, sprovedena je analiza robustnosti na način što je posmatran rad sistema za drugačije vrijednosti parametara mašine. Konkretno, kao promjenjiv parametar uzeta je promjena otpornosti mašine, što ima veliki praktičan značaj – pri radu mašine, mijenja se njena temperatura koja direktno utiče na vrijednost otpornosti. Takođe, uzeto je da se koeficijent momenta mijenja. Analiza je sprovedena za pogon sa PID, PIDD, FOPID i TID regulatorom čiji su parametri estimirani primjenom ChAOA algoritmom korišćenjem ITASE kriterijumske funkcije. Međutim, analiza je sprovedena za setove promjena (slučajevi), te npr. u jednom slučaju imamo da je $R_a=0.4\Omega$, dok je $K=0.015\text{Nm/A}$, a u drugom slučaju imamo da je $R_a=0.2\Omega$, dok je $K=0.012\text{Nm/A}$.

Tabela 6.1 - Promjenjivi parametri za testiranje robustnosti sistema

<i>Redni broj slučaja</i>	<i>R_a</i>	<i>K</i>
I	0.4	0.015
II	0.2	0.012
III	0.1	0.014
IV	0.3	0.015

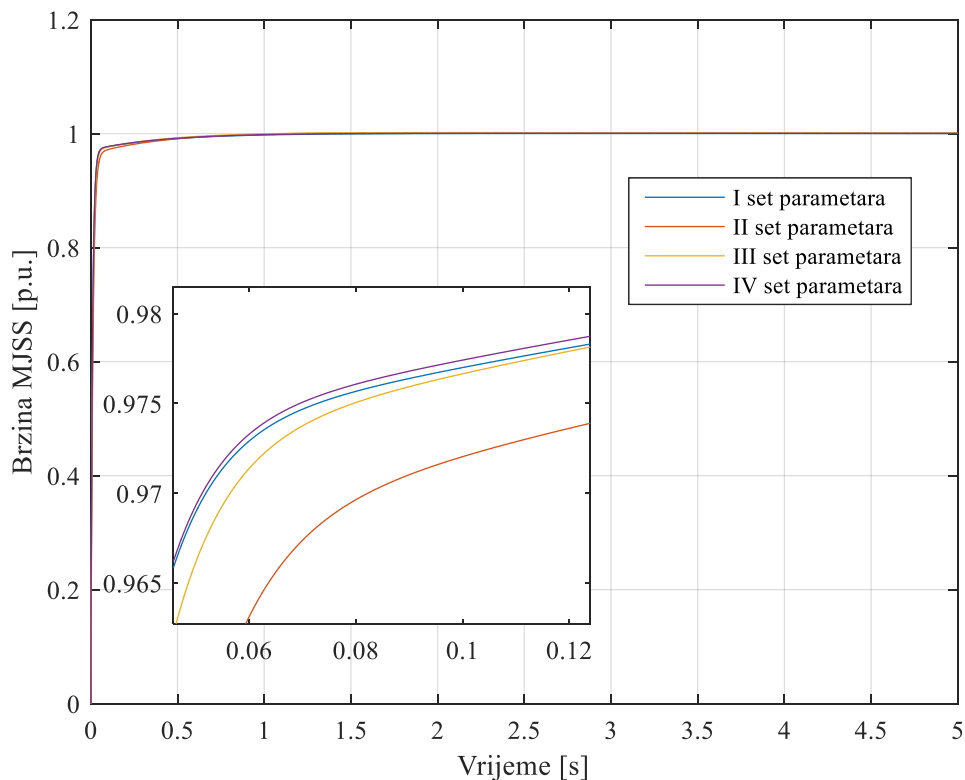
Osim prethodnog, analiza robusnosti sistema je testirana i na promjene referentne vrijednosti brzine obrtanje, kao i za slučaj promjene momenta opterećenja.

6.1. Rezultati analize za pogon sa PID regulatorom

Primjenom PID regulatora čiji su parametri određeni koristeći ChAOA i ITASE kriterijumske funkcije testirani su odzivi brzine MJSS za sve slučajeve iz Tabele 6.1. Dobijeni rezultati su prikazani u Tabeli 6.2, dok su na slici 6.1 prikazani odzivi sistema.

Tabela 6.2 - Vrijednosti parametara PID regulatora i karakteristika step odziva za različite slučajeve iz Tabele 6.1

<i>Redni broj slučaja</i>	<i>Preskok [%]</i>	<i>Vrijeme uspona [s]</i>	<i>Vrijeme smirenja [s]</i>
I	0	0.0237	0.1576
II	0	0.0303	0.2239
III	0	0.0255	0.1567
IV	0	0.0237	0.1483



Slika 6.1: Step odziv sistema sa parametrima iz Tabele 6.2

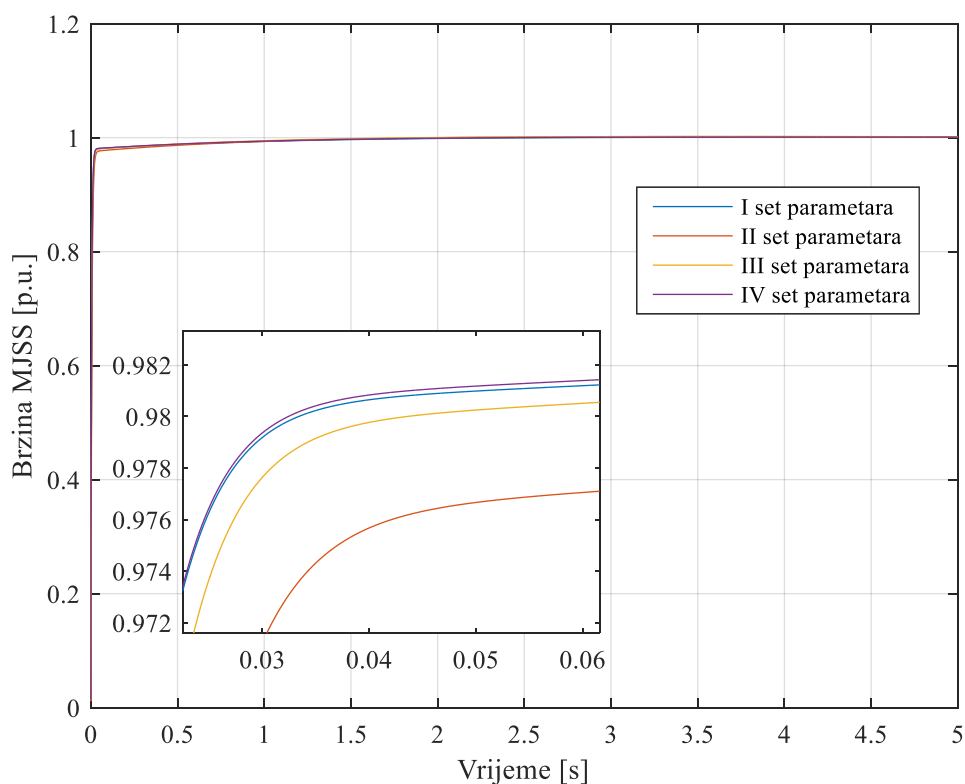
Na osnovu prikazanih rezultata uočava se da su promjene brzine za sve razmatrane slučajeve gotovo identične.

6.2. Rezultati analize za pogon sa PIDD regulatorom

Primjenom PIDD regulatora čiji su parametri određeni koristeći ChAOA i ITASE kriterijumske funkcije testirani su odzivi brzine MJSS za sve slučajeve iz Tabele 6.1. Dobijeni rezultati su prikazani u Tabeli 6.3, dok su na slici 6.2 prikazani odzivi sistema.

Tabela 6.3 - Vrijednosti parametara PIDD regulatora i karakteristika step odziva za različite radne tačke

<i>Redni broj slučaja</i>	<i>Preskok [%]</i>	<i>Vrijeme uspona [s]</i>	<i>Vrijeme smirenja [s]</i>
I	0	0.0110	0.0354
II	0	0.0140	0.1608
III	0	0.0118	0.0503
IV	0	0.0110	0.0340



Slika 6.2: Step odziv sistema sa parametrima iz tabele 6.3

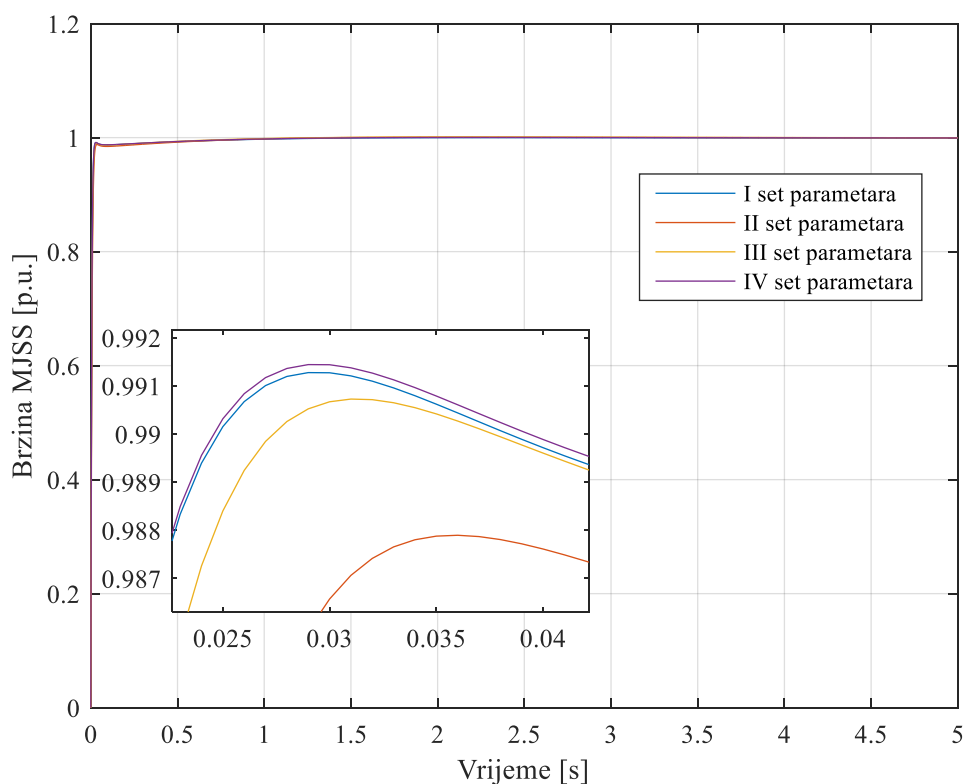
I u ovom slučaju, na osnovu prikazanih rezultata uočava se da su promjene brzine za sve razmatrane slučajeve bliske.

6.3. Rezultati analize za pogon sa FOPID regulatorom

Primjenom FOPID regulatora čiji su parametri određeni koristeći ChAOA i ITASE kriterijumske funkcije testirani su odzivi brzine MJSS za sve slučajeve iz Tabele 6.1. Dobijeni rezultati su prikazani u Tabeli 6.4, dok su na slici 6.3 prikazani odzivi sistema.

Tabela 6.4: Vrijednosti parametara FOPID regulatora i karakteristika step odziva za različite radne tačke

<i>Redni broj slučaja</i>	<i>Preskok [%]</i>	<i>Vrijeme uspona [s]</i>	<i>Vrijeme smirenja [s]</i>
I	0	0.0108	0.0193
II	0.0947	0.0132	0.0247
III	0.0979	0.0115	0.0206
IV	0.0267	0.0108	0.0192



Slika 6.3: Step odziv sistema sa parametrima iz tabele 6.4

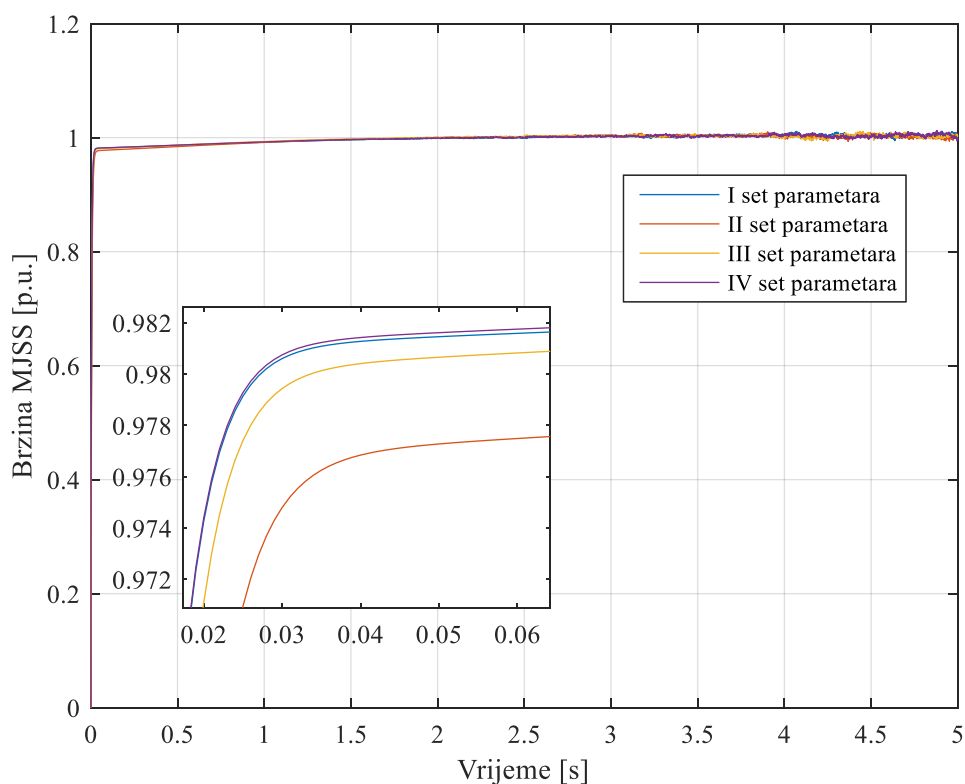
Posmatrajući prikazane rezultate uočava se blisko ponašanje odziva sistema, sa malom razlikom kod preskoka brzine.

6.4. Rezultati analize za pogon sa TID regulatorom

Primjenom TID regulatora čiji su parametri određeni koristeći ChAOA i ITASE kriterijumske funkcije testirani su odzivi brzine MJSS za sve slučajeve iz Tabele 6.1. Dobijeni rezultati su prikazani u Tabeli 6.5, dok su na slici 6.4 prikazani odzivi sistema.

Tabela 6.5 - Vrijednosti parametara TID regulatora i karakteristika step odziva za različite radne tačke

<i>Redni broj slučaja</i>	<i>Preskok [%]</i>	<i>Vrijeme uspona [s]</i>	<i>Vrijeme smirenja [s]</i>
I	0.404	0.0096	0.0272
II	0.23	0.0190	0.3723
III	0.29	0.0661	0.2049
IV	0.17	0.0660	0.0808



Slika 6.4: Step odziv sistema sa parametrima iz tabele 6.5

Posmatrajući prikazane rezultate uočava se blisko ponašanje odziva sistema, sa minimalnim preskocima.

6.5. Zaključak o analizi robustnosti

Analizom rezultata PID i PIDD uočava se da i za različite vrijednosti R_a i K dobijaju odzivi bez preskoka, dok vremena uspona i smirenja ostaju u dozvoljenim granicama i bliski

vrijednostima dobijenim za nominalne parametre. Treba pomenuti da kod PIDD regulatora dolazi do izraženijeg odstupanja vremena smirenja u odnosu na nominalni slučaj.

Kod FOPID regulatora ne dolazi do izraženijih odstupanja u odnosu na vrijednosti dobijene u nominalnom slučaju. Sprovedena analiza kod TID regulatora pokazuje da dolazi do povećanja vremena uspona i vremena smirenja, ali i smanjenja preskoka. Ipak ove promjene nisu dovoljno velike pa je jasno da se parametri regulatora proračunati za nominalne vrijednosti mašine mogu koristiti i u različitim režimima (uslovima) rada mašina.

6.6. Dejstvo step promjene brzine obrtanja

U ovom potpoglavlju prikazani su rezultati testiranja robusnosti posmatranog sistema na dejstvo promjene referentne vrijednosti brzine obrtanja. U tom cilju testiran je efekat povećanja referentne vrijednosti brzine obrtanja za slučaj primjene svake od predloženih vrsta regulatora.

Na slici 6.5 prikazan je odziv MJSS na dejstvo step promjene referentne vrijednosti brzine obrtanja kada je MJSS regulisan primjenom PID regulatora. Step promjena brzine obrtanja je formirana nakon 2s, pri čemu je početna vrijednost 1pu. Na slici 6.6 prikazani su korespondentni odzivi ali za slučaj kada je početna vrijednost brzine obrtanja 0.9pu. Parametri PID regulatora su određeni primjenom ChAOA i njihova vrijednost je:

$$K_p=20; K_i=5.43564; K_d=7.33131.$$

Odgovarajući odzivi brzine MJSS reguisanog primjenom PIDD regulatora prikazani su na slikama 6.7 i 6.8. Parametri PIDD regulatora su određeni primjenom ChAOA i njihova vrijednost je:

$$K_p=20; K_i=6.13822; K_d=15.548; K_{d2}=0.001.$$

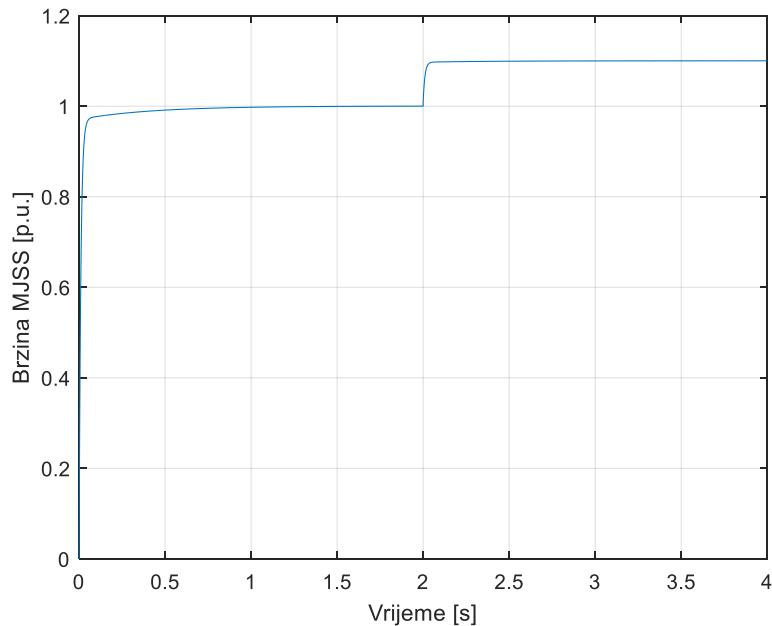
Odgovarajući odzivi brzine MJSS reguisanog primjenom FOPID regulatora prikazani su na slikama 6.9 i 6.10. Parametri FOPID regulatora su određeni primjenom ChAOA i njihova vrijednost je:

$$K_p=20; K_i=18.9283; K_d=20; \lambda =0.552751; \mu =0.951552.$$

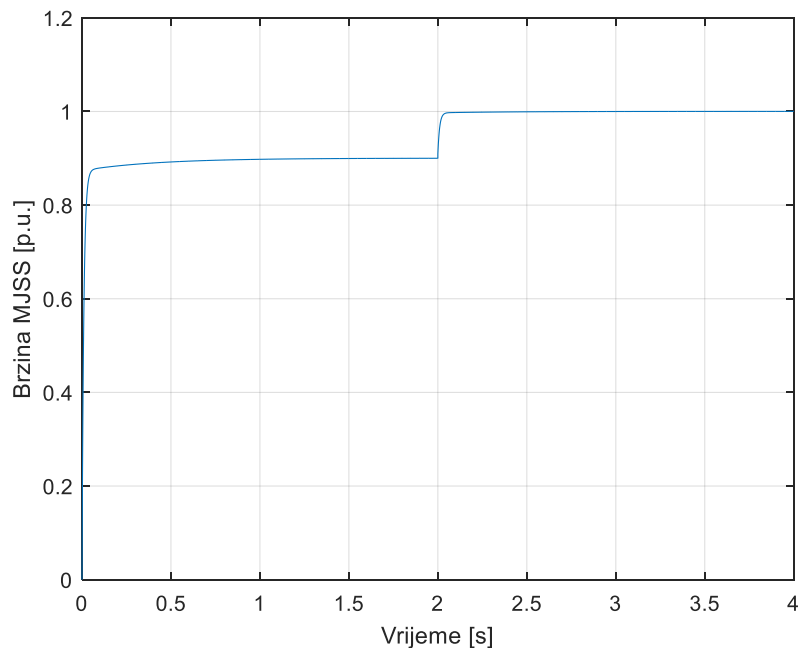
Odgovarajući odzivi brzine MJSS reguisanog primjenom TID regulatora prikazani su na slikama 6.11 i 6.12. Parametri TID regulatora su određeni primjenom ChAOA i njihova vrijednost je:

$$K_t=20; K_i=2.68495; K_d=20; n=3.$$

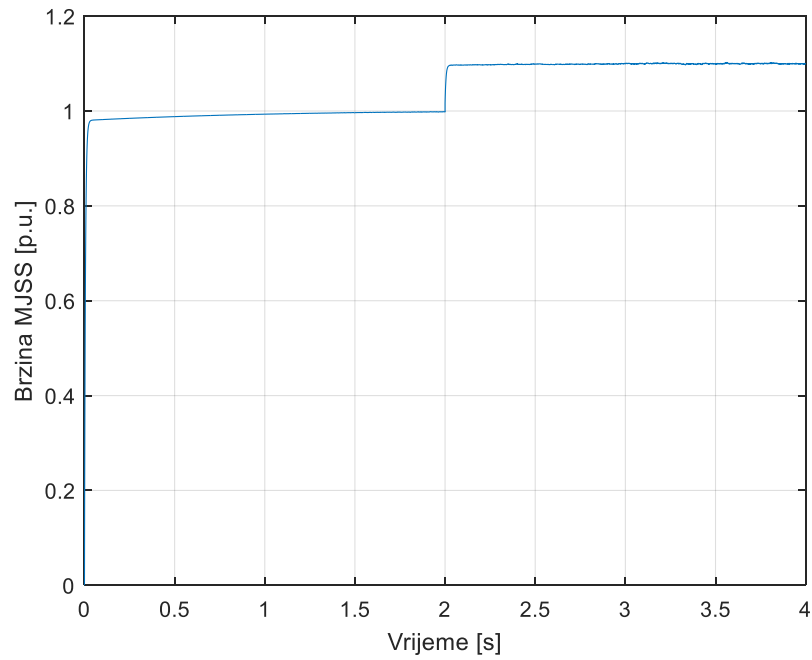
Kao što se vidi na osnovu svih prikazanih rezultata, bez obzira da li se se formira dejstvo step smetnje pri brzini od 0.9pu ili pri 1pu, sistem izuzetno brzo, i stabilno reaguje, pri čemu je vrijednost svih karakterističnih veličina (preskok, vrijeme uspona i slično) izuzetno mala, dok je rad mašine stabilan.



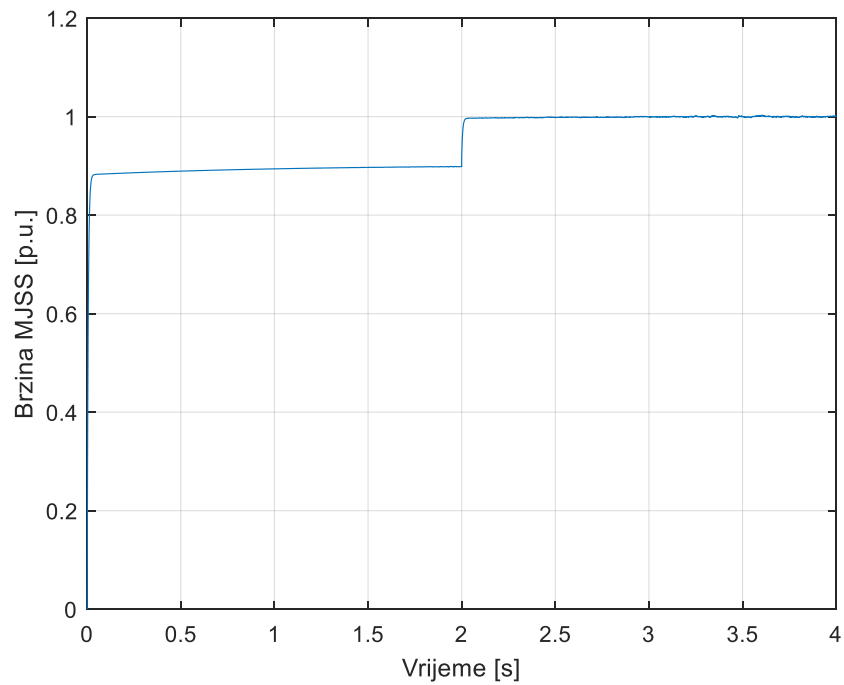
Slika 6.5: Odziv brzine MJSS na dejstvo step smetnje ako je prvobitna ustaljena vrijednost brzine obrtanja 1pu (primjena PID regulatora)



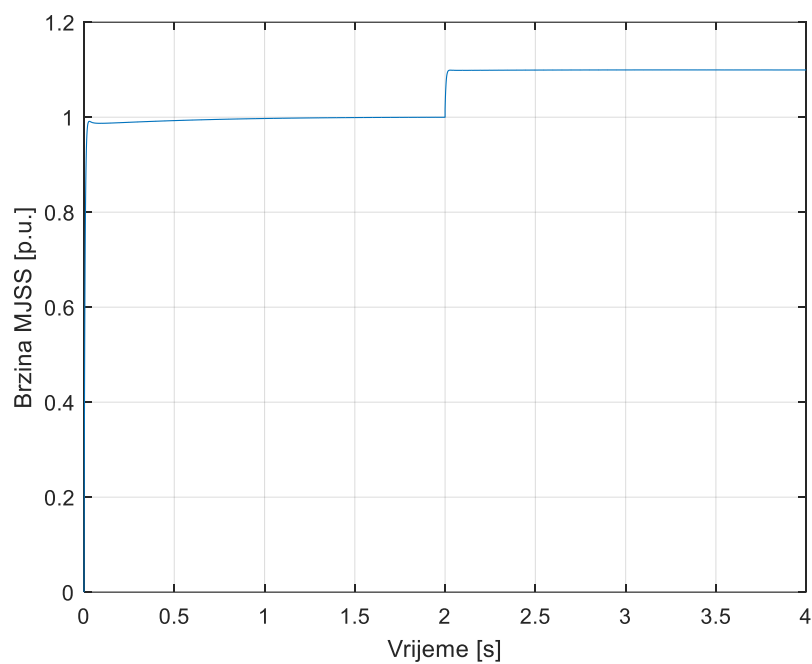
Slika 6.6: Odziv brzine MJSS na dejstvo step smetnje ako je prvobitna ustaljena vrijednost brzine obrtanja 0.9pu (primjena PID regulatora)



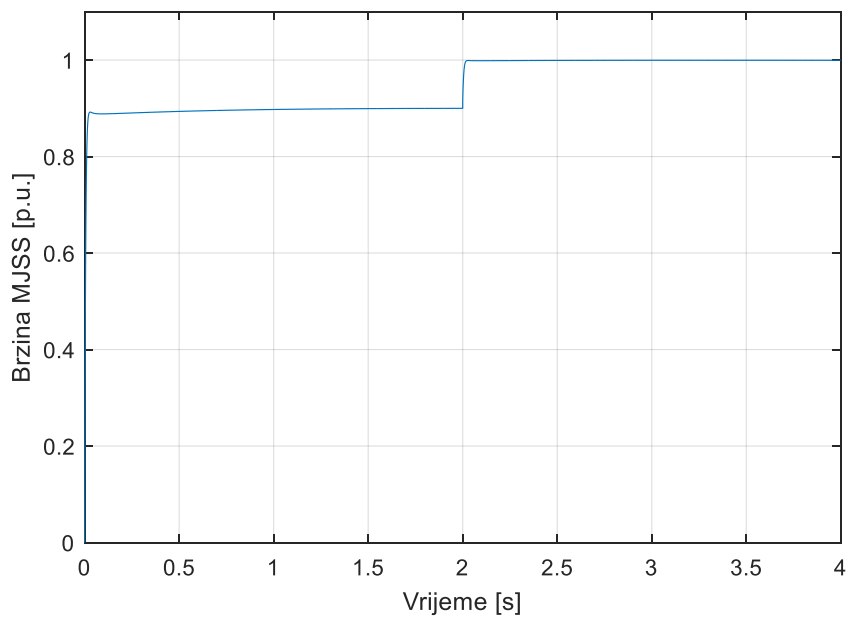
Slika 6.7: Odziv brzine MJSS na dejstvo step smetnje ako je prvobitna ustaljena vrijednost brzine obrtanja 1pu (primjena PIDD regulatora)



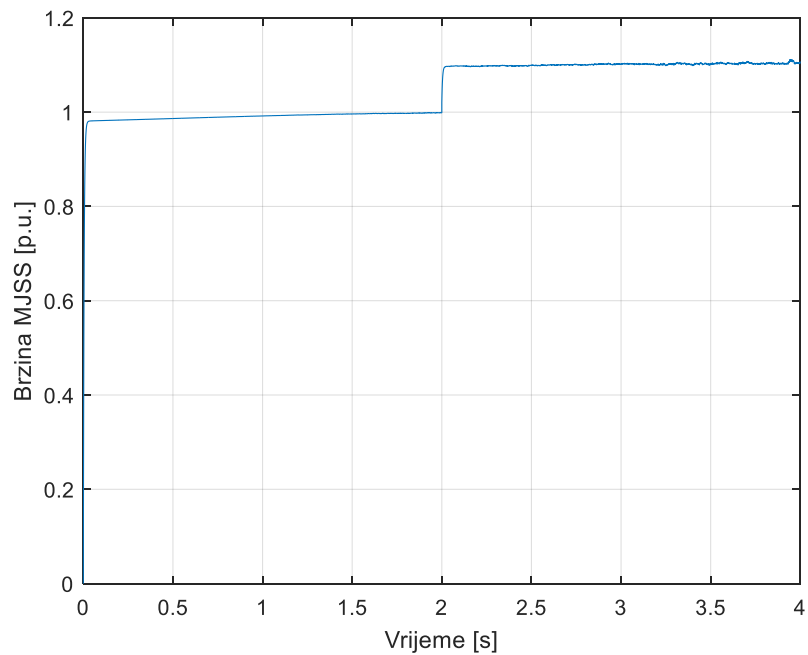
Slika 6.8: Odziv brzine MJSS na dejstvo step smetnje ako je prvobitna ustaljena vrijednost brzine obrtanja 1pu (primjena PIDD regulatora)



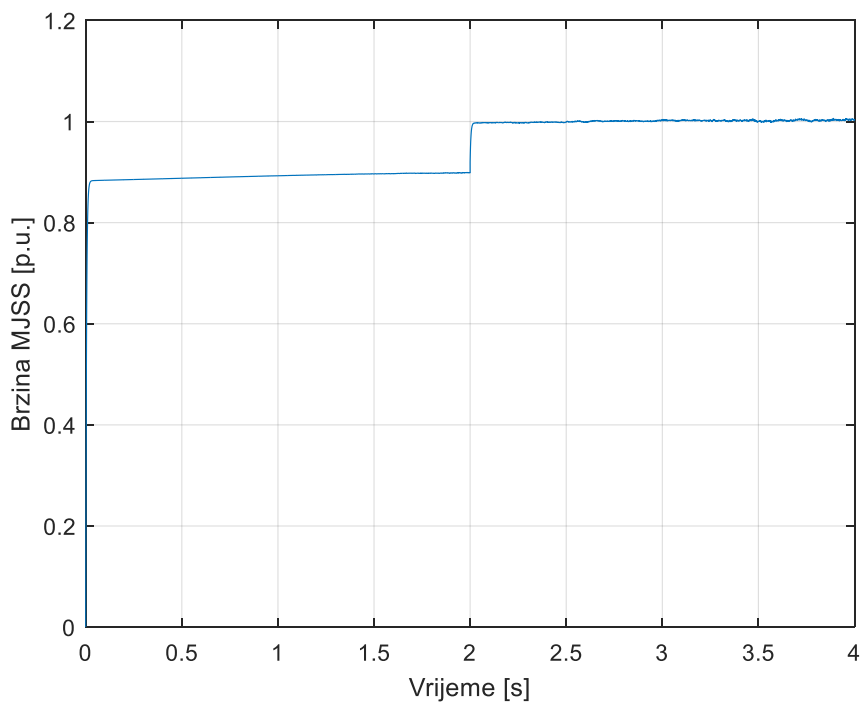
Slika 6.9: Odziv brzine MJSS na dejstvo step smetnje ako je prvobitna ustaljena vrijednost brzine obrtanja 1pu (primjena FOPID regulatora)



Slika 6.10: Odziv brzine MJSS na dejstvo step smetnje ako je prvobitna ustaljena vrijednost brzine obrtanja 1pu (primjena FOPID regulatora)



Slika 6.11: Odziv brzine MJSS na dejstvo step smetnje ako je prvobitna ustaljena vrijednost brzine obrtanja 1pu (primjena TID regulatora)

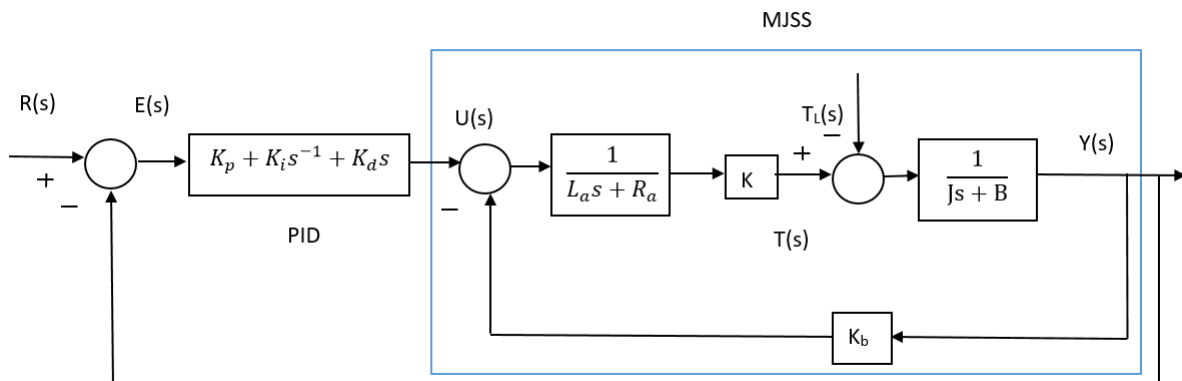


Slika 6.12: Odziv brzine MJSS na dejstvo step smetnje ako je prvobitna ustaljena vrijednost brzine obrtanja 1pu (primjena FOPID regulatora)

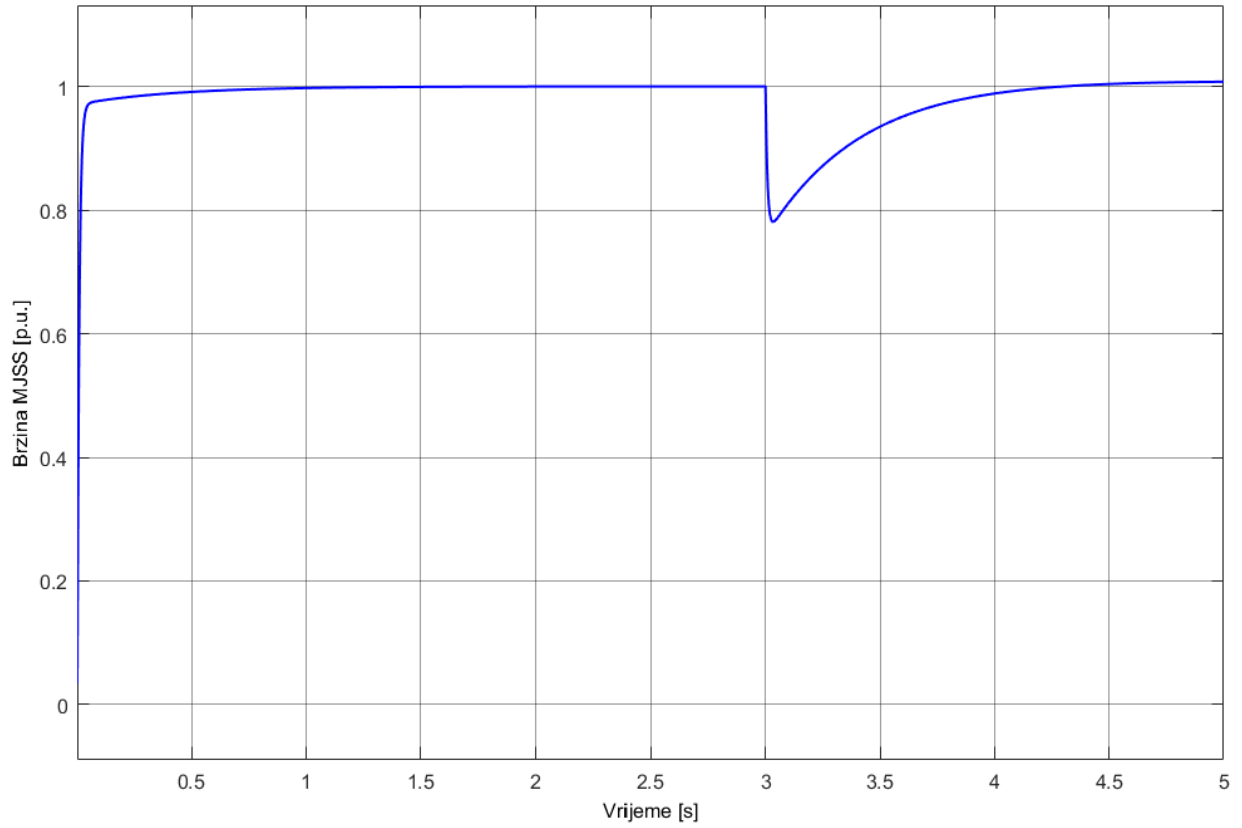
6.7. Uticaj promjene momenta na brzinu obrtanja

Na slici 6.13 prikazana je blok šema pogona sa MJSS. Treba naglasiti da su sve prethodno prikazane analize sprovedene za slučaj kada je $T_L=0$. Zbog toga je neophodno provjeriti i ponašanje posmatranog pogona u slučaju da T_L ima neku konačnu vrijednost. U tom cilju, analiziran je slučaj kada je vrijednost $T_L=0.01$. Pomenuta analiza sprovedena je u Matlab/SIMULINKU, dok je kao regulator korišćen PID regulator čiji su parametri prethodno određeni primjenom ChAOA algoritma ($K_p=20$; $K_i=5.43564$; $K_d=7.33131$). Posmatran je slučaj da se moment opterećenja aktivira u $t=3s$.

Na slici 6.14 je prikazan odziv dobijen opisanom analizom. S obzirom na to da se radi o regulisanom sistemu, kada dođe do dejstva momenta opterećenja, sistem se nakon prelaznog procesa vraća na referentnu vrijednost brzine. Ovo dokazuje da je sistem stabilan na dejstvo poremećaja tj. promjenu momenta opterećenja.



Slika 6.13: Blok dijagram MJSS s PID regulatorom



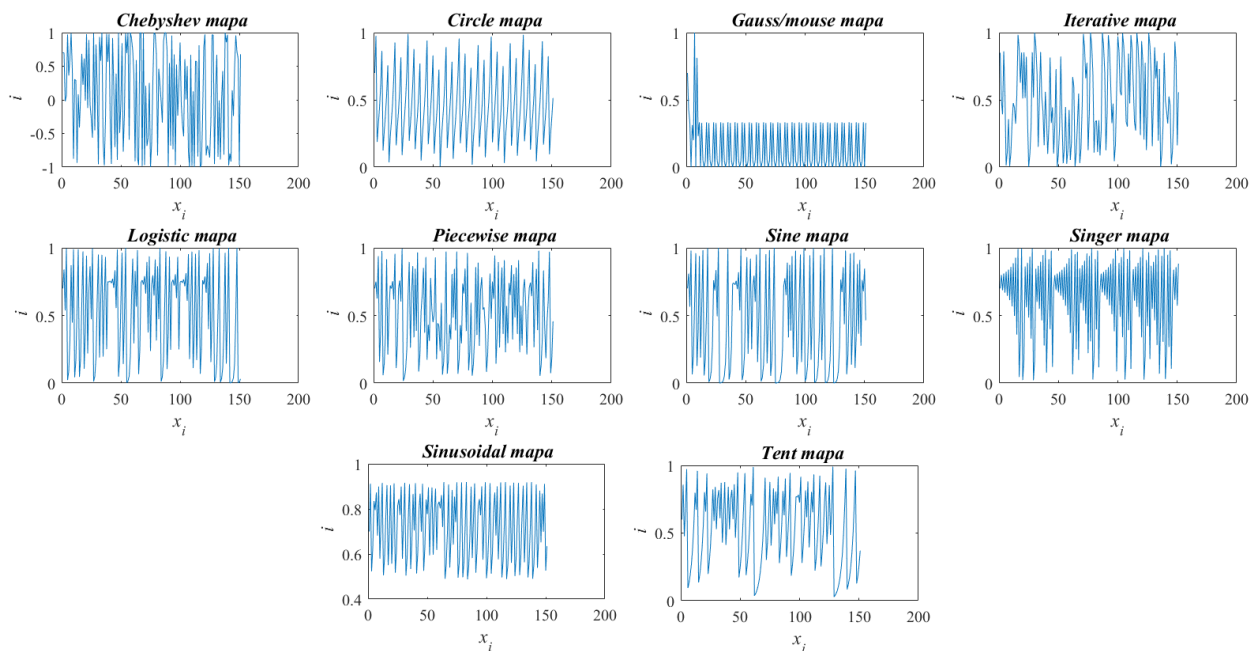
Slika 6.14: Odziv pogona MJSS sa PID-om za $T_L=0.01$.

7. STATISTIKA PREDLOŽENOG ChAOA

U ovom poglavlju će biti predstavljeni statistički podaci novog ChAOA algoritma primijenjenog za estimaciju parametara PID regulatora. Svaka od 10 haotičnih mapa je pokrenuta po 20 puta i za svako pokretanje su istaknute dobijene vrijednosti parametara PID regulatora, kao i vrijednosti preskoka, vremena uspona i vremena smirenja. Pored ovih vrijednosti proračunata je i srednja vrijednost greške za sve setove parametara.

Nakon Tabele sa rezultatima primjenom pojedinačne mapa prikazan je grafik greške odziva za svaki od setova parametara, kao i grafik srednje greške za primjenu pojedinačne haotične mapa.

Na slici 7.1 su prikazani grafici svake od 10 mapa koje su korištene: Chebyshev, Circle, Gauss/mouse, Iterative, Logistic, Piecewise, Sine, Singer, Sinusoidal i Tent.



Slika 7.1: Grafici primjenjivanih mapa

7.1. Chebyshev mapa

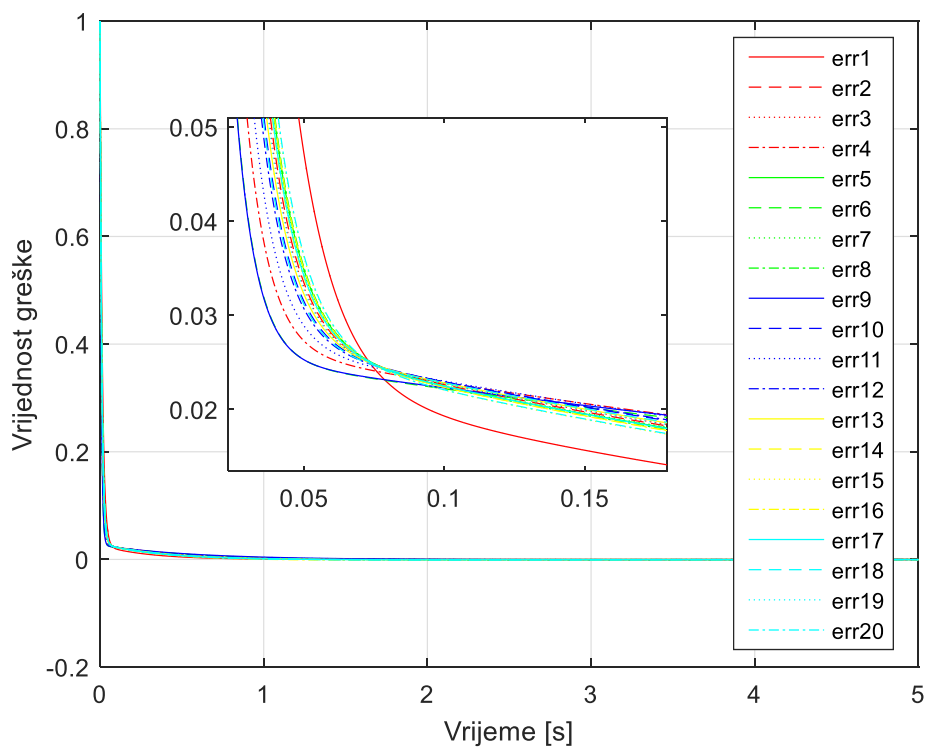
Matematička formulacija Chebyshev mape je data sljedećom jednačinom:

$$x_{i+1} = \cos(i \times \arccos^{-1}(x_i)), \text{ opseg}(-1,1) \quad (7.1)$$

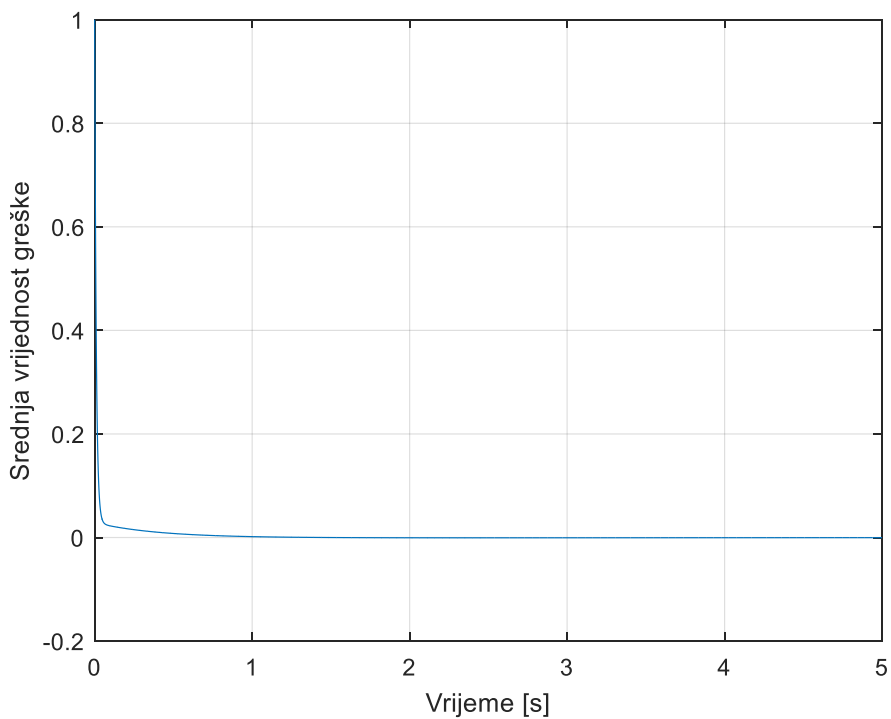
U Tabeli 7.1 su prikazani rezultati dobijeni za 20 pokretanja ChAOA algoritma Chebyshev mapom u procesu estimacije parametara PID regulatora. Na slikama 7.2 i 7.3 su prikazane vrijednosti greške step odziva za svako od 20 pokretanja (razlika referentne i mjerene vrijednosti brzine MJSS) i srednja vrijednost greške step odziva za svih 20 pokretanja algoritma.

Tabela 7.1 - Rezultati dobijeni korišćenjem Chebysheve mape

<i>Redni broj ponavljanja</i>	<i>K_p</i>	<i>K_i</i>	<i>K_d</i>	<i>Preskok [%]</i>	<i>Vrijeme uspona [s]</i>	<i>Vrijeme smirenja [s]</i>	<i>Srednja greška</i>
1	20	5.22784	5.14424	0	0.0332	0.0944	0.0042
2	20	6.01887	6.77132	0	0.0257	0.1453	0.0038
3	20	5.91389	6.87233	0	0.0253	0.1479	0.0038
4	20	5.83168	8.64564	0	0.0201	0.1654	0.0039
5	20	5.35	6.52104	0	0.0266	0.1415	0.0041
6	20	7.40681	9.69426	0	0.0178	0.1562	0.0032
7	20	5.44065	6.58848	0	0.0264	0.1429	0.0041
8	20	5.70474	6.47555	0	0.0268	0.1390	0.0039
9	20	5.48057	9.72977	0	0.0178	0.1620	0.0041
10	20	5.71568	7.21618	0	0.0241	0.1548	0.0039
11	20	5.75825	7.99244	0	0.0217	0.1634	0.0039
12	20	6.11877	7.41509	0	0.0235	0.1563	0.0037
13	20	5.9877	7.03136	0	0.0247	0.1507	0.0038
14	20	6.21213	6.5029	0	0.0267	0.1381	0.0037
15	20	6.41304	6.29933	0	0.0275	0.1318	0.0036
16	20	7.45339	6.65152	0	0.0261	0.1380	0.0031
17	20	6.27518	6.62541	0	0.0262	0.1411	0.0036
18	20	6.89851	7.2846	0	0.0239	0.1518	0.0034
19	20	6.19541	6.92568	0	0.0251	0.1480	0.0037
20	20	5.9023	6.26888	0	0.0277	0.1324	0.0038



Slika 7.2: Greška step odziva primjenom Chebyshev mape za pojedinačna pokretanja algoritma



Slika 7.3: Srednja greška step odziva primjenom Chebyshev mape za sva pokretanja algoritma

7.2. Circle mapa

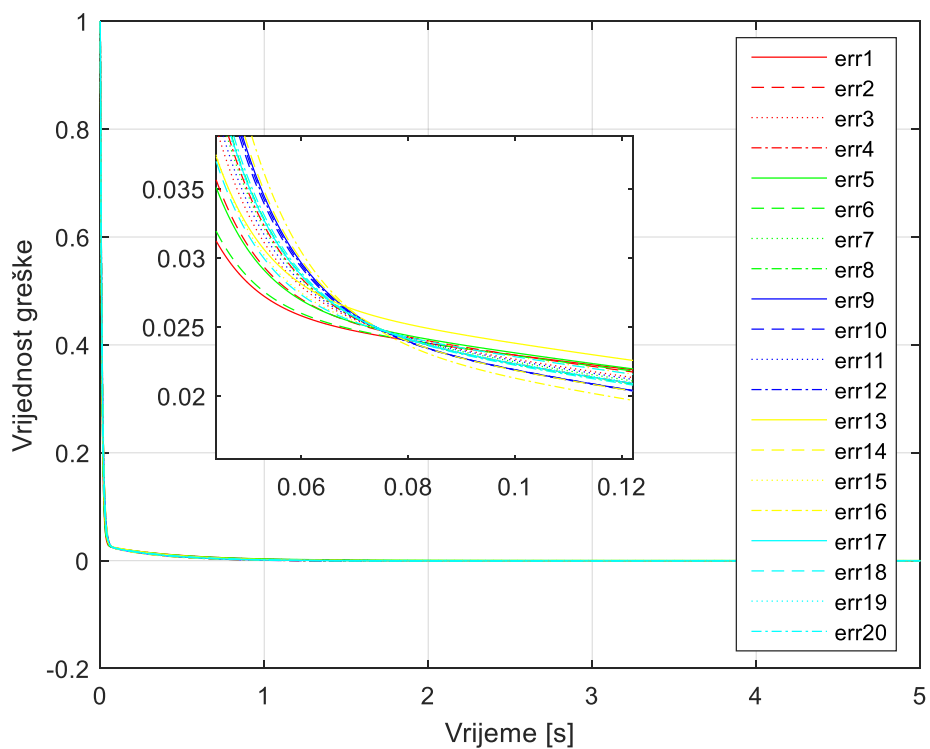
Matematička formulacija Circle mape je data sljedećom jednačinom:

$$x_{i+1} = \text{mod}\left(x_i + b - \frac{a}{2\pi} \sin(2\pi x_k, 1), a = 0.5, b = 0.2 \text{ opseg}(0,1)\right) \quad (7.2)$$

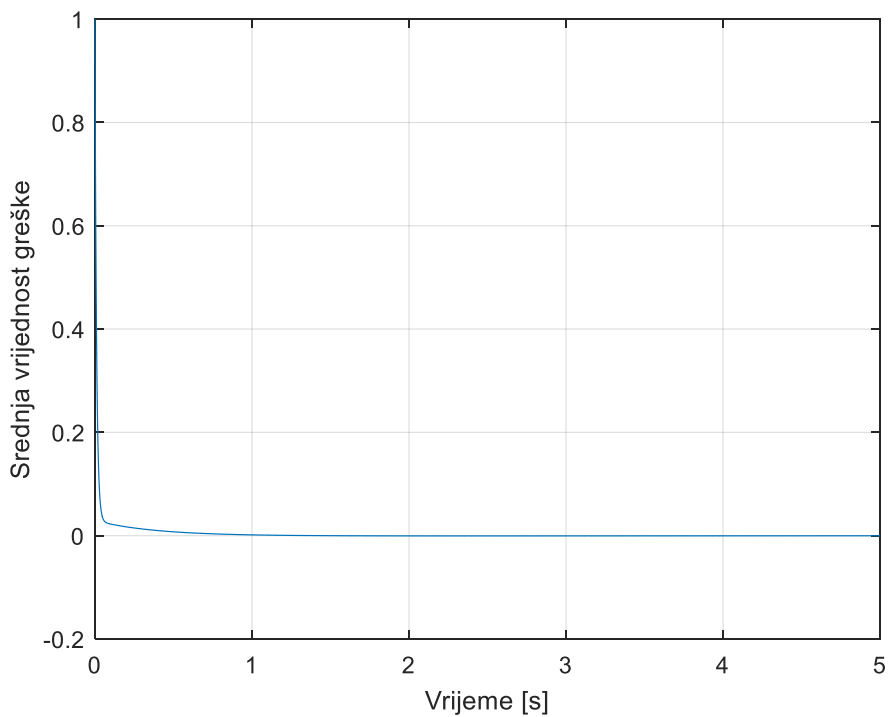
U Tabeli 7.2 su prikazani rezultati dobijeni za 20 pokretanja ChAOA algoritma Circle mapom u procesu estimacije parametara PID regulatora. Na slikama 7.4 i 7.5 su prikazane vrijednosti greške step odziva za svako od 20 pokretanja (razlika referentne i mjerene vrijednosti brzine MJSS) i srednja vrijednost greške step odziva za svih 20 pokretanja algoritma.

Tabela 7.2 - Rezultati primjenom Circle mape

<i>Redni broj ponavljanja</i>	<i>K_p</i>	<i>K_i</i>	<i>K_d</i>	<i>Preskok [%]</i>	<i>Vrijeme uspona [s]</i>	<i>Vrijeme smirenja [s]</i>	<i>Srednja greška</i>
1	20	5.82432	8.26294	0	0.0210	0.1646	0.0039
2	20	5.96301	7.37156	0	0.0236	0.1563	0.0038
3	20	6.11878	6.82532	0	0.0255	0.1462	0.0037
4	20	6.52382	6.51883	0	0.0266	0.1376	0.0035
5	20	4.52263	7.4717	0	0.0233	0.1629	0.0046
6	20	6.6507	8.08776	0	0.0215	0.1608	0.0035
7	20	5.83281	6.57041	0	0.0264	0.1411	0.0039
8	20	5.99946	6.42615	0	0.0270	0.1367	0.0038
9	20	5.38919	6.10361	0	0.0284	0.1286	0.0041
10	20	6.42593	6.19381	0	0.0280	0.1284	0.0036
11	20	5.97472	6.68158	0	0.0260	0.1434	0.0038
12	20	6.05359	6.14309	0	0.0282	0.1279	0.0037
13	20	5.82934	7.23705	0	0.0241	0.1726	0.0039
14	20	4.87657	6.04387	0	0.0286	0.1280	0.0044
15	20	5.8979	7.09184	0	0.0245	0.1521	0.0038
16	20	5.85643	5.83171	0	0.0296	0.1173	0.0038
17	20	5.83796	6.44026	0	0.0269	0.1376	0.0038
18	20	6.34048	7.16042	0	0.0243	0.1518	0.0036
19	20	5.76532	6.4724	0	0.0268	0.1388	0.0039
20	20	5.81423	6.36277	0	0.0273	0.1355	0.0039



Slika 7.4: Greška step odziva primjenom Circle mape za pojedinačna pokretanja algoritma



Slika 7.5: Srednja greška step odziva primjenom Circle mape za sva pokretanja algoritma

7.3. Gauss/mouse mapa

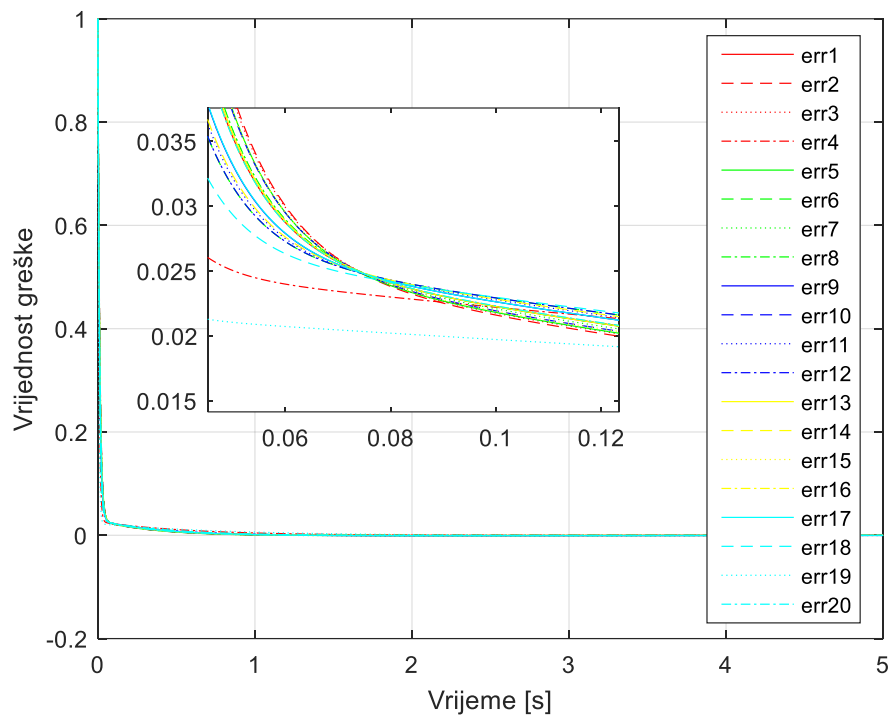
Matematička formulacija Gauss/mouse mape je data sljedećom jednačinom:

$$x_{i+1} = \begin{cases} 1, & x_i = 0 \\ \frac{1}{\text{mod}(x_i, 1)}, & x_i \neq 0 \end{cases} \quad \text{opseg}(0,1) \quad (7.3)$$

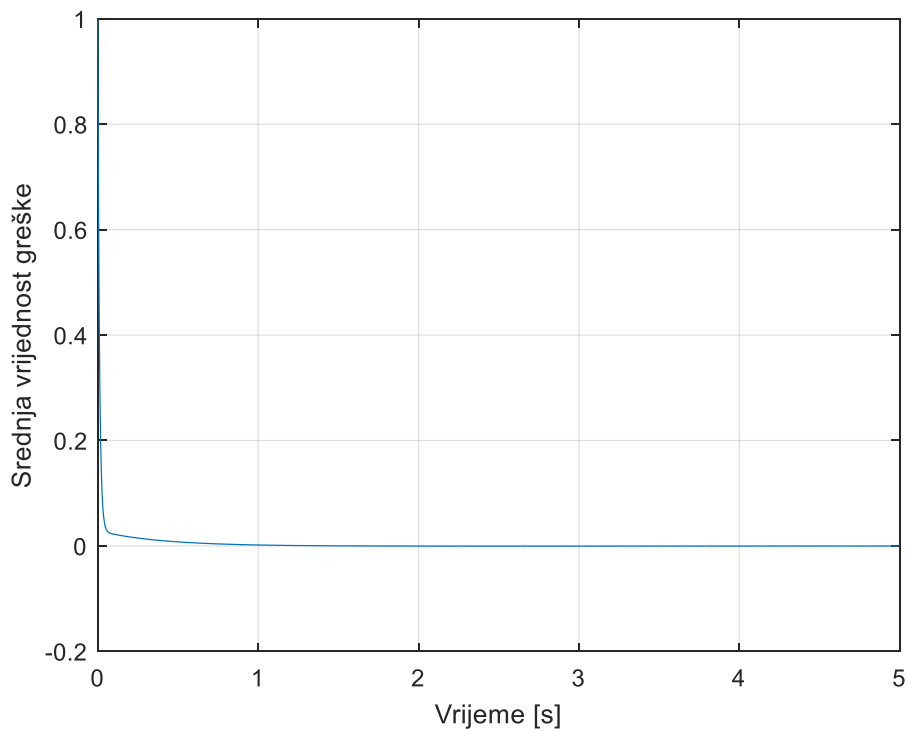
U Tabeli 7.3 su prikazani rezultati dobijeni za 20 pokretanja ChAOA algoritma Gauss/mouse mapom u procesu estimacije parametara PID regulatora. Na slikama 7.6 i 7.7 su prikazane vrijednosti greške step odziva za svako od 20 pokretanja (razlika referentne i mjerene vrijednosti brzine MJSS) i srednja vrijednost greške step odziva za svih 20 pokretanja algoritma.

Tabela 7.3 - Rezultati primjenom Gauss/mouse mape

<i>Redni broj ponavljanja</i>	K_p	K_i	K_d	<i>Preskok [%]</i>	<i>Vrijeme uspona [s]</i>	<i>Vrijeme smirenja [s]</i>	<i>Srednja greška</i>
1	20	6.14514	6.42637	0	0.0270	0.1363	0.0037
2	20	5.53182	5.9602	0	0.0290	0.1230	0.0040
3	20	5.11512	6.00687	0	0.0288	0.1260	0.0042
4	20	5.36087	9.8818	0	0.0175	0.1609	0.0042
5	20	6.17855	6.12012	0	0.0283	0.1268	0.0037
6	20	5.76954	7.20553	0	0.0241	0.1545	0.0039
7	20	6.60649	6.33728	0	0.0274	0.1323	0.0035
8	20	5.40758	6.34546	0	0.0273	0.1363	0.0041
9	20	6.41279	6.82099	0	0.0255	0.1451	0.0036
10	20	5.60096	6.14381	0	0.0282	0.1293	0.0040
11	20	6.35844	7.04198	0	0.0247	0.1497	0.0036
12	20	5.65351	7.20065	0	0.0241	0.1548	0.0040
13	20	5.80627	6.38599	0	0.0272	0.1362	0.0039
14	20	5.60391	6.99664	0	0.0248	0.1514	0.0040
15	20	5.58326	6.13242	0	0.0282	0.1289	0.0040
16	20	5.98187	6.43539	0	0.0270	0.1370	0.0038
17	20	6.32968	6.81191	0	0.0255	0.1452	0.0036
18	20	6.27377	7.82488	0	0.0222	0.1602	0.0037
19	20	5.54119	13.2464	0	0.0129	0.0886	0.0042
20	20	5.91531	6.44138	0	0.0269	0.1374	0.0038



Slika 7.6: Greška step odziva primjenom Gauss/mouse mape za pojedinačna pokretanja algoritma



Slika 7.7: Srednja greška step odziva primjenom Gauss/mouse mape za sva pokretanja algoritma

7.4. Iterative mapa

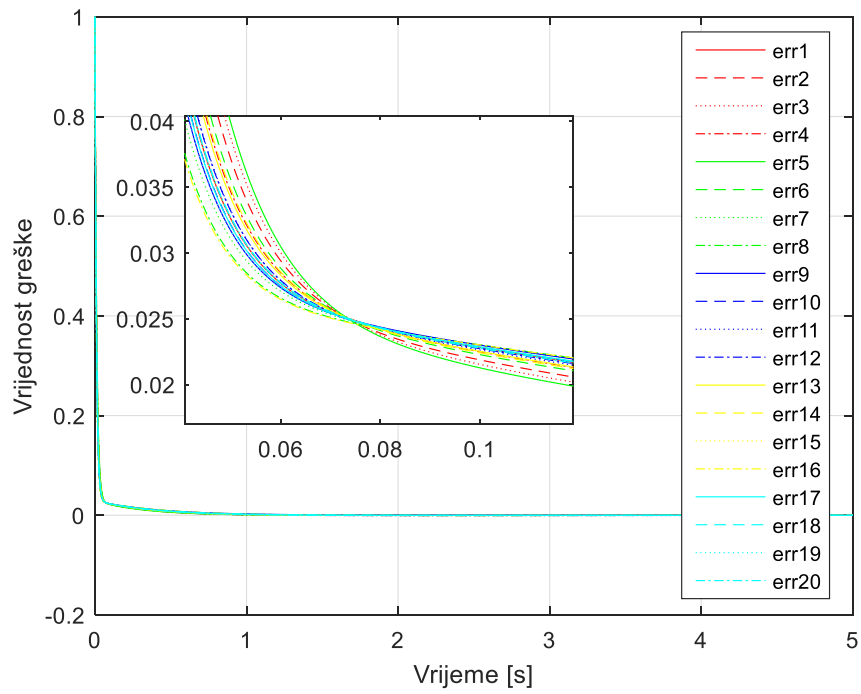
Matematička formulacija Iterative mape je data sljedećom jednačinom:

$$x_{i+1} = \sin \frac{a\pi}{x_i}, a = 0.7 \text{ opseg}(-1,1) \quad (7.4)$$

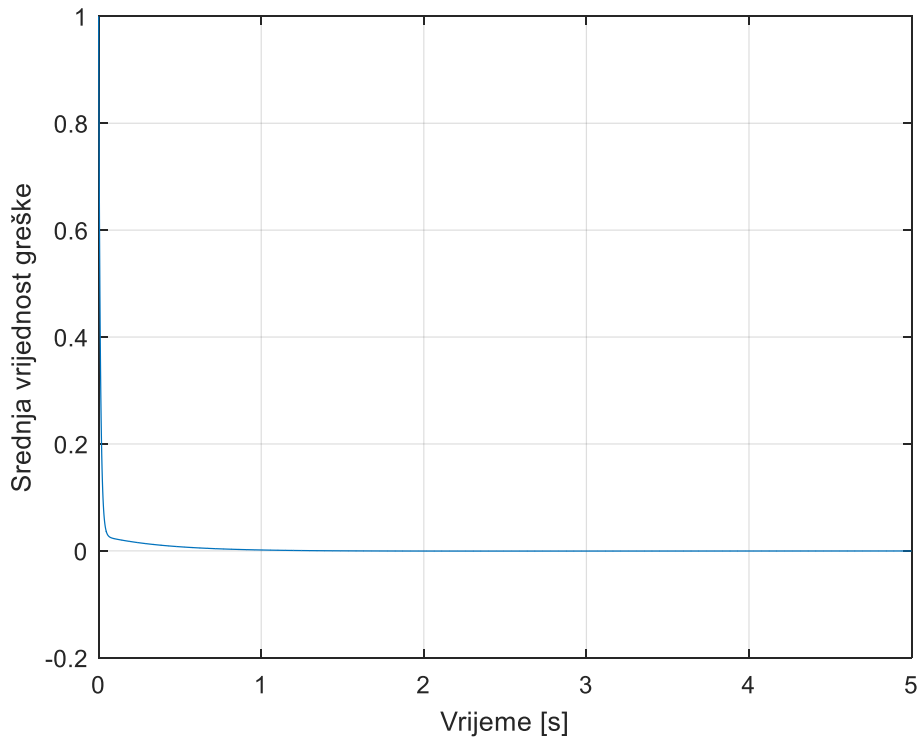
U Tabeli 7.4 su prikazani rezultati dobijeni za 20 pokretanja ChAOA algoritma Iterative mapom u procesu estimacije parametara PID regulatora. Na slikama 7.8 i 7.9 su prikazane vrijednosti greške step odziva za svako od 20 pokretanja (razlika referentne i mjerene vrijednosti brzine MJSS) i srednja vrijednost greške step odziva za svih 20 pokretanja algoritma.

Tabela 7.4 - Rezultati primjenom Iterative mape

Redni broj ponavljanja	K_p	K_i	K_d	Preskok [%]	Vrijeme uspona [s]	Vrijeme smirenja [s]	Srednja greška
1	20	5.67717	6.95667	0	0.0250	0.1504	0.0039
2	20	6.19971	6.15813	0	0.0281	0.1280	0.0037
3	20	5.87747	5.94914	0	0.0291	0.1216	0.0038
4	20	5.53697	6.55583	0	0.0265	0.1418	0.0040
5	20	5.72146	5.81416	0	0.0297	0.1170	0.0039
6	20	5.79048	6.39578	0	0.0271	0.1365	0.0039
7	20	5.43564	7.33131	0	0.0237	0.1576	0.0041
8	20	5.78287	7.66889	0	0.0227	0.1605	0.0039
9	20	4.97417	7.17384	0	0.0242	0.1568	0.0043
10	20	5.9798	7.06059	0	0.0246	0.1513	0.0038
11	20	6.42374	6.81861	0	0.0255	0.1450	0.0036
12	20	5.68962	6.83525	0	0.0254	0.1479	0.0039
13	20	5.94819	6.63336	0	0.0262	0.1423	0.0038
14	20	5.83614	6.51554	0	0.0266	0.1397	0.0039
15	20	5.81927	6.95742	0	0.0250	0.1499	0.0039
16	20	5.92747	7.73799	0	0.0225	0.1607	0.0038
17	20	5.71037	7.07283	0	0.0246	0.1524	0.0039
18	20	5.22716	6.94323	0	0.0250	0.1517	0.0042
19	20	6.22913	7.15607	0	0.0243	0.1521	0.0037
20	20	5.94482	6.92946	0	0.0251	0.1489	0.0038



Slika 7.8: Greška step odziva primjenom Iterative mape za pojedinačna pokretanja algoritma



Slika 7.9: Srednja greška step odziva primjenom Iterative mape za sva pokretanja algoritma

7.5. Logistic mapa

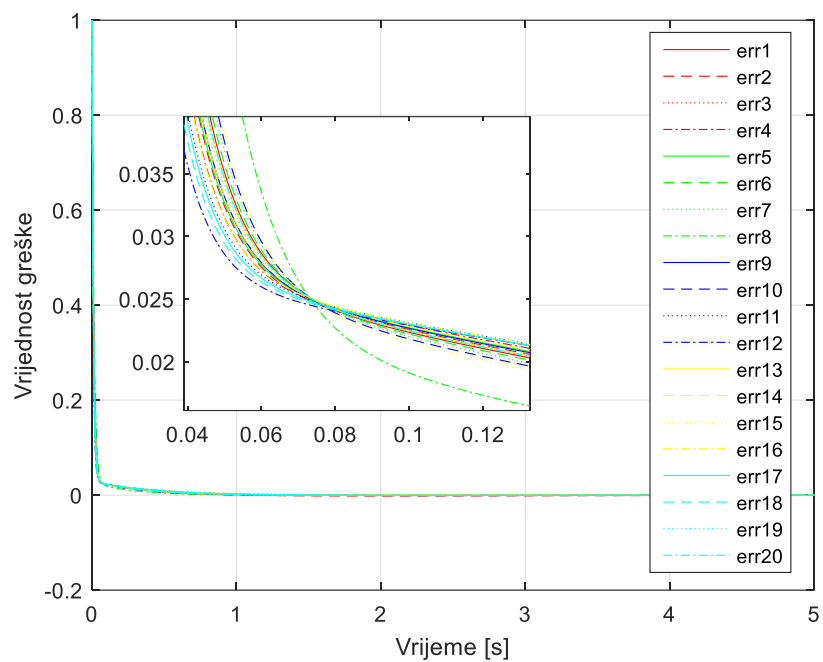
Matematička formulacija Logistic mape je data sljedećom jednačinom:

$$x_{i+1} = ax_i(1 - x_i), a = 4 \quad \text{opseg}(0,1) \quad (7.5)$$

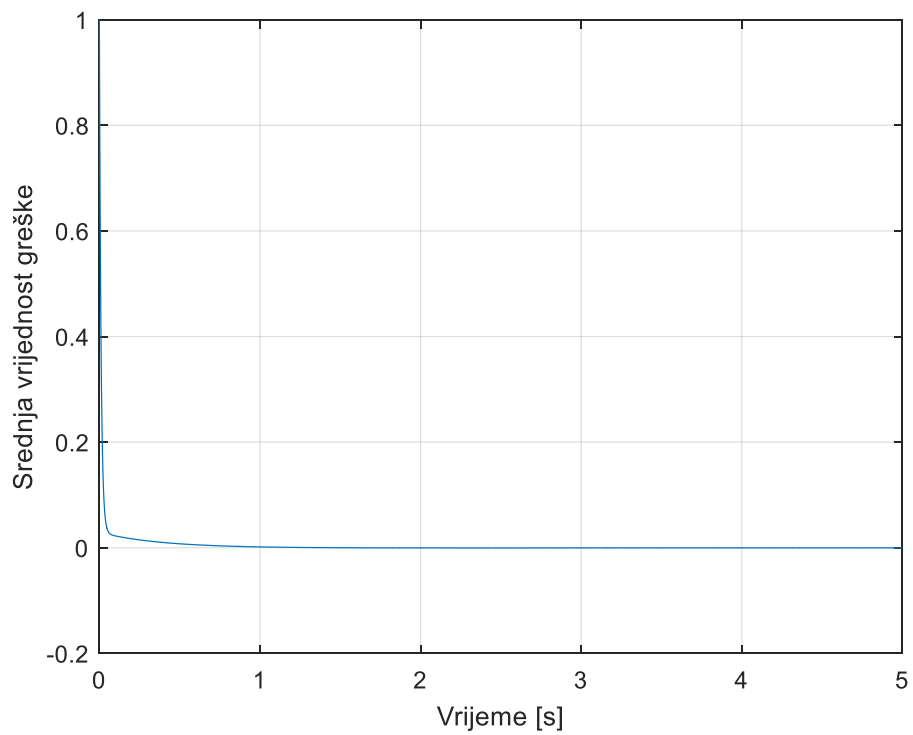
U Tabeli 7.5 su prikazani rezultati dobijeni za 20 pokretanja ChAOA algoritma Logistic mapom u procesu estimacije parametara PID regulatora. Na slikama 7.10 i 7.11 su prikazane vrijednosti greške step odziva za svako od 20 pokretanja (razlika referentne i mjerene vrijednosti brzine MJSS) i srednja vrijednost greške step odziva za svih 20 pokretanja algoritma.

Tabela 7.5 - Rezultati primjenom Logistic mape

Redni broj ponavljanja	K _p	K _i	K _d	Preskok [%]	Vrijeme uspona [s]	Vrijeme smirenja [s]	Srednja greška
1	20	5.88866	6.47025	0	0.0268	0.1383	0.0038
2	20	7.85544	6.96624	0	0.0250	0.1434	0.0030
3	20	5.77461	6.55551	0	0.0265	0.1410	0.0039
4	20	5.95859	7.20182	0	0.0241	0.1538	0.0038
5	20	6.19541	6.92568	0	0.0251	0.1480	0.0037
6	20	5.91707	6.36034	0	0.0273	0.1351	0.0038
7	20	5.63396	6.1979	0	0.0280	0.1310	0.0040
8	20	5.60975	5.11823	0	0.0334	0.0933	0.0039
9	20	6.11878	6.82532	0	0.0255	0.1462	0.0037
10	20	5.84611	6.09967	0	0.0284	0.1270	0.0038
11	20	4.52263	7.4717	0	0.0233	0.1629	0.0046
12	20	6.6507	8.08776	0	0.0215	0.1608	0.0035
13	20	5.83281	6.57041	0	0.0264	0.1411	0.0039
14	20	4.77732	6.83125	0	0.0254	0.1510	0.0045
15	20	6.26344	5.99682	0	0.0289	0.1223	0.0036
16	20	3.99982	7.23705	0	0.0240	0.1616	0.0050
17	20	5.82251	7.58804	0	0.0229	0.1595	0.0039
18	20	6.10549	7.79244	0	0.0223	0.1606	0.0037
19	20	5.58003	6.66635	0	0.0261	0.1444	0.0040
20	20	5.82326	6.55112	0	0.0265	0.1407	0.0039



Slika 7.10: Greška step odziva primjenom Logistic mape za pojedinačna pokretanja algoritma



Slika 7.11: Srednja greška step odziva primjenom Logistic mape za sva pokretanja algoritma

7.6. Piecewise mapa

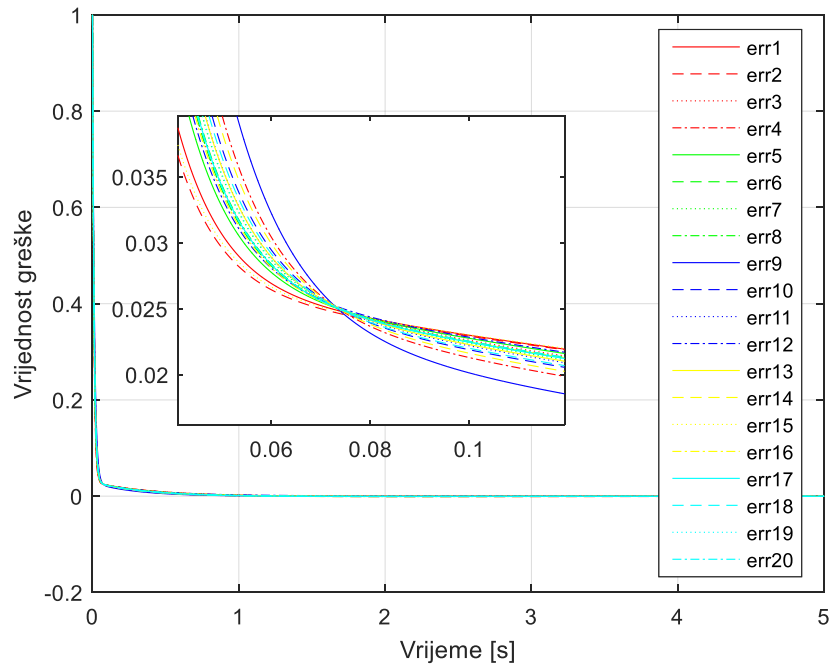
Matematička formulacija Piecewise mape je data sljedećom jednačinom:

$$x_{i+1} = \begin{cases} \frac{x_i}{P}, & 0 \leq x_i < P \\ \frac{x_i - P}{0.5 - P}, & P \leq x_i < 0.5, P = 0.4 \\ \frac{1 - P - x_i}{0.5 - P}, & 0.5 \leq x_i < 1 - P \\ \frac{1 - x_i}{P}, & 1 - P \leq x_i < 1 \end{cases} \quad (7.6)$$

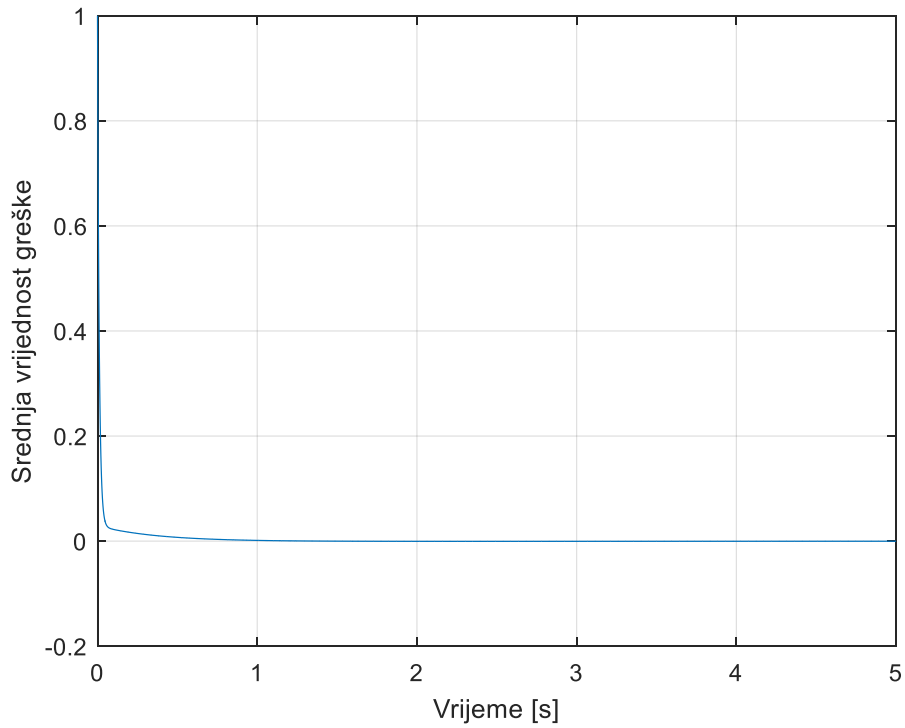
U Tabeli 7.6 su prikazani rezultati dobijeni za 20 pokretanja ChAOA algoritma Piecewise mapom u procesu estimacije parametara PID regulatora. Na slikama 7.12 i 7.13 su prikazane vrijednosti greške step odziva za svako od 20 pokretanja (razlika referentne i mjerene vrijednosti brzine MJSS) i srednja vrijednost greške step odziva za svih 20 pokretanja algoritma.

Tabela 7.6: Rezultati primjenom Piecewise mape

Redni broj ponavljanja	K_p	K_i	K_d	Preskok [%]	Vrijeme uspona [s]	Vrijeme smirenja [s]	Srednja greška
1	20	5.82457	7.43468	0	0.0234	0.1576	0.0039
2	20	6.92837	7.73166	0	0.0225	0.1572	0.0034
3	20	5.44418	6.66216	0	0.0261	0.1447	0.0041
4	20	5.85643	5.83171	0	0.0296	0.1173	0.0038
5	20	5.95786	6.91967	0	0.0251	0.1487	0.0038
6	20	6.19298	6.66032	0	0.0261	0.1422	0.0037
7	20	5.76532	6.4724	0	0.0268	0.1388	0.0039
8	20	5.94655	6.59547	0	0.0263	0.1414	0.0038
9	20	5.43405	5.38305	0	0.0319	0.1013	0.0040
10	20	6.02496	6.14994	0	0.0282	0.1282	0.0037
11	20	6.13723	6.36053	0	0.0273	0.1344	0.0037
12	20	4.46228	6.7915	0	0.0256	0.1513	0.0047
13	20	5.55129	6.37312	0	0.0272	0.1366	0.0040
14	20	5.80652	5.98545	0	0.0289	0.1231	0.0039
15	20	5.72542	7.61811	0	0.0228	0.1602	0.0039
16	20	6.72055	6.70553	0	0.0259	0.1415	0.0034
17	20	6.35555	6.60924	0	0.0263	0.1404	0.0036
18	20	6.32173	6.24555	0	0.0278	0.1304	0.0036
19	20	4.93507	6.46073	0	0.0269	0.1412	0.0044
20	20	5.84503	6.62782	0	0.0262	0.1425	0.0038



Slika 7.12: Greška step odziva primjenom Piecewise mape za pojedinačna pokretanja algoritma



Slika 7.13: Srednja greška step odziva primjenom Piecewise mape za sva pokretanja algoritma

7.7. Sine mapa

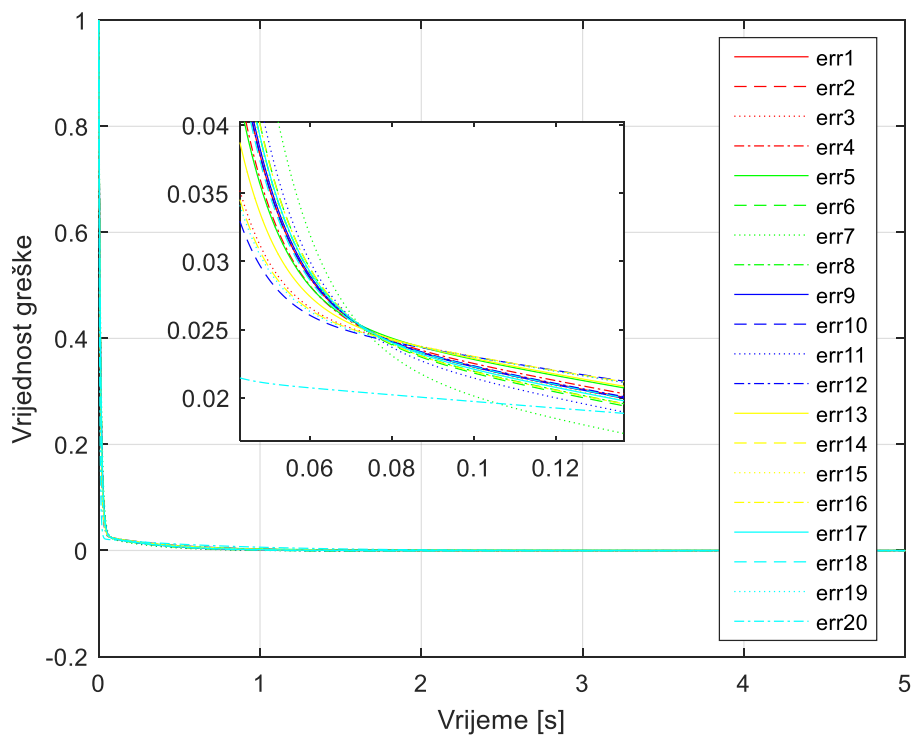
Matematička formulacija Sine mape je data sljedećom jednačinom:

$$x_{i+1} = \frac{a}{4} \sin(\pi x_i), \quad a = 4 \quad (7.7)$$

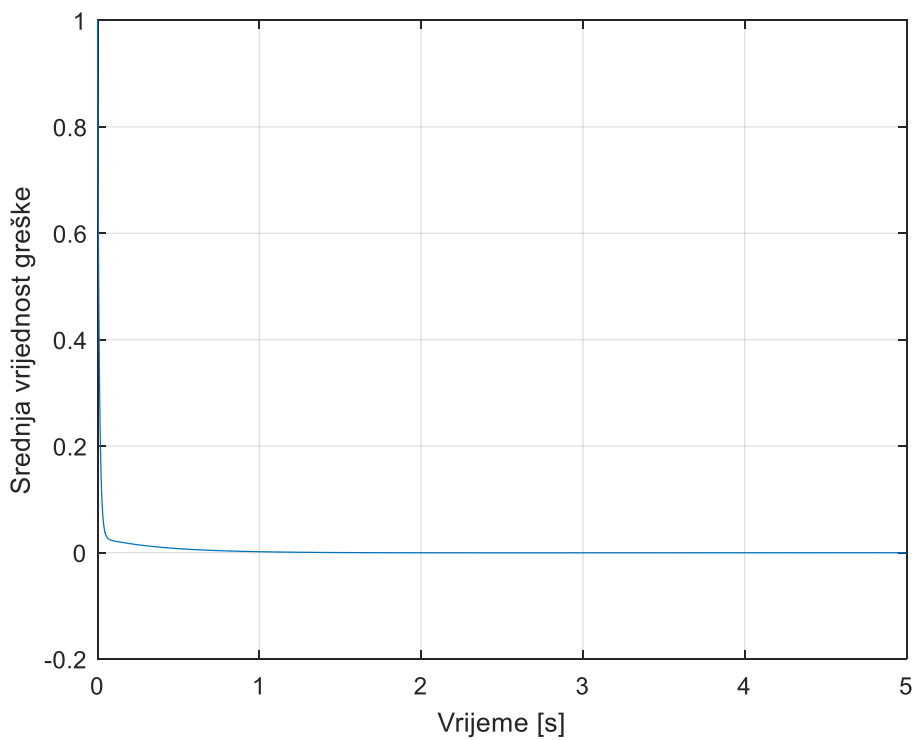
U Tabeli 7.7 su prikazani rezultati dobijeni za 20 pokretanja ChAOA algoritma Sine mapom u procesu estimacije parametara PID regulatora. Na slikama 7.14 i 7.15 su prikazane vrijednosti greške step odziva za svako od 20 pokretanja (razlika referentne i mjerene vrijednosti brzine MJSS) i srednja vrijednost greške step odziva za svih 20 pokretanja algoritma.

Tabela 7.7: Rezultati primjenom Sine mape

<i>Redni broj ponavljanja</i>	K_p	K_i	K_d	<i>Preskok [%]</i>	<i>Vrijeme uspona [s]</i>	<i>Vrijeme smirenja [s]</i>	<i>Srednja greška</i>
1	20	5.63973	6.40615	0	0.0271	0.1373	0.0040
2	20	6.13538	6.41163	0	0.0271	0.1359	0.0037
3	20	5.83325	7.6347	0	0.0228	0.1600	0.0039
4	20	6.23676	6.65882	0	0.0261	0.1420	0.0037
5	20	4.30201	6.73524	0	0.0258	0.1506	0.0048
6	20	6.17855	6.12012	0	0.0283	0.1268	0.0037
7	20	6.20531	5.42082	0	0.0317	0.1013	0.0036
8	20	6.50855	6.22968	0	0.0278	0.1293	0.0035
9	20	5.40758	6.34546	0	0.0273	0.1363	0.0041
10	20	5.83959	8.05768	0	0.0216	0.1635	0.0039
11	20	6.40403	5.94054	0	0.0291	0.1199	0.0036
12	20	5.4406	6.40966	0	0.0271	0.1381	0.0041
13	20	5.71481	7.10411	0	0.0245	0.1530	0.0039
14	20	5.74275	7.7521	0	0.0224	0.1615	0.0039
15	20	5.62152	6.27984	0	0.0276	0.1336	0.0040
16	20	5.58326	6.13242	0	0.0282	0.1289	0.0040
17	20	5.42808	6.23275	0	0.0278	0.1327	0.0041
18	20	6.46593	6.46593	0	0.0268	0.1364	0.0035
19	20	6.27377	7.82488	0	0.0222	0.1602	0.0037
20	20	5.54119	13.2464	0	0.0129	0.0886	0.0042



Slika 7.14: Greška step odziva primjenom Sine mape za pojedinačna pokretanja algoritma



Slika 7.15: Srednja greška step odziva primjenom Sine mape za sva pokretanja algoritma

7.8. Singer mapa

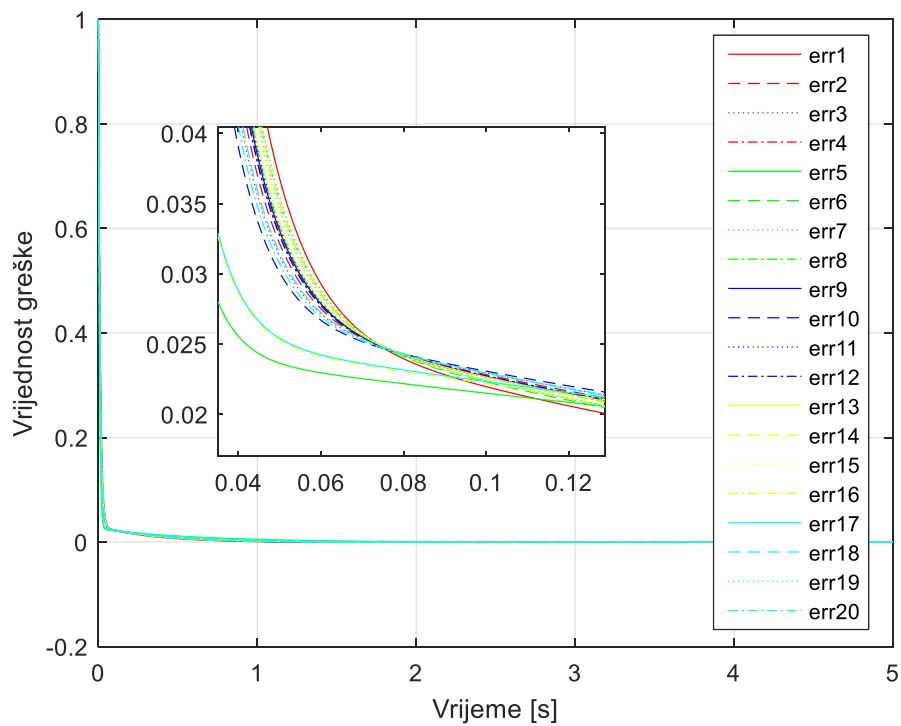
Matematička formulacija Singer mape je data sljedećom jednačinom:

$$x_{i+1} = \mu(7.86x_i - 23.31x_i^2 + 23.75x_i^3 - 13.302875x_i^4), \mu = 1.07, \text{ opseg}(0,1) \quad (7.8)$$

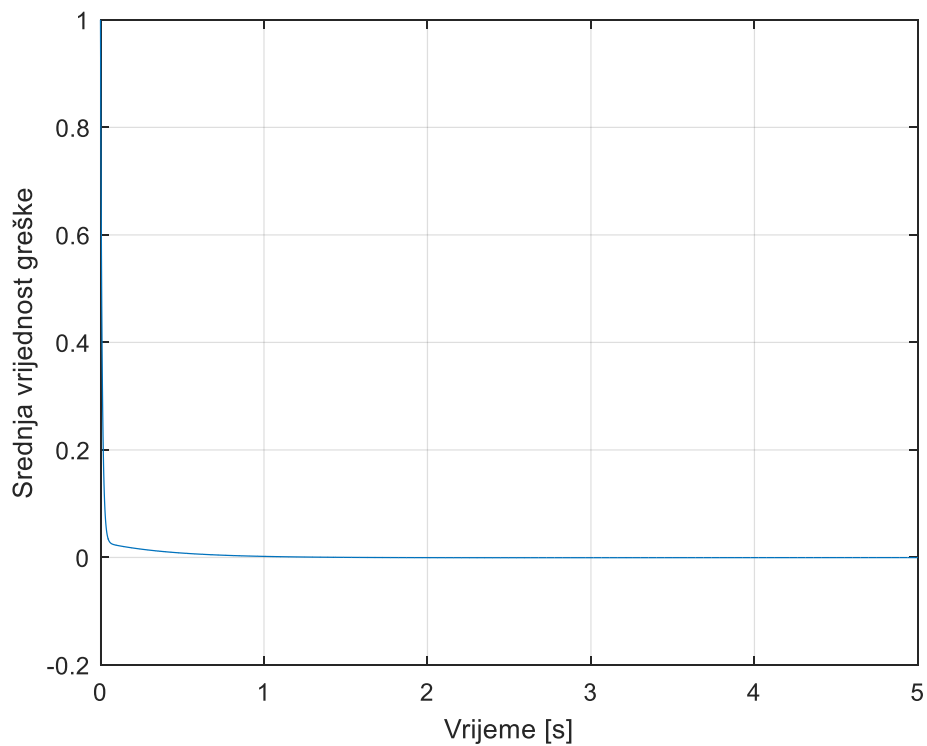
U Tabeli 7.8 su prikazani rezultati dobijeni za 20 pokretanja ChAOA algoritma Singer mapom u procesu estimacije parametara PID regulatora. Na slikama 7.16 i 7.17 su prikazane vrijednosti greške step odziva za svako od 20 pokretanja (razlika referentne i mjerene vrijednosti brzine MJSS) i srednja vrijednost greške step odziva za svih 20 pokretanja algoritma.

Tabela 7.8: Rezultati primjenom Singer mape

<i>Redni broj ponavljanja</i>	K_p	K_i	K_d	<i>Preskok [%]</i>	<i>Vrijeme uspona [s]</i>	<i>Vrijeme smirenja [s]</i>	<i>Srednja greška</i>
1	20	6.14222	6.21168	0	0.0279	0.1299	0.0037
2	20	6.02758	7.05587	0	0.0246	0.1510	0.0038
3	20	5.72454	7.27893	0	0.0239	0.1558	0.0039
4	20	6.24914	6.91956	0	0.0251	0.1477	0.0037
5	20	5.4068	10.8936	0	0.0158	0.1471	0.0042
6	20	6.25892	6.47054	0	0.0268	0.1371	0.0036
7	20	5.10978	6.41502	0	0.0271	0.1393	0.0043
8	20	6.37199	6.80758	0	0.0255	0.1450	0.0036
9	20	6.28197	6.85502	0	0.0254	0.1463	0.0036
10	20	5.23148	7.60745	0	0.0229	0.1619	0.0042
11	20	5.43353	6.79759	0	0.0256	0.1479	0.0041
12	20	6.09212	6.92336	0	0.0251	0.1483	0.0037
13	20	5.67557	6.7385	0	0.0258	0.1458	0.0039
14	20	7.40681	9.69426	0	0.0178	0.1562	0.0032
15	20	5.40588	6.53074	0	0.0266	0.1415	0.0041
16	20	5.70474	6.47555	0	0.0268	0.1390	0.0039
17	20	5.78405	9.64922	0	0.0179	0.1616	0.0039
18	20	5.71568	7.21618	0	0.0241	0.1548	0.0039
19	20	6.15093	6.57139	0	0.0264	0.1401	0.0037
20	20	6.11877	7.41509	0	0.0235	0.1563	0.0037



Slika 7.16: Greška step odziva primjenom Singer mape za pojedinačna pokretanja algoritma



Slika 7.17: Srednja greška step odziva primjenom Singer mape za sva pokretanja algoritma

7.9. Sinusoidal mapa

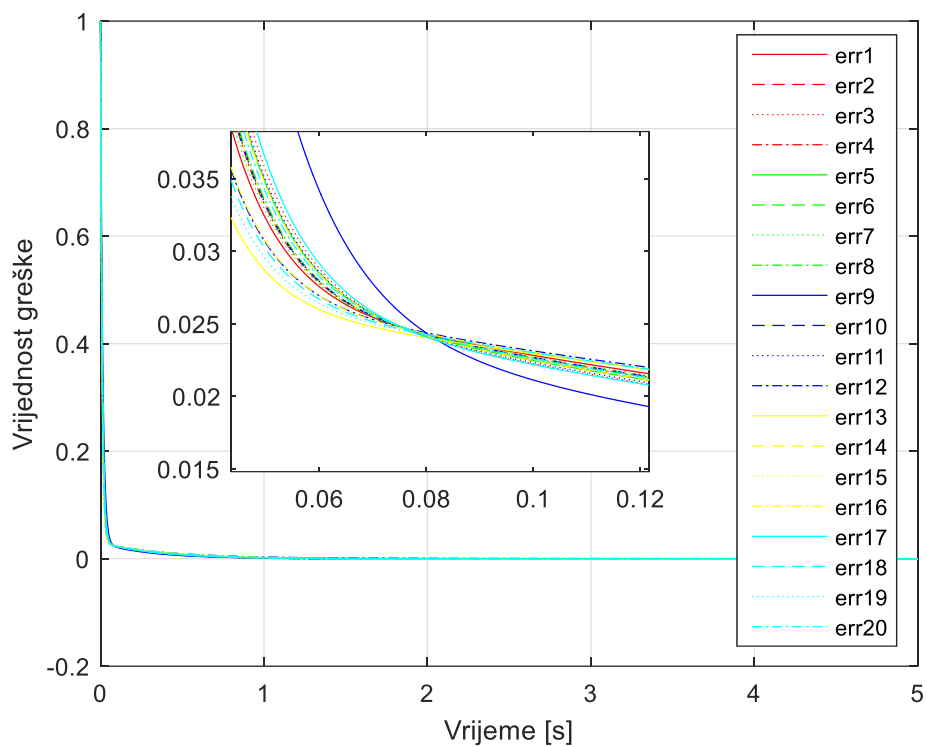
Matematička formulacija Sinusoidal mape je data sljedećom jednačinom:

$$x_{i+1} = ax_i^2 \sin(\pi x_i), a = 2.3 \text{ opseg}(0,1) \quad (7.9)$$

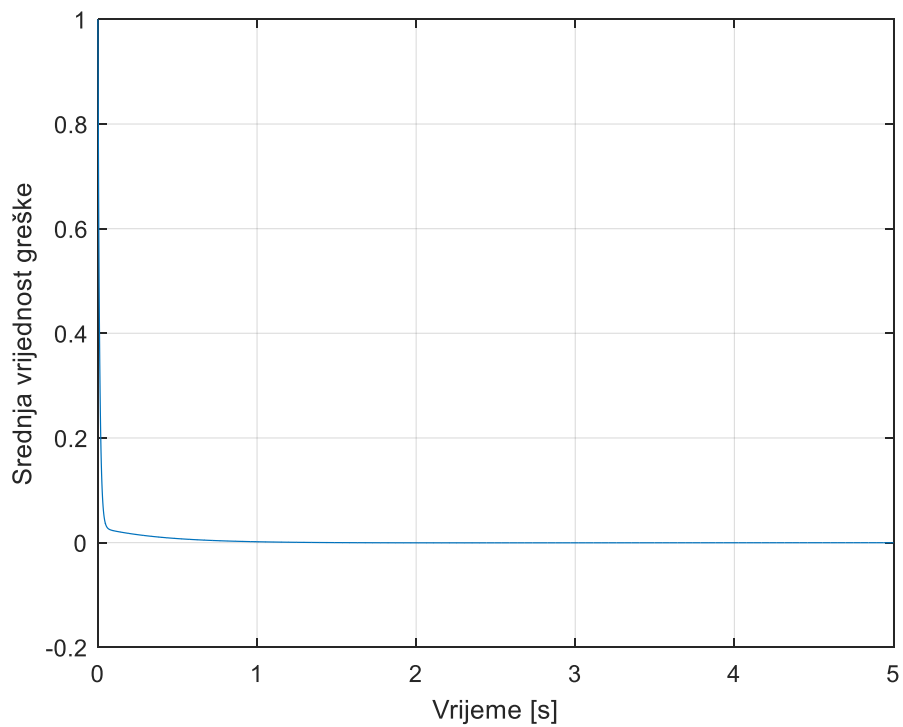
U Tabeli 7.9 su prikazani rezultati dobijeni za 20 pokretanja ChAOA algoritma Sinusoidal mapom u procesu estimacije parametara PID regulatora. Na slikama 7.18 i 7.19 su prikazane vrijednosti greške step odziva za svako od 20 pokretanja (razlika referentne i mjerene vrijednosti brzine MJSS) i srednja vrijednost greške step odziva za svih 20 pokretanja algoritma.

Tabela 7.9: Rezultati primjenom Sinusoidal mape

<i>Redni broj ponavljanja</i>	<i>K_p</i>	<i>K_i</i>	<i>K_d</i>	<i>Preskok [%]</i>	<i>Vrijeme uspona [s]</i>	<i>Vrijeme smirenja [s]</i>	<i>Srednja greška</i>
1	20	5.9877	7.03136	0	0.0247	0.1507	0.0038
2	20	5.67746	6.553	0	0.0265	0.1412	0.0039
3	20	6.07515	6.39723	0	0.0271	0.1357	0.0037
4	20	6.56498	6.84705	0	0.0254	0.1452	0.0035
5	20	5.77461	6.55551	0	0.0265	0.1410	0.0039
6	20	6.34794	6.81228	0	0.0255	0.1451	0.0036
7	20	6.19541	6.92568	0	0.0251	0.1480	0.0037
8	20	6.46593	6.78249	0	0.0256	0.1441	0.0035
9	20	4.7737	5.26323	0	0.0327	0.1121	0.0045
10	20	6.11878	6.82532	0	0.0255	0.1462	0.0037
11	20	6.48807	6.50391	0	0.0267	0.1373	0.0035
12	20	4.52263	7.4717	0	0.0233	0.1629	0.0046
13	20	6.6507	8.08776	0	0.0215	0.1608	0.0035
14	20	5.83281	6.57041	0	0.0264	0.1411	0.0039
15	20	6.17044	6.82799	0	0.0255	0.1461	0.0037
16	20	5.48604	7.43598	0	0.0234	0.1589	0.0041
17	20	5.3581	6.28268	0	0.0276	0.1345	0.0041
18	20	5.82251	7.58804	0	0.0229	0.1595	0.0039
19	20	6.10549	7.79244	0	0.0223	0.1606	0.0039
20	20	5.58003	6.66635	0	0.0261	0.1444	0.0040



Slika 7.18: Greška step odziva primjenom Sinusoidal mape za pojedinačna pokretanja algoritma



Slika 7.19: Srednja greška step odziva primjenom Sinusoidal mape za sva pokretanja algoritma

7.10. Tent mapa

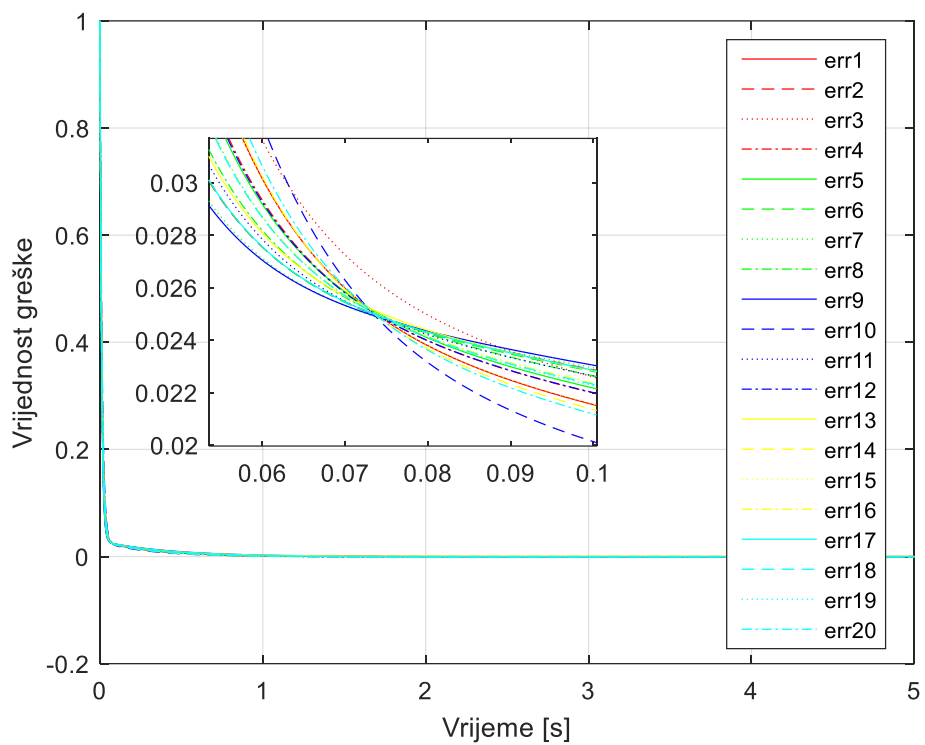
Matematička formulacija Tent mape je data sljedećom jednačinom:

$$x_{i+1} = \begin{cases} \frac{x_i}{0.7}, & x_i < 0.7 \\ \frac{10}{3}(1 - x_i), & x_i \geq 0.7 \end{cases} \text{ opseg}(0,1) \quad (7.10)$$

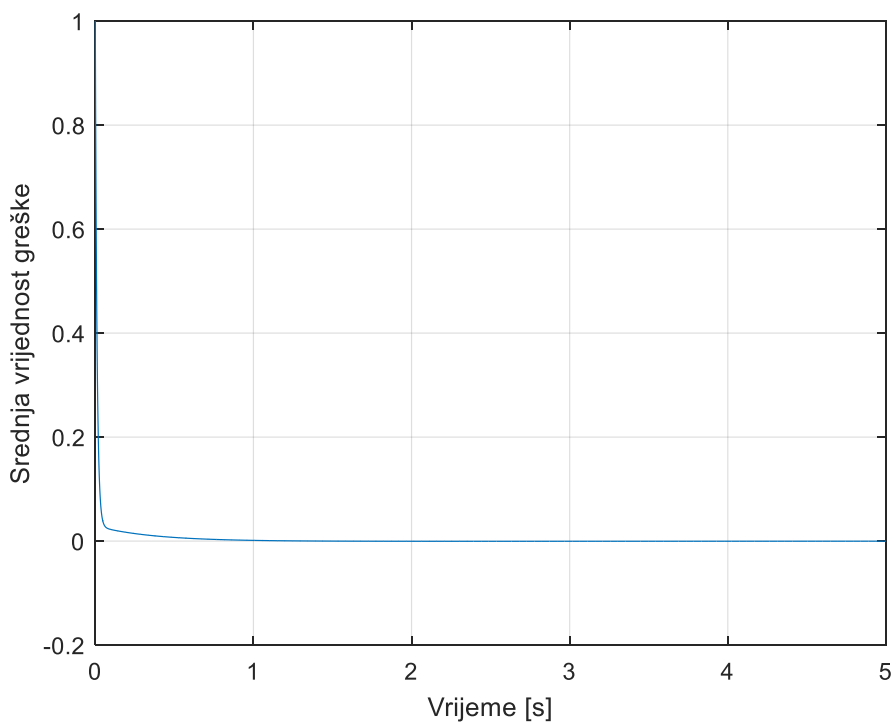
U Tabeli 7.10 su prikazani rezultati dobijeni za 20 pokretanja ChAOA algoritma Tent mapom u procesu estimacije parametara PID regulatora. Na slikama 7.20 i 7.21 su prikazane vrijednosti greške step odziva za svako od 20 pokretanja (razlika referentne i mjerene vrijednosti brzine MJSS) i srednja vrijednost greške step odziva za svih 20 pokretanja algoritma.

Tabela 7.10: Rezultati primjenom Tent mape

<i>Redni broj ponavljanja</i>	K_p	K_i	K_d	<i>Preskok [%]</i>	<i>Vrijeme uspona [s]</i>	<i>Vrijeme smirenja [s]</i>	<i>Srednja greška</i>
1	20	5.51509	5.92419	0	0.0292	0.1217	0.0040
2	20	5.62369	7.05143	0	0.0247	0.1524	0.0040
3	20	5.83764	5.85386	0	0.0297	0.1372	0.0039
4	20	5.88108	6.19796	0	0.0280	0.1302	0.0038
5	20	5.31909	6.27294	0	0.0276	0.1344	0.0041
6	20	6.13059	7.03169	0	0.0247	0.1502	0.0037
7	20	5.90168	7.30108	0	0.0238	0.1555	0.0038
8	20	5.58349	6.70764	0	0.0259	0.1454	0.0040
9	20	5.13065	7.3741	0	0.0236	0.1593	0.0043
10	20	5.43405	5.38305	0	0.0319	0.1013	0.0040
11	20	6.61525	6.8527	0	0.0254	0.1451	0.0035
12	20	6.06003	6.22158	0	0.0279	0.1304	0.0037
13	20	4.46228	6.7915	0	0.0256	0.1513	0.0047
14	20	6.20566	5.88146	0	0.0294	0.1182	0.0037
15	20	5.42592	5.93108	0	0.0292	0.1222	0.0041
16	20	5.72239	6.45728	0	0.0269	0.1385	0.0039
17	20	5.72646	7.03871	0	0.0247	0.1518	0.0039
18	20	6.14609	6.46221	0	0.0269	0.1373	0.0037
19	20	6.30424	6.4408	0	0.0269	0.1362	0.0036
20	20	5.69785	5.77409	0	0.0299	0.1155	0.0039



Slika 7.20: Greška step odziva primjenom Tent mape za pojedinačna pokretanja algoritma

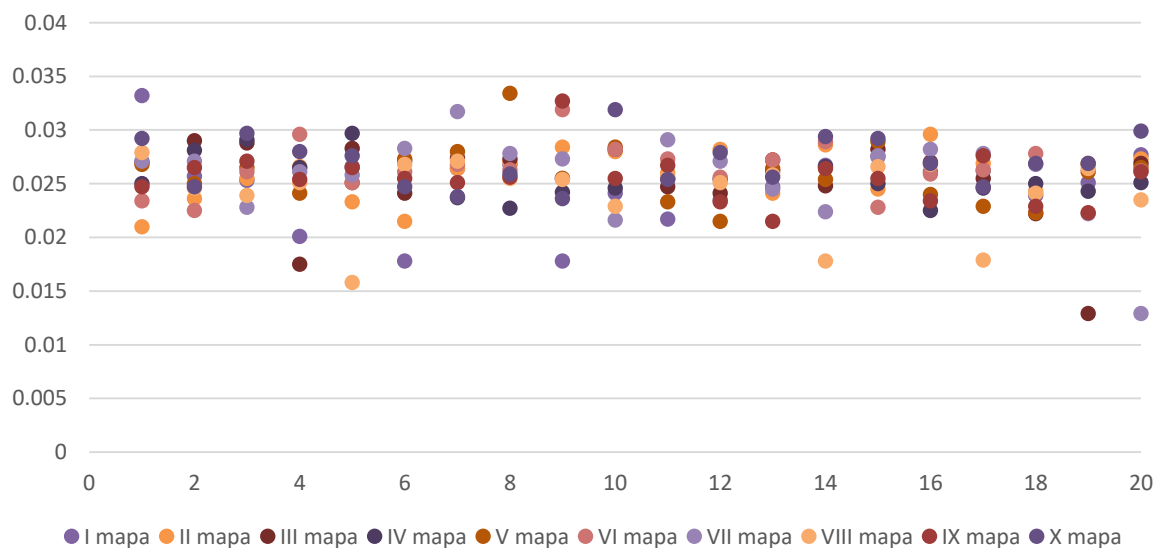


Slika 7.21: Srednja greška step odziva primjenom Tent mape za sva pokretanja algoritma

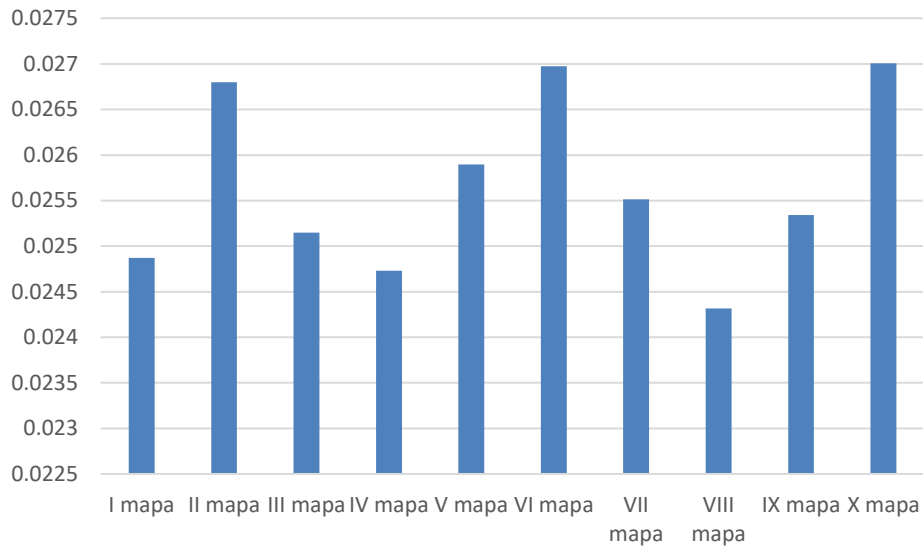
7.11. Zaključak o analizi statistike ChAOA

Za primjenu svake od 10 mapa uočava se da se dobijaju parametri PID regulatora za koje se postižu slična vremena uspona i smirenja, pri čemu je preskok uvijek nula. Vrijednost srednje greške je reda 10^{-4} , dok grafici greške za pojedinačna pokretanja kao i grafik srednje greške za sve mape brzo opada do nule.

Na slici 7.22 su prikazane vrijednosti vremena uspona za dvadeset pokretanja svake od deset mapa. Najmanje vrijeme uspona iznosi 0.0129s i postiže se aktivacijom treće odnosno sedme mape (Gauss/mouse i Sine). Na slici 7.23 su prikazane srednje vrijednosti vremena uspona za svaku od deset mapa.

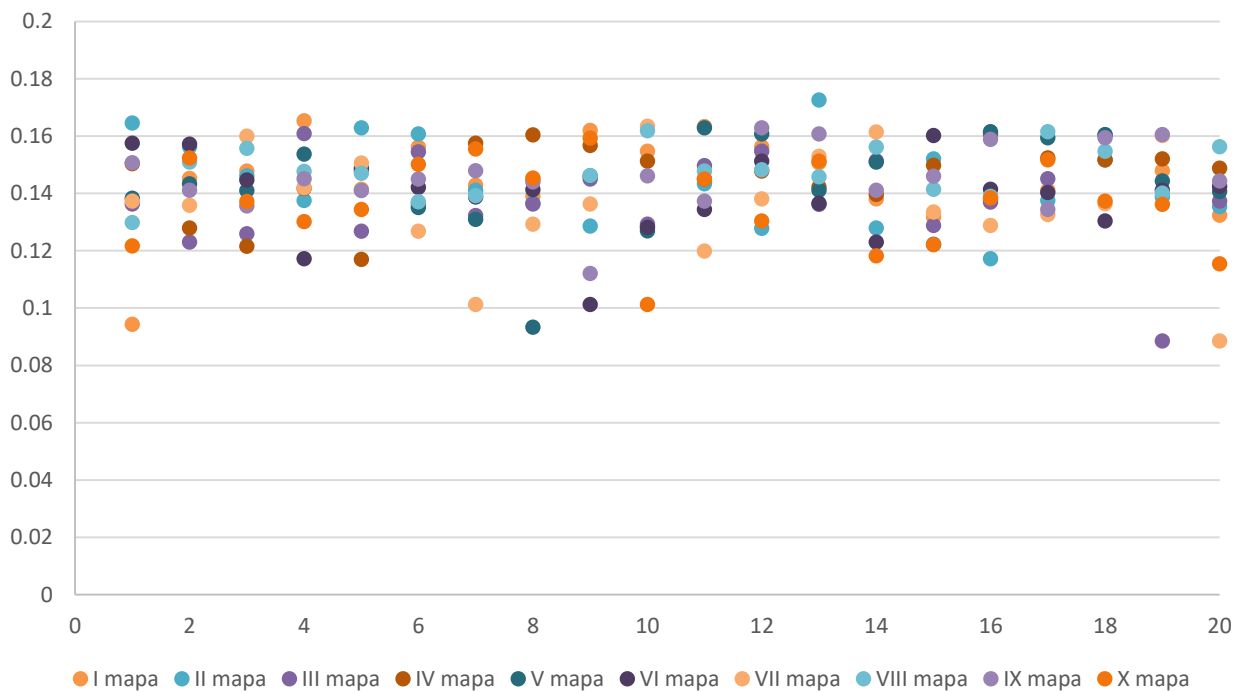


Slika 7.22: Vrijednosti vremena uspona

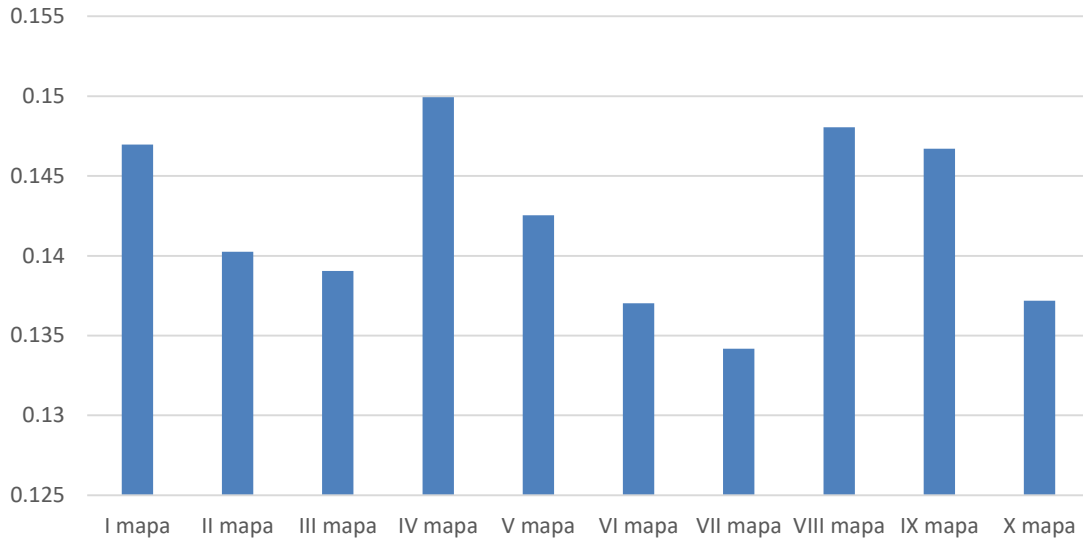


Slika 7.23: Srednja vrijednosti vremena uspona

Na slici 7.24 su prikazane vrijednosti vremena smirenja za dvadeset pokretanja svake od deset mapa. Najmanje vrijeme smirenja iznosi 0.0886s i postiže se aktivacijom treće odnosno sedme mape (Gauss/mouse i Sine). Na slici 7.25 su prikazane srednje vrijednosti vremena smirenja za svaku od deset mapa.

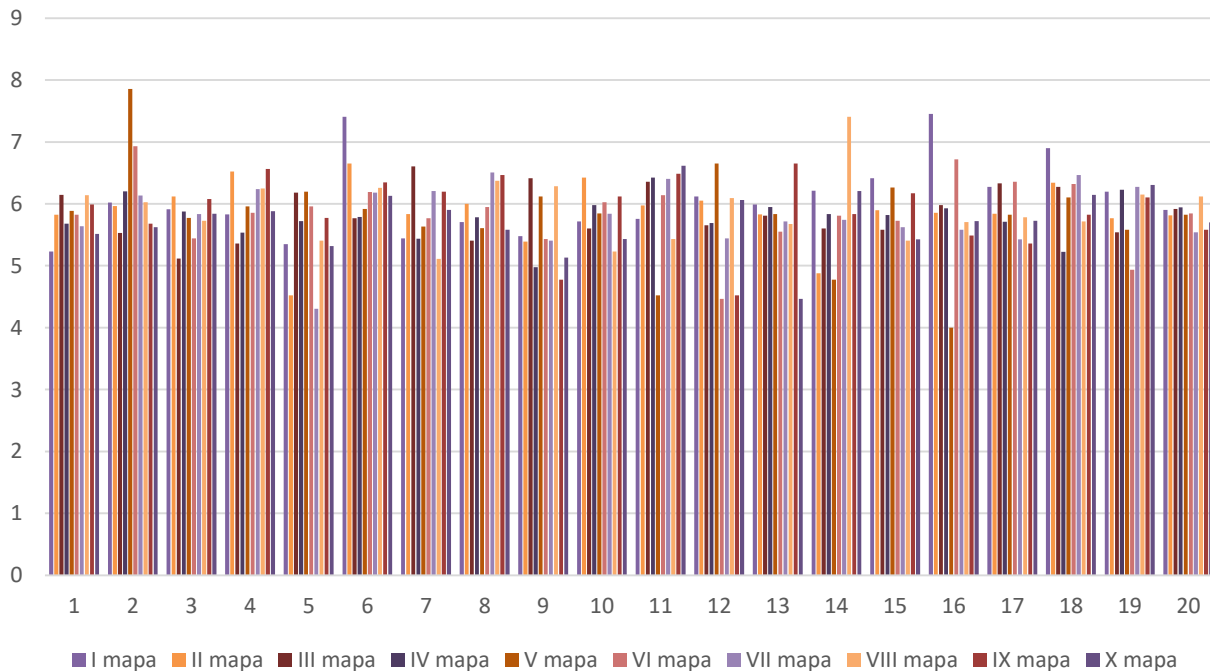


Slika 7.24: Vrijednosti vremena smirenja



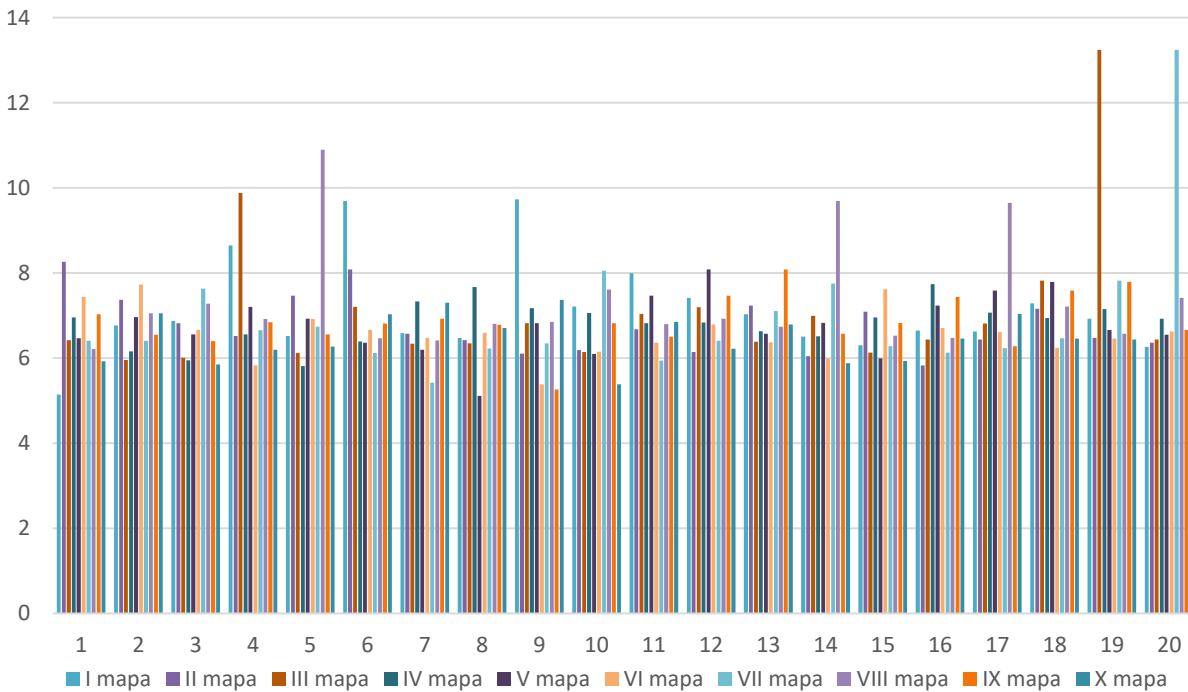
Slika 7.25: Srednja vrijednosti vremena smirenja

Na slici 7.24 su prikazane estimirane vrijednosti K_i parametra prilikom dvadeset pokretanja svake od deset mapa. Uočava se da se estimirana vrijednost K_i parametra, kako je prethodno navedeno kreće oko bliskih vrijednosti, tačnije u opsegu od 5 do 6. Maksimalna estimirana vrijednost K_i parametra je dobijena aktivacijom pete haotične mape (Logistic) i iznosi 7.85544. Minimalna estimirana vrijednost K_i parametra je dobijena aktivacijom pete haotične mape (Logistic) i iznosi 3.99982.



Slika 7.26: Vrijednosti K_i parametra

Na slici 7.27 su prikazane estimirane vrijednosti K_d parametra prilikom dvadeset pokretanja svake od deset mapa. Uočava se da se estimirana vrijednost K_d parametra, kako je prethodno navedeno kreće oko bliskih vrijednosti, tačnije u opsegu od 6 do 7. Maksimalna estimirana vrijednost K_d parametra je dobijena aktivacijom pete odnosno sedme haotične mape (Logistic i Sine) i iznosi 13.2464. Minimalna estimirana vrijednost K_d parametra je dobijena aktivacijom pete haotične mape (Logistic) i iznosi 5.11823.



Slika 7.27: Vrijednosti K_d parametra

U Tabeli 7.11 su prikazane srednje vrijednosti parametara K_i i K_d dobijene iz dvadeset pokretanja svake od deset mapa. Iz prikazanih rezultata uočava se prethodno utvrđeno, da se za svaku od mapa vrijednosti estimiranih parametara kreću oko bliskih vrijednosti.

Vrijednosti parametra K_p se u svim slučajevima estimiraju na vrijednost 20.

Prikazanom analizom rezultata za svih deset haotičnih mapa može se doći do zaključka da primjena svake od njih daje rezultat gdje se ne javlja preskok i postižu približne vrijednosti vremena uspona i smirenja. Ipak najbolje vrijeme uspona i smirenja se postižu aktivacijom Gauss/mouse i Sine haotične mape.

Tabela 7.11 - Srednja vrijednost parametara K_i i K_d prilikom pokretanja mapa

<i>Redni broj mape</i>	<i>K_i</i>	<i>K_d</i>
I	6.065271	7.132801
II	5.87486	6.764854
III	5.858804	7.088304
IV	5.786583	6.833205
V	5.80882	6.775695
VI	5.861797	6.580932
VII	5.825133	6.970447
VIII	5.914625	7.326357
IX	5.899924	6.861021
X	5.736161	6.447468

8. ZAKLJUČAK

Ovaj rad se bavi estimacijom parametara različitih struktura regulatora u pogonima sa MJSS. U tom cilju, najprije je objašnjena konstrukcija i princip rada MJSS, kao i principi regulacije brzine. Takođe, dat je pregled literature ove oblasti i upoređeni rezultati na dejstvo step promjene referentne brzine.

Osim toga, u magistarskom radu su predloženi novi algoritmi za regulaciju brzine MJSS primjenom meta-heurističkih algoritama. Primijenjen je novi AOA meta-heuristički algoritam na PID i FOPID regulatore koji su konvencionalno upotrebljavani u ovoj oblasti. Takođe AOA algoritam je primijenjen za traženje parametara PIDD i TID regulatora koji do sada nijesu imali primjenu u regulaciji brzine MJSS. Rezultati dobijeni primjenom AOA algoritma su unaprijeđeni njegovom integracijom sa haotičnim mapama čime je razvijen i novi optimizacioni algoritam nazvan chAOA. Pored uobičajeno primjenjivane ITAE kriterijumske funkcije, primjenjivana je i njena modifikacija u vidu ITASE kriterijuma. Pored ove dvije kriterijumske funkcije predložena je i nova kriterijumska funkcija IAEO koja se pokazala uspješna u smanjenju preskoka kod step odziva. Na ovaj način je ilustrovana inicijalna hipoteza da mogućnost poboljšanja regulacije brzine motora jednosmjerne struje leži u primjeni novijih, moćnijih algoritama, kao i hibridizaciji postojećih, njihovoj modifikaciji i stvaranju haotičnih algoritama. Pored značaja odabira optimizacionog algoritma za postizanje kvalitetnog step odzva, ilustrovan je značaj odabira kriterijumske funkcije i odabir regulatora. Sva predložena rešenja su dala parametre sa kojim se postižu rezultati koji su u nekom aspektu bolji od prethodno postignutih što potvrđuje njihovu efikasnost.

Budući razvoj istraživanja ove oblasti umnogome zavisi od razvoja novih optimizacionih algoritama i kriterijumskih funkcija, ali i samih regulatora. Ubrzan razvoj kako teorijskog aspekta ove oblasti, ali i energetske elektronike će omogućiti bolja teorijska rešenja, ali i njihovu bolju i lakšu implementaciju u komercijalne svrhe. Samim tim, buduća istraživanja će biti orjentisana ka razvoju novih algoritama, ali i novih hibridnih varijanti algoritama, za estimaciju parametara različitih struktura regulatora.

9. LITERATURA

- [1] M. Doppelbauer, „The invention of the electric motor 1800 1854“, *Elektrotechnisches Institut (ETI)*, 09.jun.2018.
- [2] P. Matic, „Električne Mašine I“, *Akademski misao*, Beograd, 2016.
- [3] Lj. Stojković, „Električne Mašine II“, *Tehnička knjiga*, Beograd, 1960.
- [4] B. Mitraković „Mašine jednosmjerne struje“, *Naučna knjiga*, Beograd, 1971.
- [5] B. Mitraković „Sinhrone mašine“, *Naučna knjiga*, Beograd, 1989.
- [6] B. Mitraković „Asinhrone mašine“, *Naučna knjiga*, Beograd, 1967.
- [7] V. Vučković, „Električni pogoni“, *Akademski misao*, 2002.
- [8] Lj. Piotrovskij, „Električni strojevi“, *Tehnička knjiga*, 1989.
- [9] S. Ekinci, B. Hekimoglu, D. Izci, “Opposition Based Henry Gas Solubility Optimization As A Novel Algorithm For PID Control Of DC Motor“, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 24, no. 2, april 2021, pp. 331-342
- [10] S. Ekinci, B. Hekimoglu, D. Izci, “PID Speed Control Of DC Motor Using Harris Hawks Optimization Algorithm”, *International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE)*, Istanbul, Turska, 12-13.jun 2020, pp. 69-75
- [11] J. Agarwal, G. Parmar, R. Gupta, “Application Of Sine Cosine Algorithm In Optimal Control Of DC Motor And Robustness Analysis“, *Wulfenia Journal*, vol. 24, no. 11, novembar 2017, pp. 77-95
- [12] S. Ekinci, B. Hekimoglu, A. Demirören, E. Eker, “Speed Control Of DC Motor Using Improved Sine Cosine Algorithm Based PID Controller”, *International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*, Ankara, Turska, 11-13.oktobar 2019, pp. 412-419
- [13] D. Izci , S. Ekinci, “Comparative Performance Analysis Of Slime Mould Algorithm For Efficient Design Of Proportional–Integral–Derivative Controller”, *Electrica*, vol. 21, no. 1, januar 2021, pp. 151-159

- [14] B. Hekimoğlu, S. Ekinci, V. Demiray, R. Doguruci, A. Yildirim, “Speed Control Of DC Motor Using PID Controller Tuned By Salp Swarm Algorithm”, *International Engineering and Natural Sciences Conference*, Batman, Turska, novembar 2018, pp. 1878-1889
- [15] U. Bhatnagar, A. Gupta, “Application Of Grey Wolf Optimization In Optimal Control Of DC Motor And Robustness Analysis”, *SKIT Research Journal*, vol. 8, no. 1, 2018, pp. 19-25
- [16] M. Khalilpour, N. Razmjoo, H. Hosseini, P. Moallem, “Optimal Control Of DC Motor Using Invasive Weed Optimization (IWO) Algorithm”, *Majlesi Conference on Electrical Engineering*, Majlesi New Town, Iran, avgust 2011.
- [17] J. Agarwal, G. Parmar, R. Gupta, “Comparative Analysis of PID Controller For Speed Control Of DC Motor With Intelligent Optimization Algorithms “, *International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICACCCN)*, Velika Nojda, India, 12-13.oktbar 2018, pp. 273-278
- [18] I. Khanam, G. Parmar, “Application Of Sfs Algorithm In Control Of Dcmotor And Comparative Analysis”, *IEEE UP Section Conference on Electrical Computer and Electronics (UPCON)*, Mathura, India, 26-28.oktobar 2017, pp. 256-261
- [19] N. Razmjoo, Z. Vahedi, V. Estrela, “Controller Based On Improved Whale Optimization Algorithm”, *Metaheuristics and Optimization in Computer and Electrical Engineering*, Springer, 2021, pp. 153-169
- [20] B. Hekimoglu, “Optimal Tuning Of Fractional Order PID Controller For DC Motor Speed Control Via Chaotic Atom Search Optimization Algorithm”, *IEEE Access*, vol. 7, 18.mart 2019, pp. 38100 – 38114
- [21] A. Ahmed, G. Parmar, R. Gupta, “Application of GWO in Design of Fractional Order PID Controller for Control of DC Motor and Robustness Analysis “, *International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICACCCN)*, Velika Nojda, Indija, 12-13.oktobar 2018.
- [22] M. Nasri, H. Nazambadi-Pour, M. Maghfoori, “A PSO Based Optimum Design Of PID Controller For A Linear Brushless DC Motor“, *Proceedings Of World Academy Of Science, Engineering And Technology*, 20.april 2007, pp. 211-215
- [23] B. Almeida, V. Leite, “Particle Swarm Optimization: A Powerful Technique For Solving Engineering Problems”, *Swarm Intelligence-Recent Advances, New perspectives and Applications*, 2019, pp. 31-51

- [24] F. Hashim, E. Houssein, M. Mabrouk, “Henry Gas Solubility Optimization: A Novel Physics-Based Algorithm”, *Future Generation Computer Systems*, vol. 101, 2019, pp. 646-667
- [25] A. Heidari, S. Mirjalili, H. Faris, “Harris Hawks Optimization (Hho): Algorithm And Applications”, *Future Generation Computer Systems*, vol. 49, 2019, pp. 849-872
- [26] R. M. Rizk-Allah, “An Improved Sine–Cosine Algorithm Based On Orthogonal Parallel Information For Global Optimization”, *Soft Computing*, vol. 23, 2018, pp. 7135-7161
- [27] S. Li, H. Chen, M. Wang, A. Heidari, S. Mirjalili, “Slime Mould Algorithm: A New Method For Stochastic Optimization”, *Future Generation Computer Systems*, vol. 101, 2019, pp. 300-323
- [28] S. Mirjalili, A. Lewis, “Grey Wolf Optimizer”, *Advances in Engineering Software*, vol. 69, 2014, pp. 46-61
- [29] M. Misaghi, M. Yaghoobi, “Improved Invasive Weed Optimization Algorithm (IWO) Based On Chaos Theory For Optimal Design Of Pid Controller”, *Journal of Computational Design and Engineering*, vol. 6, no. 3, 2019, pp. 284-295
- [30] S. Mirjalili, “SCA: A Sine Cosine Algorithm For Solving Optimization Problems”, *Knowledge-Based Systems*, vol. 96, no. 15, 2016, pp. 120-133
- [31] G. Ning, D. Cao, “Improved Whale Optimization Algorithm For Solving Constrained Optimization Problems”, *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2021
- [32] S. Mirjalili, A. Lewis, “The Whale Optimization Algorithm”, *Advances in Engineering Software*, vol. 95, 2016, pp. 51-67
- [33] W. Zhao, L. Wang, Z. Zhang, “Atom Search Optimization And Its Application To Solve A Hydrogeologic Parameter Estimation Problem”, *Knowledge-Based Systems*, vol. 161, 2019, pp. 283-304
- [34] L. Stojić, V. Milenković, M. Rapačić, „Uporeda Analiza Kriterijuma Optimalnosti Za Projektovanje Pid Regulatora Pod Ograničenjima Na Robusnost i Mjerni Šum“, *Infoteh, Jahorina*, vol. 16, mart 2017, pp. 669-674
- [35] A. Savić, G. Dobrić, D. Šošić, M. Žarković, “Metode optimizacije primena u elektrotehnici“, *Akademski misao*, Beograd, 2018.
- [36] P. Shah, S. Agashe, “Review Of Fractional Order PID Controller“, *Mechatronics*, vol.38, 2019, pp. 29-41

- [37] V. Mehra, S. Srivastava, P. Varshney, "Fractional Order Pid Controller: Tuning And Its Application", *LAP LAMBERT Academic Publishing*, Sarbriken, oktober 2012.
- [38] K. Åström, "Automatic Tuning Of PID Controllers", *Isa*, Sjeverna Karolina, 1988.
- [39] K. Åström, "PID Controllers", *Isa*, Sjeverna Karolina , 1995.
- [40] K. Bingi, R. Ibrahim, M. Karsiti, M. Hassan, "Fractional-Order Systems And PID Controllers: Using Scilab And Curve Fitting Based Approximation Techniques", *Springer*, Njujork, 2020.
- [41] I. Podlubny, "Fractional Order Systems And Piλdμ-Controllers", *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 44, no. 1, januar 1999, pp. 208-214
- [42] S. Momani, R. El-Khazali, I. Batiha, "Tuning PID And Piλdδ Controllers Using particle Swarm Optimization Algorithm Via El-Khazali's Approach", *AIP Conference Proceedings*, vol. 2172, no. 1, 2019, pp. 05003-1 – 05003-8
- [43] A. Khoei, K. Hadidi, S. Yuvarajan, "Fuzzy Logic Dc Motor Controller With Improved Performances", *Conference Record of the IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*, St. Luis, SAD , vol. 3, 12-15. oktober 1998, pp. 1652-1656
- [44] P. Thepsatorn, N. Numsomran, V. Tipsuwanporn, T. Teanthong, "DC Motor Speed Control Using Fuzzy Logic Based On Labview", *SICE Annual Conference*, Busan, Južna Koreja, 18-21.oktober 2006, pp. 3617-3620
- [45] J. Chakravorty, R. Sharma, "Fuzzy logic Basedmethod Of Speed Control Of Dc Motor", *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 3, no. 4, 2013, pp. 64-66
- [46] H. Ahmed, G. Singh, V. Bhardwaj, "Controlling Of D.C. Motor Using Fuzzy Logic Controller", *Advances in Intelligent Systems Research*, 2013, pp. 665-670
- [47] P. Cheon, J. Kim, D. Le, "On Replacing Pid Controller With Deep Learning Controller For Dc Motor System", *Journal of Automation and Control Engineering*, vol. 3, no. 6, 2015, 452-456
- [48] L. Abualigah, A. Diabat, S. Mirjalili, "The Arithmetic Optimization Algorithm", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 376, april 2021.
- [49] S. Saremi, S. Mirjalili, A. Lewis, "Biogeography-based optimization with chaos", *Neural Computing and Applications*, 2014, pp. 1077-1097

- [50] K. Sahu, S. Panda, A. Biswal, "Design and analysis of tilt integral derivative controller with filter for load frequency control of multi-area interconnected power systems", *ISA Transactions*, vol. 61, 2016, pp. 251-264
- [51] M. Sahib, "A novel optimal PID plus second order derivative controller for AVR system", *Engineering Science and Technology, an International Journal*", vol. 18, no. 2, 2015, pp. 194-206