

UNIVERZITET CRNE GORE  
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET, PODGORICA



**Miloš Bojić**

**PREDLOG NOVOG DIZAJNA REGULATORA U POGONIMA  
SA MOTOROM JEDNOSMJERNE STRUJE SA ASPEKTA  
NEUTRALISANJA POREMEĆAJA**

- MASTER RAD -

Podgorica, 2024. godine

## **PODACI I INFORMACIJE O STUDENTU**

**Ime i prezime:** Miloš Bojić

**Datum i mjesto rođenja:** 31.07.1998. godine, Nikšić, Crna Gora

**Naziv završenog osnovnog studijskog programa i godina završetka studija:** Energetika i automatika, 2021. godine

## **INFORMACIJE O MASTER RADU**

**Naziv master studija:** Studijski program Automatika i industrijska elektrotehnika

**Naslov rada:** Predlog novog dizajna regulatora u pogonima sa motorom jednosmjerne struje sa aspekta neutralisanja poremećaja

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

## **UDK, OCJENA I ODBRANA MASTER RADA**

**Datum prijave master rada:** 01.02.2024.

**Datum sjednice Vijeća na kojoj je prihvaćena tema:** 18.04.2024.

**Mentor:** Prof. dr Martin Ćalasan

**Komisija za ocjenu/odbranu rada:**

Prof. dr Milovan Radulović

Prof. dr Martin Ćalasan

Prof. dr Vladan Vujičić

**Lektor:**

**Datum odbrane:** \_\_\_\_\_

**Datum promocije:** \_\_\_\_\_

Ime i prezime autora: Miloš Bojić, BSc

## ETIČKA IZZJAVA

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

**" Predlog novog dizajna regulatora u pogonima sa motorom jednosmjerne struje sa aspekta neutralisanja poremećaja"**

moje originalno djelo.

**Podnositelj izjave,**

Miloš Bojić, BSc



U Podgorici, dana 31.05.2024. godine

## Predgovor

Motori jednosmjerne struje, iako potisnuti razvojem sinhronih i asinhronih motora, ostaju odličan izbor u električnim pogonima gdje do izražaja dolazi njihov relativno jednostavan postupak upravljanja i mogućnost razvijanja širokog dijapazona brzina. Regulacija brzine u pogonima sa motorom jednosmjerne struje, odnosno optimizacija parametara regulatora, predstavlja veoma složen i zahtjevan proces. Ovaj rad se bavi predlogom dizajna regulatora za regulaciju brzine motora u pogonima sa motorom jednosmjerne struje sa stanovišta neutralisanja poremećaja kojim se modeluje opterećenje motora.

Istraživanja sprovedena u ovom master radu motivisana su ključnim izazovom u brojnim industrijskim procesima - efikasnom regulacijom brzine pogona sa motorom jednosmjerne struje, gdje su stabilnost i preciznost rada pogona od krucijalnog značaja. Shodno navedenom, analizirana je upotreba različitih varijacija PID (*Proportional-Integral-Derivative*) regulatora kao najčešće korišćenog u rješavanju problema regulacije brzine u pogonima sa motorom jednosmjerne struje. Za potrebe optimizacije parametara regulatora sprovedeno je poređenje rezultata dobijenih primjenom *Equilibrium Optimizer* algoritma i rezultata dobijenih pomoću modifikacija pomenutog algoritma. Poseban fokus stavljen je na testiranju sposobnosti regulatora da suzbiju uticaj poremećaja na brzinu motora, odnosno ostvare efikasnu reakciju na promjene vrijednosti opterećenja i referentne brzine motora. Rezultati izloženi u okviru rada pokazuju kako različite kombinacije regulatora, algoritama i kriterijumske funkcije utiču na kvalitet odziva sistema, pružajući osnovu za dalji razvoj regulacionih strategija.

## Izvod rada

Efikasna regulacija pogona sa motorom jednosmjerne struje, u savremenim industrijskim procesima, ima ključnu ulogu u postizanju veće pouzdanosti i poboljšanih performansi sistema, smanjenju potrošnje energije, kao i produženju životnog vijeka opreme. Shodno navedenom, ovaj master rad se bavi predlogom različitih konfiguracija regulatora i optimizacionih metoda za regulaciju brzine pogona sa motorom jednosmjerne struje sa aspekta neutralisanja poremećaja kojim je modelovano opterećenje pogona.

Osim PI (*Proportional-Integral*) i PID (*Proportional-Integral-Derivative*) regulatora, kao najčešće korišćenih u literaturi koja obraduje regulaciju brzine motora jednosmjerne struje, u ovom radu analizirane su i naprednije varijacije klasičnog PID regulatora: 2-DOF PID (*Two-Degree-of-Freedom Proportional-Integral-Derivative*) regulator koji karakteriše odvojeno podešavanje odziva na referentni signal i poremećaj, i FOPIID (*Fractional-Order Proportional-Integral-Derivative*) regulator koji implementira frakcionalu integraciju i derivaciju. Parametri predloženih struktura regulatora estimirani su primjenom *Equilibrium Optimizer* (EO) optimizacionog algoritma, kao i pomoću njegovih modifikovanih oblika: *Binarnog Equilibrium Optimizer* (BEO) algoritma, prilagođenog za operacije sa diskretnim promjenljivima i *Haotičnog Equilibrium Optimizer* (ChEO) algoritma dobijenog implementacijom haotičnih mapa, čime se postiže efikasnija pretraga prostora rješenja. Kriterijumske funkcije korišćene u radu su IAE (*Integral of the Absolute Error*), ISE (*Integral of the Squared Error*) i ITSE (*Integral of Time multiplied by the Squared Error*).

U odnosu na PI i PID regulatore, 2-DOF PID i FOPIID karakterišu veća fleksibilnost i poboljšane mogućnosti kontrole, kao i povećana robusnost sistema u prisustvu nelinearnosti. BEO i ChEO algoritmi su se očekivano pokazali efikasnijim u pretrazi prostora rješenja u odnosu na osnovni EO algoritam. Analizom rezultata ostvarenih predloženim kombinacijama struktura regulatora, optimizacionih algoritama i kriterijumskih funkcija pokazana je efikasnost primijenjenih strategija za regulaciju brzine pogona sa motorom jednosmjerne struje sa aspekta dejstva poremećaja kojim je modelovano opterećenje ili usljud promijenjenih uslova rada pogona.

Doprinos ovog rada ogleda se u razvoju i evaluaciji konfiguracija regulatora i optimizacionih metoda kojima se unapređuje kontrola i stabilnost brzine pogona sa motorom jednosmjerne struje u prisustvu nelinearnosti i promjena vrijednosti opterećenja pogona.

**Ključne riječi:** motor jednosmjerne struje, regulacija, optimizacioni algoritam, kriterijumska funkcija, poremećaj

## Abstract

Efficient regulation of direct current motor drives plays a crucial role in achieving greater reliability and improved system performance in modern industrial processes, reducing energy consumption, and extending equipment lifespan. Accordingly, this master's thesis addresses the proposal of various controller configurations and optimization methods for the speed regulation of direct current motor drives, focusing on neutralizing the impact of the drive load, that was modeled by the disturbance.

In addition to the PI (*Proportional-Integral*) and PID (*Proportional-Integral-Derivative*) controllers, which are most commonly used in the literature addressing the speed regulation of direct current motors, this thesis also analyzes advanced variations of the classical PID controller: the 2-DOF PID (*Two-Degree-of-Freedom Proportional-Integral-Derivative*) controller, characterized by separate tuning for reference signal and disturbance responses, and the FOPID (*Fractional-Order Proportional-Integral-Derivative*) controller, which implements fractional integration and differentiation. The parameters of the proposed controller structures were estimated using the *Equilibrium Optimizer* (EO) optimization algorithm, as well as its modified forms: the *Binary Equilibrium Optimizer* (BEO) algorithm, adapted for operations with discrete variables, and the *Chaotic Equilibrium Optimizer* (ChEO) algorithm, obtained by implementing chaotic maps, achieving more efficient solution space search. The criterion functions used in this thesis are IAE (*Integral of the Absolute Error*), ISE (*Integral of the Squared Error*), and ITSE (*Integral of Time multiplied by the Squared Error*).

Compared to PI and PID controllers, the 2-DOF PID and FOPID are characterized by greater flexibility and improved control capabilities, as well as increased system robustness in the presence of nonlinearities. The BEO and ChEO algorithms have proven to be more efficient in searching the solution space compared to the basic EO algorithm. The analysis of the results achieved by the proposed combinations of controller structures, optimization algorithms, and criterion functions has demonstrated the effectiveness of the applied strategies for speed regulation of direct current motor drives in terms of disturbance effects modelling load variations or due to changed operating conditions.

The contribution of this thesis lies in the development and evaluation of controller configurations and optimization methods aimed at enhancing the control and stability of direct current motor speed drives in the presence of nonlinearities and changes in load values.

**Key words:** direct current motor, control, optimization algorithm, criterion function, disturbance

## Sadržaj

1. Uvod .....	8
2. Pogoni sa motorima jednosmjerne struje.....	12
2.1. Mašine jednosmjerne struje.....	14
2.1.1. Konstrukcija mašina jednosmjerne struje.....	14
2.1.2. Motori jednosmjerne struje .....	16
2.2. Regulacija električnih pogona .....	19
2.2.1. Šema regulacije brzine motora jednosmjerne struje.....	21
3. EO algoritam .....	23
3.1. Opšte informacije o metaheurističkim algoritmima .....	23
3.2. Inspiracija nastanka EO algoritma .....	24
3.3. Incijalizacija i kandidati za optimalno rješenje .....	25
3.4. Eksponencijalni faktor P .....	25
3.5. Stopa generisanja M .....	26
3.6. Pregled pojmove i pseudokod EO algoritma.....	29
3.7. Računska složenost EO algoritma.....	32
3.8. Binarni EO algoritam .....	32
3.9. Haotični EO algoritam.....	34
4. Simulacioni rezultati.....	37
4.1. Simulacioni rezultati neregulisanog pogona .....	41
4.2. Estimacija parametara PI regulatora.....	44
4.3. Estimacija parametara PID regulatora.....	49
4.4. Estimacija parametara 2-DOF PID regulatora .....	53
4.5. Estimacija parametara FOPIID regulatora.....	57
4.6. Komparativna analiza simulacionih rezultata .....	61
4.7. Promjenljivi parametri MJSS .....	66
5. Zaključak .....	69
6. Literatura .....	71

## 1. Uvod

Veliki udio proizvedene električne energije se u razvijenim industrijskim centrima pretvara u mehaničku energiju, bilo za različite proizvodne procese ili za potrebe transporta. Ono što električnim pogonima daje prednost u odnosu na ostale vrste pogona jeste mogućnost razvijanja širokog dijapazona brzina i momenata, neposredna spremnost za rad pod punim opterećenjem, mali zahtjevi za održavanjem i visok stepen iskorišćenja. Razvoj i ekspanzija električnih pogona značajno su unaprijedili efikasnost i pouzdanost proizvodnih procesa, te smanjili potrošnju energije i negativni uticaj na životnu sredinu. Osnovna struktura električnih pogona se, osim motora, sastoji od priključnih i spojnih elemenata, kao i od upravljačkih sistema i energetskih pretvarača čija je uloga precizno i efikasno regulisanje rada pogona. Zahvaljujući svojim brojnim prednostima, električni pogoni posjeduju širok spektar primjene od automatizacije proizvodnih linija, transporta, vozila električne vuče, medicinskih uređaja, brojnih industrijskih i poljoprivrednih djelatnosti, pa sve do uređaja u domaćinstvu. Električni pogoni su osnova razvoja električnih vozila, koja čine ekološki daleko bolju alternativu tradicionalnim vozilama sa motorima na unutrašnje sagorijevanje [1, 2].

Posmatrajući kroz vrijeme, razvijanjem naizmjeničnog sistema dolazi do sve veće ekspanzije asinhronog motora u pogonima, čime se potiskuju iz upotrebe pogoni sa motorom jednosmjerne struje zbog malih tehničkih mogućnosti uslijed slabih energetskih izvora i ograničenosti prostornog dometa jednosmjerne mreže. Međutim, razvojem elemenata energetske elektronike pojavljuje se mogućnost povezivanja motora jednosmjerne struje na naizmjeničnu mrežu, preko ispravljača. Spojem ubrzanog razvoja automatike i mogućnosti povezivanja motora jednosmjerne struje na naizmjeničnu mrežu koju karakteriše jeftin prenos i transformacija električne energije, pogoni sa motorom jednosmjerne struje ponovo dobijaju širok spektar primjena gdje do izražaja dolaze njihove dobre regulacione karakteristike [3, 4]. Kako se ovaj rad bavi pogonima sa motorom jednosmjerne struje, u nastavku će biti riječi o mašinama jednosmjerne struje.

Mašine jednosmjerne struje, kao i sve ostale električne mašine, mogu da rade u motornom i generatorskom režimu rada. Svoju primjenu pronalaze u brojnim tehničkim i industrijskim procesima. Redovna potreba za održavanjem, visoka cijena i kraći vijek trajanja doveli su do potiskivanja ovih mašina iz upotrebe, te njihovo mjesto sve više zauzimaju naizmjenične mašine. Uprkos navedenom, mašine jednosmjerne struje i dalje imaju primjenu u brojnim sistemima, najčešće kao motori manjih snaga, gdje do izražaja dolaze njihove veoma dobre regulacione karakteristike i mogućnost razvoja širokog dijapazona brzina. Sistemi upravljanja mašinama

jednosmjerne struje su osnova za razvijanje strategija upravljanja naizmjeničnim mašinama. Treba istaći da teorija mašina jednosmjerne struje predstavlja osnovu za razumijevanje svih drugih vrsta mašina, što objašnjava veliko interesovanje istraživača za ovu temu [5-8].

Centralni dio regulisanog pogona jeste regulator čiji je dizajn ključni zadatak za precizan, stabilan i efikasan rad pogona. Dizajn regulatora može da bude veoma zahtjevan zadatak i sastoji se iz odabira strukture regulatora i podešavanja njegovih parametara. Uloga regulatora može biti kontrola više različitih parametara u pogonu, kao što su brzina, moment i pozicija, a sve u cilju postizanja optimalnih performansi sistema. Regulacija omogućava adekvatnu reakciju pogona na uslove promjenljive vrijednosti opterećenja, čime se poboljšava efikasnost, smanjuju energetski gubici i produžava vijek opreme u pogonu. Regulatori mogu biti različitih vrsta, shodno specifičnostima potrebe i složenosti operacije koju pogon vrši. Najčešće primjenjivani regulator u literaturi koja se bavi regulacijom brzine pogona sa motorom jednosmjerne struje, što je predmet istraživanja i ovog rada, jeste PID (*Proportional-Integral-Derivative*) regulator. Više informacija o pojmu i principu regulacije izloženo je u [9], dok je dizajn i podešavanje različitih varijanti PID regulatora objašnjeno u [10].

Kao što je već navedeno, podešavanje parametara regulatora predstavlja ključni zadatak pri projektovanju upravljačkih sistema električnih pogona. Parametri regulatora mogu biti određeni klasičnim metodama koje daju dobre performanse u širem sprektru primjena. Među klasičnim metodama posebno se ističe *Ziegler-Nichols* metoda. Iako klasične metode pokazuju visok stepen efikasnosti za neke praktične primjene, one često zahtijevaju mnogo vremena i ne mogu uzeti u obzir brojne nelinearnosti realnih sistema, te je njihova primjena ograničena na jednostavnije sisteme.

U cilju prevazilaženja prethodno navedenih problema koji se javljaju kod klasičnih metoda, sve više se primjenjuju metaheuristički algoritmi pomoću kojih se automatizuje proces estimacije parametara regulatora u električnim pogonima. Pregled pomenutih algoritama napravili su autori rada [11]. U zavisnosti od inspiracije njihovog nastanka, metaheuristički algoritmi se mogu podijeliti na one zasnovane na principima evolucije, inteligencije roja, zakonima fizike i ljudskom ponašanju. Razvojem računarske tehnologije i naprednih algoritama, metaheuristički algoritmi postaju moćni alati za optimizaciju koji imaju mogućnost pretrage velikih i složenih prostora rješenja. Brzo pronalaženje optimalnih rješenja, fleksibilnost i prilagodljivost različitim tipovima problema i veća robusnost u prisustvu nelinearnosti su faktori koji metaheurističke algoritme čine sve više zastupljenim u problematici podešavanja parametara regulatora u pogonima sa motorom jednosmjerne struje. U cilju dodatnog poboljšanja konvergencije algoritama, veće efikasnosti i robusnosti sistema, pristupa se različitim oblicima modifikovanja i hibridizacije postojećih

algoritama kako bi se uspjeli zadovoljiti optimizacioni procesi u savremenim kompleksnim sistemima za različite uslove rada. Autori radova [12-20] dali su pregled optimizacionih algoritama koji su najčešće primjenjivani za optimizaciju parametara regulatora u električnim pogonima. Informacije o optimizacionim algoritmima primijenjenim u ovom radu mogu se naći u publikacijama [21-30].

Kriterijumska funkcija, ili funkcija cilja, mjeri odstupanje izlaza sistema od referentnog signala i njen pravilan izbor ima bitnu ulogu u procesu optimizacije. U kontekstu optimizacije parametara regulatora, kriterijumska funkcija ocjenjuje koliko dobro određeni set parametara regulatora zadovoljava željene performanse, tj. minimizuje vrijednost kriterijumske funkcije. Optimizacioni algoritmi kao podatak koriste vrijednost kriterijumske funkcije kako bi kroz iterativni postupak prilagodili parametre regulatora tako da zadovolje konkretne zahtjeve sistema. Dvije najčešće korišćene funkcije cilja u literaturi koja obraduje regulaciju brzine pogona sa motorom jednosmjerne struje su integral apsolutne greške (IAE) i integral kvadrata greške (ISE) [12, 14].

Pretraga što efikasnijih regulacionih strategija za brzinu pogona sa motorom jednosmjerne struje kroz različite kombinacije struktura regulatora, optimizacionih algoritama i kriterijumskih funkcija predstavlja pravi istraživački izazov. Najveći broj radova iz literature bavi se regulacijom brzine motora jednosmjerne struje u praznom hodu, pa za analizu odziva brzine opterećenog pogona ima dosta prostora. Analiziranje reakcije motora na dejstvo poremećaja kojim se modeluje promjena vrijednosti momenta opterećenja omogućava podešavanje regulatora koje bi obezbijedilo precizniju kontrolu brzine obrtanja motora u realnim uslovima rada. Takođe, ukoliko se prilikom ispitivanja stabilnosti rada pogona uzmu u obzir i mogućnosti promjenljivih uslova rada i varijacije parametara motora uslijed promjene temperature ili habanja djelova, moguće je realizovati znatno robusnije regulacione strategije.

Struktura master rada se sastoji od pet poglavlja:

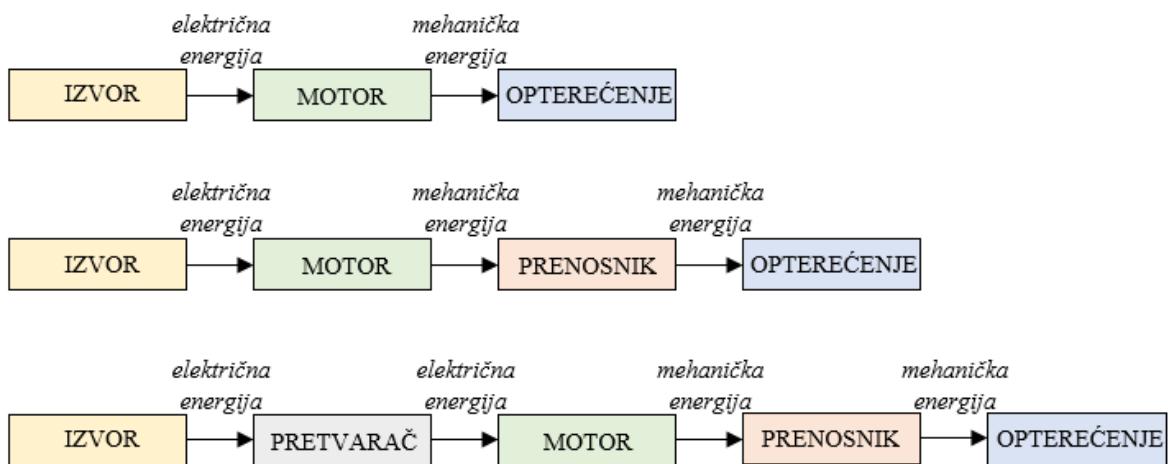
- U **drugom poglavlju** su date osnovne informacije o električnim pogonima i mašinama jednosmjerne struje. Poseban osvrt je napravljen na konstrukciju i princip rada motora jednosmjerne struje kao sastavnog dijela pogona koji je predmet analize. Takođe je opisan princip regulacije u pogonima i predstavljena šema regulacije brzine motora jednosmjerne struje.
- U **trećem poglavlju** dat je opis predloženog EO algoritma, kao i njegovih modifikovanih oblika (BEO i ChEO), namijenjenih za estimaciju parametara regulatora u pogonu sa motorom jednosmjerne struje.

- **Četvrto poglavlje** sadrži informacije o modelu motora (EMG30) koji je primijenjen u simulacijama, predloženim strukturama regulatora i kriterijumskim funkcijama korišćenim pri estimaciji parametara regulatora. U ovom poglavlju su izloženi ostvareni simulacioni rezultati i njihova komparativna analiza. Takođe je prikazana i analiza rada pogona pri promijenjenim parametrima motora jednosmjerne struje.
- Na kraju, u **petom poglavlju** napravljen je rezime rada, izložena završna razmatranja i predloženi mogući pravci budućih istraživanja vezanih za temu obrađenu u radu.

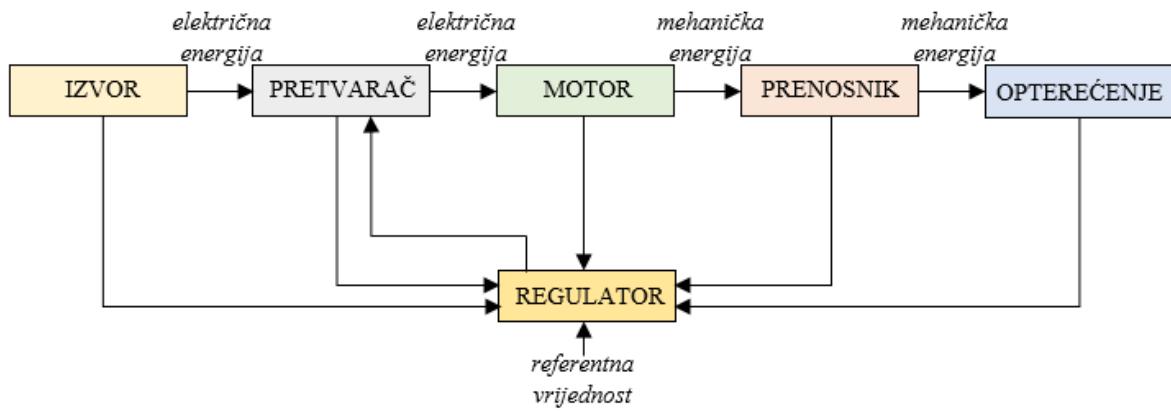
## 2. Pogoni sa motorima jednosmjerne struje

Električni pogon je elektromehanički sistem unutar kojeg se vrši konverzija električne u mehaničku energiju, odnosno sistem čija je uloga pokretanje izvršnih organa radnih mašina (opterećenja, tereta). Navedeni pogoni nalaze svoju primjenu u industriji, poljoprivredi, sistemima za grijanje i hlađenje, električnim automobilima, transportu, domaćinstvu i slično. Neke od glavnih prednosti električnih pogona u odnosu na druge vrste pogona su mogućnost razvijanja širokog dijapazona snaga, obrtnih momenata i brzina, visok faktor iskorišćenja, prilagodljivost radnim uslovima, brzo reagovanje na promjene radnih uslova, ekološka pogodnost i jednostavno održavanje [1-4].

Električni pogoni se dijele na regulisane i neregulisane u zavisnosti od prisustva regulatora u sistemu. U pogonu se regulacija može odnositi na brzinu, moment i poziciju. Sastavni elementi električnog pogona, u opštem slučaju, su izvor energije, energetski pretvarač, električni motor, mehanički prenosnik i sistem za regulaciju. U cilju uštede energije i postizanja pouzdanijeg rada, regulisani pogoni sve više potiskuju neregulisane gdje god je to ekonomski opravdano. U zavisnosti od složenosti radnih operacija čije se izvršavanje zahtijeva od električnog pogona, neki djelovi pogona mogu izostati, a moguće je i da dva dijela predstavljaju jednu konstrukcijsku i funkcionalnu cjelinu. Na slici 2.1 su prikazane neke od mogućih struktura neregulisanog električnog pogona, dok je na slici 2.2 prikazana struktura regulisanog električnog pogona [1-4].



Slika 2.1: Primjeri strukture neregulisanog električnog pogona



Slika 2.2: Regulisani električni pogon

Pod izvorom električne energije obično se podrazumijeva monofazna ili trifazna električna mreža, niskonaponska ili visokonaponska, sa svim propratnim elementima čija je uloga transformacija električne energije, zatim elementi mjerena, zaštite, nadzora i slično. Karakteristični primjeri izvora energije u električnim pogonima su i akumulatorska baterija (izvor jednosmjernog napona) i kontaktni vod kod električne vuče.

Uloga energetskog pretvarača jeste prilagođavanje veličina ulazne energije (struja, napon, frekvencija, broj faza) veličinama koje odgovaraju potrebama motora. Pretvarač kontroliše tokove energije u sistemu, čime utiče na motor, i na taj način upravlja brzinom, momentom ili pozicijom pogona. Generatore i transformatore koji su imali ulogu pretvarača u starijim pogonima, zamjenili su elementi energetske elektronike (tiristori i drugi poluprovodnički prekidači) u savremenim pogonima. Kada je riječ o motorima jednosmjerne struje, pod pretvaračima se najčešće podrazumijevaju ispravljači i čoperi.

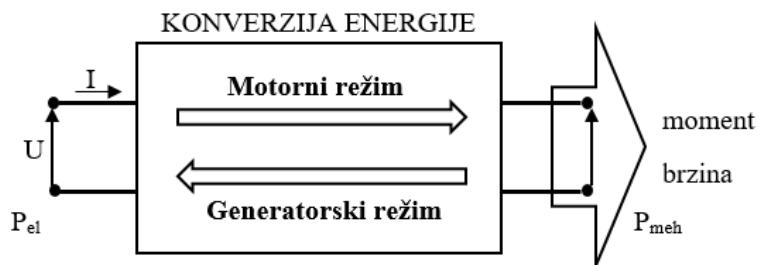
Mehanički prenosnik vrši prenos i prilagođavanje brzine i momenta, odnosno prenos mehaničke energije sa motora na opterećenje. Najjednostavniji primjer prenosnika je vratilo koje je zajedničko za motor i radnu mašinu. U prenosnike spadaju zupčasti i kaišni prenosnici sa fiksim prenosnim odnosom (npr. reduktori za smanjenje brzine i povećanje momenta), prenosnici sa promjenljivim prenosnim odnosom (npr. automobilski mjenjač) i prenosnici rotacionog kretanja u translatorno (npr. pužasti prenosnici).

Motor je sastavni dio električnog pogona koji transformiše električnu u mehaničku energiju. U regulisanim pogonima dugo su najzastupljeniji bili motori jednosmjerne struje, međutim razvojem energetske elektronike, sinhroni i asinhroni motori značajno proširuju oblast svoje primjene.

Obzirom da je predmet istraživanja ovog rada regulacija brzine pogona sa motorom jednosmjerne struje, u nastavku će regulatoru i motoru jednosmjerne struje biti posvećena zasebna poglavlja kao ključnim djelovima pogona sa aspekta ovog istraživanja.

## 2.1. Mašine jednosmjerne struje

Iako razvojem sinhronih i asinhronih mašina bivaju potisnute, mašine jednosmjerne struje predstavljaju osnovu za razumijevanje fizike svih ostalih vrsta mašina. Mašine jednosmjerne struje mogu da rade u generatorskom i motornom režimu rada (slika 2.1.1). U generatorskom režimu rada mašina mehaničku snagu na ulazu koristi za proizvodnju električne snage na izlaznom kraju mašine, dok u motornom režimu rada se vrši obrnut proces konverzije energije - dovođenjem električne snage na ulazu mašine, na izlazu se dobija mehanička snaga, tj. obrtni moment na osovini motora.



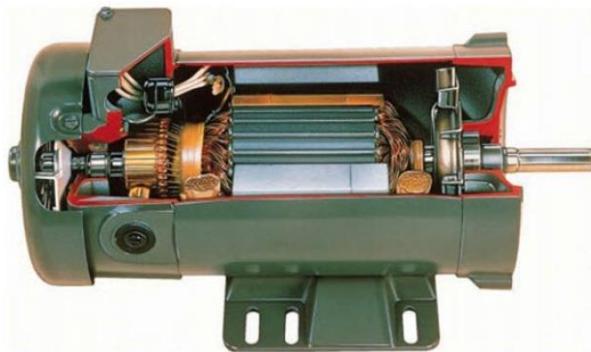
Slika 2.1.1: Konverzija energije kod mašine jednosmjerne struje

Mašine jednosmjerne struje imaju primjenu u sistemima gdje se zahtijeva širok dijapazon brzina i gdje do izražaja dolaze dobre upravljačke karakteristike pomenutih mašina.

### 2.1.1. Konstrukcija mašina jednosmjerne struje

Primjer mašine jednosmjerne struje prikazan je na slici 2.1.1.1. Osnovni djelovi mašine jednosmjerne struje su dio koji miruje - stator i rotirajući dio - rotor.

Stator (slika 2.1.1.2 (a)) je u obliku šupljeg cilindra od masivnog gvožđa na čijoj su unutrašnjoj strani postavljeni lamenirani (izrađeni od feromagnetsnih limova) polovi sa pobudnim namotajem. Propuštanjem jednosmjerne struje kroz namotaj statora (pobudni namotaj) formira se magnetno polje u mašini. Kod određenih tipova mašina jednosmjerne struje se za stvaranje polja umjesto statorskog namotaja ugrađuju stalni magneti u magnetno kolo statora. Između statora i rotora nalazi se međugvožđe (vazdušni procjep) [5-8].



Slika 2.1.1.1: Mašina jednosmjerne struje (preuzeto sa: <https://www.keep.ftn.uns.ac.rs>)

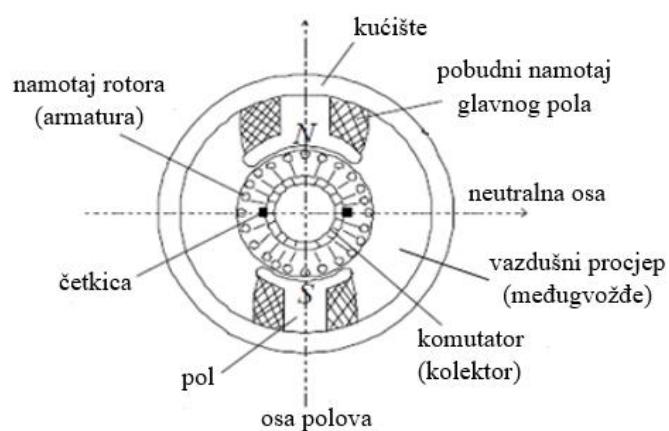
Rotor (slika 2.1.1.2 (b)) je cilindričnog oblika i sastavljen je od tankih feromagnetičnih limova složenih u paketima koji su pričvršćeni za vratilo mašine. Po obimu rotora su ravnomjerno raspoređeni žljebovi u kojima je smješten namotaj rotora (armatura) [5-8].



Slika 2.1.1.2: Stator (a) i rotor (b) mašine jednosmjerne struje

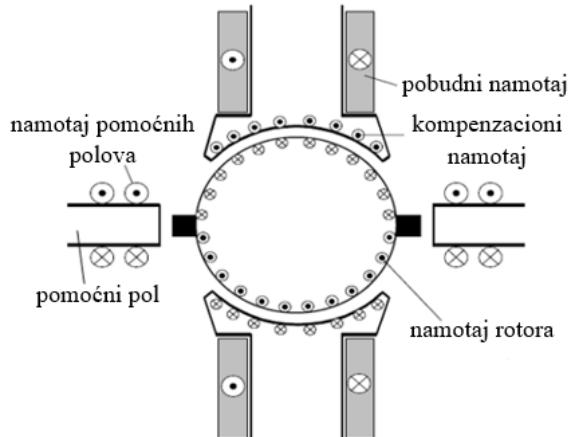
(preuzeto sa: <https://www.keep.ftn.uns.ac.rs>)

Komutator (kolektor) je sastavljen od međusobno izolovanih bakarnih lamela koje su postavljene na osovini rotora i u kontaktu su sa namotajem armature. Pričvršćene držačem za stator, na kolektor naliježu (klize po njemu) grafitne četkice čija je uloga da omoguće prenos električne energije sa rotora ili na rotor. Četkice se postavljaju na simetrali među polovima, po tzv. neutralnoj osi, gdje je pulsiranje polja najmanje [5-8]. Poprečni presjek mašine jednosmjerne struje sa označenim prethodno pomenutim djelovima prikazan je na slici 2.1.1.3.



Slika 2.1.1.3: Poprečni presjek mašine jednosmjerne struje

Još neki od djelova mašina jednosmjerne struje koje treba pomenuti su pomoćni polovi i kompenzacioni namotaj. Pomoćni polovi se ugrađuju između glavnih polova na statoru i kroz njihove namotaje protiče ista struja kao i kroz rotor. Kompenzacioni namotaj se urezuje i polove statora, pri čemu i kroz njega protiče struja rotora. Uloga pomoćnih polova i kompenzacionog namotaja je identična, a ogleda se u neutralisanju negativnog efekta polja struje armature kojim se deformatiše izvorno polje mašine [5-8]. Slika 2.1.1.4 prikazuje položaj pomoćnih polova i kompenzacionog namotaja u mašini jednosmjerne struje.

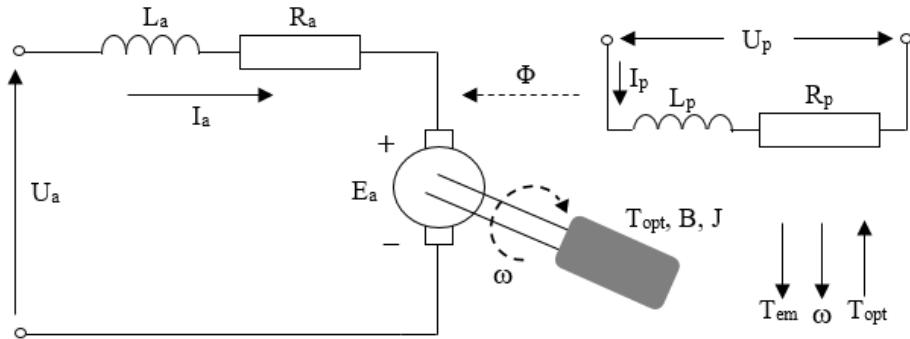


Slika 2.1.1.4: Pomoćni polovi i kompenzacioni namotaj mašine jednosmjerne struje

## 2.1.2. Motori jednosmjerne struje

Zahvaljujući relativno jednostavnom postupku upravljanja, motor jednosmjerne struje (MJSS) zauzima značajno mjesto u regulisanim pogonima gdje je potrebna promjenljiva brzina obrtanja. Brzina MJSS može se kontinualno podešavati mijenjanjem jednosmjernog napona armature, uključujući oba smjera obrtanja sa punim momentom.

Da bi mašina jednosmjerne struje radila kao motor, neophodno je dovesti napon na pobudnom namotaju kako bi došlo do pojave struje pobude i na taj način bilo formirano polje u mašini. Potom se dovodi napon na kolo armature, što će izazvati pojavu struje kroz namotaj armature. Shodno navedenom, u magnetnom polju se našao provodnik kroz koji protiče struja, pa će na njega početi da djeluje sila, odnosno dolazi do razvoja momenta koji uslovjava obrtanje rotora mašine. Kako se rotor obrće u polju statora, u namotaju armature dolazi do indukovana elektromotorne sile [5-8]. Ekvivalentno kolo motora jednosmjerne struje zajedno sa osnovnim veličinama prikazano je na slici 2.1.2.1.



Slika 2.1.2.1: Ekvivalentno kolo motora jednosmjerne struje

Veličine označene na slici 2.1.2.1 su sljedeće:  $U_p$ ,  $I_p$ ,  $R_p$ ,  $L_p$  - napon, struja, otpornost, induktivnost kola pobude,  $\Phi$  - fluks (tok polja),  $U_a$ ,  $I_a$ ,  $R_a$ ,  $L_a$  - napon, struja, otpornost, induktivnost kola armature,  $E_a$  - indukovana elektromotorna sila,  $\omega$  - brzina obrtanja,  $J$  - moment inercije,  $B$  - koeficijent trenja,  $T_{em}$  - elektromagnetski moment i  $T_{opt}$  - moment opterećenja.

Kao što je ranije navedeno, u motornom režimu rada se nakon pobude dovodi napon na armaturu, što rezultuje proticanjem struje kroz namotaje rotora. Prema tome, dovedenom naponu se suprotstavljaju svi padovi napona i indukovana elektromotorna sila. Matematička formulacija navedenog predstavlja naponsku jednačinu u motornom režimu rada koja ima oblik:

$$U = E + R_a I_a + \Delta U_c, \quad (2.1)$$

gdje je  $E$  indukovana elektromotorna sila (ems),  $R_a$  otpornost armature,  $I_a$  struja armature, a  $\Delta U_c$  pad napona na četkicama. Uzimajući u obzir da je vrijednost pada napona na četkicama veoma mala, relacija (2.1) se može uprostiti zanemarivanjem  $\Delta U_c$  pa je njen novi oblik:

$$U \approx E + R_a I_a. \quad (2.2)$$

Izraz za indukovani ems se zapisuje u obliku:

$$E = k\phi\omega, \quad (2.3)$$

pri čemu je  $k$  konstrukcijska konstanta mašine. Iz relacija (2.2) i (2.3) se može izvesti izraz za brzinu motora jednosmjerne struje:

$$\omega = \frac{U - R_a I_a}{k\phi}, \quad (2.4)$$

na osnovu kojeg se može izvesti zaključak da je brzinu MJSS moguće regulisati na više načina - preko napona armature, preko dodavanja otpora u kolo armature ili preko fluksa.

Relacija (2.2) predstavlja naponsku jednačinu MJSS u stacionarnom stanju. U cilju opisivanja dinamike mašine neophodno je uzeti u obzir i induktivnost namotaja rotora (relacija (2.5)):

$$U = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E. \quad (2.5)$$

Pri konstantnoj vrijednosti fluksa ( $\Phi=\text{const}$ ), ems se može odrediti preko sljedećeg izraza:

$$E = K_b \frac{d\theta}{dt} = K_b \omega, \quad (2.6)$$

gdje je  $K_b$  konstanta povratne ems, dok  $d\theta/dt$  predstavlja ugaonu brzinu rotacije.

Prethodne relacije odnose se na električni dio modela MJSS, dok je mehanička jednačina rotora data relacijom (2.7):

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_{em} - T_{opt} - B\omega, \quad (2.7)$$

gdje je sa  $B\omega$  predstavljen moment uslijed trenja.

Struja armature  $I_a$  formira elektromagnetni moment  $T_{em}$  i dovodi do obrtanja rotora, tj. obavljanja mehaničkog rada. Za konstantan fluks ( $\Phi=\text{const}$ ), elektromagnetni moment je srazmjeran struji armature (relacija (2.8)):

$$T_{em} = K I_a, \quad (2.8)$$

gdje je  $K$  konstanta momenta MJSS.

Naponska (2.9) i momentna (2.10) jednačina MJSS prevedene u Laplasov domen imaju sljedeći oblik:

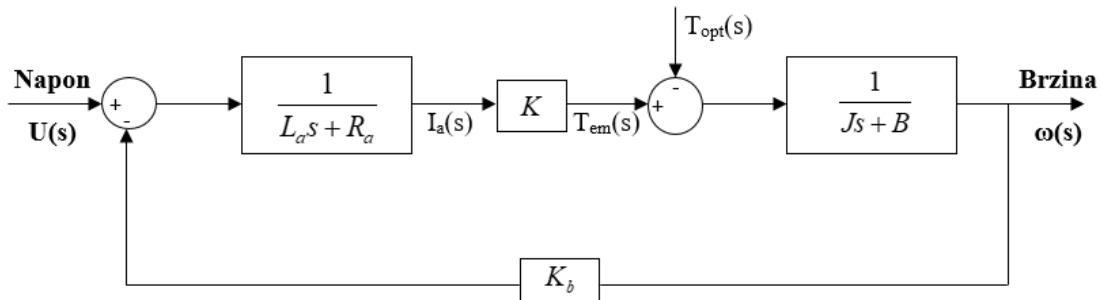
$$U(s) = E(s) + (L_a s + R_a) I_a(s), \quad (2.9)$$

$$T_{em}(s) - T_{opt}(s) = (J s + B) \omega(s), \quad (2.10)$$

dok je oblik jednačine za ems dat relacijom (2.11):

$$E(s) = K_b \omega(s). \quad (2.11)$$

Na osnovu prethodnih jednačina u Laplasovom domenu, može se nacrtati blok dijagram MJSS koji je predstavljen na slici 2.1.2.2.



Slika 2.1.2.2: Blok dijagram motora jednosmjerne struje

Kako se u ovom istraživanju analizira sistem sa dva ulaza (napon  $U(s)$  i moment opterećenja  $T_{opt}(s)$ ) i jednim izlazom (brzinom  $\omega(s)$ ), dijagramom sa slike 2.1.2.2 predstavljena je DISO (engl. *double input-single output*) šema sistema.

Obzirom da je u pitanju sistem sa dva ulaza, da bi se proračunala prenosna funkcija sistema, prvo je potrebno pronaći dvije prenosne funkcije ( $W_1(s)$  i  $W_2(s)$ ) u odnosu na dva ulaza sistema ( $U(s)$  i  $T_{opt}(s)$ ). Tada je prenosna matrica sistema data relacijom (2.12):

$$\omega(s) = \begin{bmatrix} W_1(s) & W_2(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U(s) \\ T_{opt}(s) \end{bmatrix}, \quad (2.12)$$

gdje su:

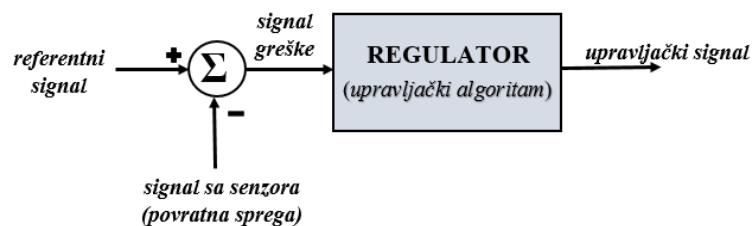
$$W_1(s) = \frac{K}{L_a Js^2 + (L_a B + R_a J)s + R_a B + KK_b} \quad (\text{u odnosu na } U(s)), \quad (2.13)$$

$$W_2(s) = \frac{-(L_a s + R_a)}{L_a Js^2 + (L_a B + R_a J)s + R_a B + KK_b} \quad (\text{u odnosu na } T_{opt}(s)). \quad (2.14)$$

## 2.2. Regulacija električnih pogona

Kao što je pomenuto u prethodnim poglavljima, pogoni se dijele na regulisane i neregulisane, u zavisnosti od prisustva centralnog regulacionog uređaja. Cilj dodavanja povratnih veza sa regulatorima jeste automatsko održavanje pojedinih veličina (konkretno brzine u ovom radu), uprkos dejstvu raznih poremećaja u vidu promjene opterećenja ili napona napajanja. Dizajniranje regulatora predstavlja ključni zadatak za efikasan i stabilan rad cijelokupnog pogona. Taj zadatak se sastoji iz odabira strukture regulatora i estimacije njegovih parametara.

Regulacija se vrši na način što se na ulazu regulatora (slika 2.2.1) dovode signal sa senzora i referentni signal, nakon čega se na osnovu pomenutih formira signal greške. Na osnovu obrade signala greške po primjenjenom zakonu upravljanja, regulator formira upravljački signal. Regulator upravljačkim signalom najčešće djeluje na energetski pretvarač (izvršni element) kojim se napaja mašina, te na taj način utiče na pogon. U pogonu može postojati i više regulatora, gdje se upravljački signal jednog regulatora dovodi na ulaz drugog regulatora (ugniježđeno ili kaskadno upravljanje) [1,9].



Slika 2.2.1: Regulator sa tokom signala

Algoritmi upravljanja se dijele na analogne i digitalne, u zavisnosti od načina obrade signala u cilju formiranja upravljačkog signala. Analogni algoritmi se opet dijele na linearne i nelinearne. Najveći broj upravljačkih zadataka može se riješiti primjenom linearног zakona upravljanja, čije su tehnike podešavanja parametara relativno jednostavne za primjenu u praksi.

Linearnim zakonima upravljanja moguće je ostvariti tri dejstva: proporcionalno, integralno i diferencijalno [10].

Proporcionalno dejstvo (*P regulator*) određuje veličinu statičke greške sistema, pri tom ne mijenjajući njen tip. Važno je napomenuti da prevelika vrijednost pojačanja, odnosno proporcionalnog dejstva može, u zavisnosti od karakteristika sistema, dovesti do nestabilnosti istog. U nekim sistemima moguće je željene performanse ostvariti isključivo pomoću ovog dejstva (*P regulatora*).

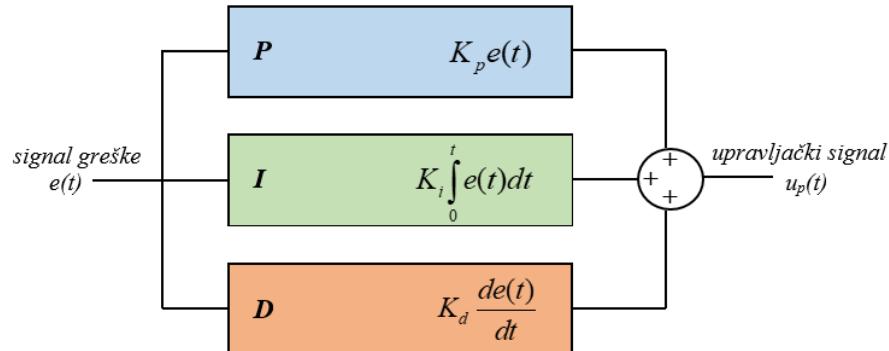
Integralno dejstvo (*I regulator*) povezuje grešku sa brzinom promjene upravljačke promjenljive. Uvoђenjem integralnog dejstva postiže se veća inertnost sistema, odnosno sporija reakcija sistema na spoljašnje uticaje, ali zato najčešće dolazi do trajnog otklanjanja greške rada sistema u stacionarnom stanju. Mana ovog tipa regulatora ogleda se u destabilizućem dejstvu u sistemu uslijed kašnjenja. Zbog navedenog, da bi se izbjeglo usporavanje odziva pri promjenama signala greške, integralno dejstvo se nikada samo ne koristi.

Diferencijalno dejstvo (*D regulator*) omogućava bolje praćenje dinamike sistema jer se njime prati brzina promjene greške, a ne samo njena apsolutna vrijednost. Uvođenjem diferencijalnog regulatora povećava se stabilnost i brzina reagovanja sistema. Ovo dejstvo usporava promjenu odziva kada signal greške opada. Samostalno postojanje diferencijalnog regulatora nema mnogo smisla, iz razloga reakcije samo na brze promjene, dok spore i dugotrajne promjene ne bi prouzrokovale nikakvo dejstvo D regulatora.

Različitim kombinacijama navedena tri dejstva (slika 2.2.2) formiraju se regulatori (PI, PD, PID i sl.) čija je uloga postizanje što efikasnijeg i stabilnijeg rada sistema, odnosno postizanje adekvatnih vrijednosti performansi sistema.

Parametri regulatora mogu se podešavati na više načina. Jedna od poznatijih klasičnih metoda je *Ziegler-Nichols* metoda koja ima relativno jednostavnu primjenu, ali kod složenijih sistema pomenuta metoda često doveđe do oscilacija sa većim preskocima. U praksi se često koristi i još jedna metoda koja predstavlja varijaciju *Ziegler-Nichols* metode, a to je metoda simetričnog optimuma. Mana ovog metoda jeste oslanjanje na brojne aproksimacije koje često značajno

odstupaju od karakteristika stvarnog sistema, što se negativno odražava na odziv regulisane veličine [10].



$K_p, K_i, K_d$  – proporcionalna, integralna i diferencijalna konstanta  
 (podešavanjem ovih konstanti vrši se prilagođavanje regulatora specifičnim zahtjevima sistema nad kojim se vrši regulacija)

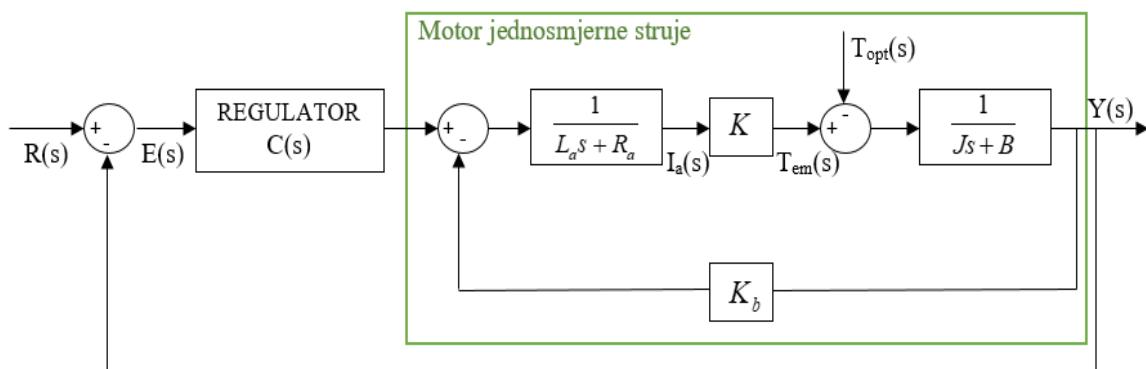
Slika 2.2.2: Kombinacija proporcionalnog, integralnog i diferencijalnog dejstva (PID regulator)

Podešavanje parametara regulatora primjenom metaheurističkih algoritama je metod koji se sve više koristi u automatizovanju procesa estimacije parametara regulatora. Kako je pomenuti metod od interesa za ovo istraživanje, on će biti detaljnije obrađen u nastavku rada.

## 2.2.1. Šema regulacije brzine motora jednosmjerne struje

Sa stanovišta regulacije, prednost motora jednosmjerne struje (MJSS) ogleda se u mogućnosti preciznog podešavanja brzine rotacije uz visoku dinamičnost, tj. sposobnost brze reakcije na promjene zahtjeva koji se odnose na vrijednost referentne brzine pogona.

Blok dijagram MJSS sa regulatorom prikazan je na slici 2.2.1.1:



Slika 2.2.1.1: Blok dijagram MJSS sa regulatorom

pri čemu je:  $R(s)$ - referentni signal (referentna brzina),  $C(s)$ - prenosna funkcija regulatora,  $Y(s)$ - izlaz sistema (stvarna brzina).

Prenosna matrica sistema sa dijagrama na slici 2.2.1.1 ima sljedeći oblik:

$$Y(s) = \begin{bmatrix} G_1(s) & G_2(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R(s) \\ T_{opt}(s) \end{bmatrix}, \quad (2.15)$$

gdje je:

$$G_1(s) = \frac{KC(s)}{L_a Js^2 + (L_a B + R_a J)s + R_a B + K(C(s) + K_b)} \quad (\text{u odnosu na } R(s)), \quad (2.16)$$

$$G_2(s) = \frac{-(L_a s + R_a)}{L_a Js^2 + (L_a B + R_a J)s + R_a B + K(C(s) + K_b)} \quad (\text{u odnosu na } T_{opt}(s)). \quad (2.17)$$

### 3. EO algoritam

#### 3.1. Opšte informacije o metaheurističkim algoritmima

Metaheuristički algoritmi [11] se koriste za pretragu efikasnih rješenja u problemima optimizacije, obično u slučajevima gdje neki klasični metodi nijesu dovoljno efikasni. Ovi algoritmi kombinuju dvije važne karakteristike: istraživanje i eksploraciju. Istraživanje je sposobnost globalnog pretraživanja prostora, dok se pod eksploracijom podrazumijeva lokalno pretraživanje oko postojećih rješenja u cilju povećanja njihovog kvaliteta.

Metaheuristički algoritmi sve više pronalaze svoju primjenu u podešavanju parametara regulatora u električnim pogonima u cilju automatizacije ovog procesa. Prednost ove metode jeste u brzom pronalaženju optimalnih rješenja iterativnim procesom, kroz koji poboljšavanje rješenja traje sve do ispunjenja zadatog kriterijuma kvaliteta rješenja. Pokrivenost prostora u kojem se pretražuju rješenja je mnogo bolja u odnosu na ostale metode, pri čemu algoritmi ne zavise od početnih uslova i imaju mogućnost pretrage velikog opsega vrijednosti promjenljivih. Još jedna od prednosti estimacije parametara regulatora pomoću metaheurističkih algoritama jeste i fleksibilnost u pogledu prilagođavanja različitim zahtjevima sistema, kao i praćenje dinamike sistema u realnom vremenu, čime se postižu bolje performanse sistema u promjenljivim uslovima.

Osnovni zadatak kod primjene metaheurističkih algoritama jeste podešavanje optimalnih parametara algoritma (veličina populacije, korak, faktor inercije, stopa mutacije i sl.), što često može da bude veoma zahtjevan posao. Ponekad je, kada su u pitanju složeni sistemi, potrebno duže vrijeme izvršavanja algoritma, što može predstavljati problem u realnim uslovima gdje su resursi (vrijeme, memorija, računski resursi sl.) obično ograničeni. Može se dešavati i da algoritam u ponovljenim izvršavanjima za isti problem ne daje slične rezultate, što stvara poteškoće u različitim analizama. U cilju suzbijanja prethodno navedenih problema, rješenje je moguće pronaći u hibridizaciji algoritama, čime se pospješuje efikasnost algoritma, poboljšava konvergenciju ka optimalnim rješenjima, povećava stabilnost i prilagodljivost procesa. Hibridizacijom je moguće kombinovanje više različitih algoritama ili tehnika u jedan integrisani metod u cilju poboljšanja performansi procesa koji je predmet optimizacije.

Neki od algoritama koji se najčešće koriste za podešavanje regulatora u pogonima sa MJSS su: *Particle Swarm Optimization* (PSO) [12], *Gray Wolf Optimization* (GWO) [13], *Harris Hawks Optimization* (HHO) [14], *Invasive Weed Optimization* (IWO) [15], *Salp Swarm Algorithm* (SSA) [16], *Sine Cosine Algorithm* (SCA) [17], *Slime Mould Algorithm* (SMA) [18], *Henry Gas Solubility Optimization* (HGSO) [19], *Atom Search Optimization* (ASO) [20].

U ovom poglavlju će biti predstavljen još jedan algoritam- *Equilibrium Optimizer* (EO) [21,22] za potrebe estimacije parametara regulatora.

### 3.2. Inspiracija nastanka EO algoritma

EO (engl. *Equilibrium Optimizer*) algoritam je optimizacioni algoritam inspirisan dinamičkim modelima balansa mase (očuvanje mase koja ulazi, generiše se i izlazi iz kontrolnog volumena) koji se koriste za procjenu stanja ravnoteže. U EO, svaka čestica (rastvor) sa svojom pozicijom (koncentracijom) djeluje kao agent pretraživanja. Agenti za pretragu nasumično ažuriraju svoju koncentraciju u odnosu na najbolja od dobijenih rješenja (tzv. ravnotežni kandidati), da bi konačno došli do ravnotežnog stanja (optimalnog rješenja). Pomenuti algoritam spada u klasu optimizacionih algoritama koji se zasnivaju na zakonima fizike.

Inspiracija za EO algoritam zasniva se na diferencijalnoj jednačini koja predstavlja jednačinu masene ravnoteže, u kojoj je promjena mase u vremenu jednaka zbiru količina masa koje ulaze u sistem ili se stvaraju unutar njega, umanjenom za količinu koja napušta sistem (relacija (3.1)):

$$V \frac{dC}{dt} = QC_{eq} - QC + M, \quad (3.1)$$

gdje je  $C$  koncentracija unutar kontrolnog volumena,  $V \frac{dC}{dt}$  stopa promjene mase u kontrolnom volumenu,  $Q$  volumetrijska stopa protoka u i iz kontrolnog volumena,  $C_{eq}$  koncentracija u ravnotežnom stanju u kojem nema generisanja unutar kontrolnog volumena,  $M$ - stopa generisanja mase unutar kontrolnog volumena.

Ravnotežno stanje se postiže kada je  $V \frac{dC}{dt}$  jednako nuli.

Jednačina (3.1) se može preuređenjem uvođenjem nove veličine  $\lambda$  čiji je naziv - stopa obrta ( $\lambda = \frac{Q}{V}$ ), tako da važi:

$$\frac{dC}{\lambda C_{eq} - \lambda C + \frac{M}{V}} = dt, \quad (3.2)$$

odakle se integracijom može doći do izraza za koncentraciju:

$$C = C_{eq} + (C_0 - C_{eq})P + \frac{M}{\lambda V}(1 - P), \quad (3.3)$$

pri čemu je  $P = \exp[-\lambda(t - t_0)]$  eksponencijalni faktor,  $C_0$  početna koncentracija, a  $t_0$ - početno vrijeme, koji zavise od granica integracije.

### 3.3. Incijalizacija i kandidati za optimalno rješenje

Slično kao i kod drugih metaheurističkih algoritama, i u EO algoritmu se koristi početna populacija na startu procesa optimizacije. Inicijalne koncentracije se formiraju na osnovu broja čestica i dimenzija, s ujednačenom nasumičnom incijalizacijom u prostoru pretrage, odakle slijedi:

$$C_i^{init} = C_{\min} + rand_i(C_{\max} - C_{\min}), \quad i = 1, 2, 3 \dots n, \quad (3.4)$$

gdje je  $C_i^{init}$  početni vektor koncentracije  $i$ -te čestice,  $C_{\min}$  i  $C_{\max}$  označavaju minimalnu i maksimalnu vrijednost dimenzija,  $rand_i$  je slučajni vektor iz intervala  $[0,1]$ , a  $n$  je broj čestica populacije.

Stanje ravnoteže je konačno stanje konvergencije algoritma, koje bi trebalo da bude globalni optimum. Kako na početku procesa optimizacije nema podataka o stanju ravnoteže, samo kandidati za ravnotežna stanja daju obrazac česticama za pretragu. Eksperimentalno je utvrđeno da je za kandidate najbolje uzeti četiri najbolje identifikovane čestice do datog trenutka, i još jednu-petu, čija koncentracija predstavlja aritmetičku sredinu prethodno pomenute četiri čestice. Ova četiri kandidata pomažu EO algoritmu da ima bolju sposobnost istraživanja, dok peta (projek) pomaže u eksploraciji, tj. popravljanju kvaliteta rješenja. U suštini, broj kandidata može biti proizvoljan i zavisi od vrste optimizacionog problema. Od prethodno navedenih pet čestica formira se vektor, takozvani ravnotežni (ekvilibrijumski) skup (relacija (3.5)):

$$\vec{C}_{eq,b} = \left\{ \vec{C}_{eq(1)}, \vec{C}_{eq(2)}, \vec{C}_{eq(3)}, \vec{C}_{eq(4)}, \vec{C}_{eq(sr)} \right\}. \quad (3.5)$$

Svaka čestica, u svakoj iteraciji, ažurira svoju koncentraciju slučajnim odabirom nekog od kandidata izabranih sa istom vjerovatnoćom. Do kraja procesa optimizacije svaka čestica će biti ažurirana sa svim kandidatskim rješenjima, s istim brojem ažuriranja za svaku česticu.

### 3.4. Eksponencijalni faktor P

Eksponencijalni faktor  $P$  pomaže pri uspostavljanju razumne ravnoteže između procesa istraživanja i eksploracije. Kako brzina prometa može varirati s vremenom u realnom kontrolnom volumenu, pretpostavlja se da je  $P$  slučajni vektor iz intervala  $[0,1]$ , što je predstavljeno sljedećom relacijom:

$$\vec{P} = e^{-\bar{\lambda}(t-t_0)}, \quad (3.6)$$

gdje je  $\lambda$  stopa obrta, a  $t$  vrijeme definisano kao funkcija od iteracije ( $Iter$ ), i opada sa brojem iteracija, što je opisano sljedećom relacijom:

$$t = \left( 1 - \frac{Iter}{Max\_Iter} \right)^{\left( a_2 \frac{Iter}{Max\_Iter} \right)}, \quad (3.7)$$

pri čemu  $Iter$  i  $Max\_Iter$  predstavljaju trenutni i maksimalni broj iteracija, respektivno, dok je  $a_2$  konstantna vrijednost pomoću koje se podešava sposobnost eksploracije.

Kako bi se obezbijedila konvergencija smanjenjem brzine pretraživanja, uz poboljšane sposobnosti istraživanja i eksploracije algoritma, razmatra se sljedeća relacija:

$$\vec{t}_0 = \frac{1}{\bar{\lambda}} \ln \left( -a_1 \text{sign}(\vec{r} - 0.5) [1 - e^{-\bar{\lambda} t}] \right) + t, \quad (3.8)$$

gdj je  $a_1$  konstanta pomoću koje se podešava sposobnost istraživanja (što je  $a_1$  veće od  $a_2$ , to je sposobnost istraživanja dominantnija u odnosu na sposobnost eksploracije, i obrnuto- ukoliko  $a_2$  ima veću vrijednost u odnosu na  $a_1$ , dominantnija je sposobnost eksploracije), dio relacije  $\text{sign}(r - 0.5)$  utiče na smjer istraživanja i eksploracije, dok je  $r$  slučajni vektor iz intervala  $[0,1]$ . Konstante  $a_1$  i  $a_2$  se određuju empirijski, a po potrebi se mogu prepodešavati u zavisnosti od vrste optimizacionog problema.

Kombinovanjem relacija (3.6) i (3.8) moguće je izvesti relaciju (3.9):

$$\vec{P} = a_1 \text{sign}(\vec{r} - 0.5) \left[ e^{-\bar{\lambda} t} - 1 \right]. \quad (3.9)$$

### 3.5. Stopa generisanja $M$

Stopa generisanja  $M$  je jedan od ključnih pojmova u predloženom algoritmu za pružanje tačnog rješenja poboljšavanjem faze eksploracije. Jedan od brojnih modela kojim se opisuje stopa generisanja jeste model koji pomenutu veličinu opisuje kao proces eksponencijalnog opadanja, čiji je oblik:

$$\vec{M} = \vec{M}_0 e^{-\bar{k}(t-t_0)}, \quad (3.10)$$

gdje je  $M_0$  početna vrijednost, a  $k$  konstanta opadanja. U cilju postizanja bolje kontrolisanog obrasca pretraživanja i ograničenja broja slučajnih varijabli, pretpostavlja se da je  $k=\lambda$  i koristi prethodno izveden eksponencijalni izraz. Konačni oblik jednačine za stopu generisanja ima oblik:

$$\vec{M} = \vec{M}_0 e^{-\bar{\lambda}(t-t_0)} = \vec{M}_0 \vec{P}, \quad (3.11)$$

pri čemu važi:

$$\overrightarrow{M_0} = \overrightarrow{MCP} (\overrightarrow{C_{eq}} - \vec{\lambda} \overrightarrow{C}), \quad (3.12)$$

dok je:

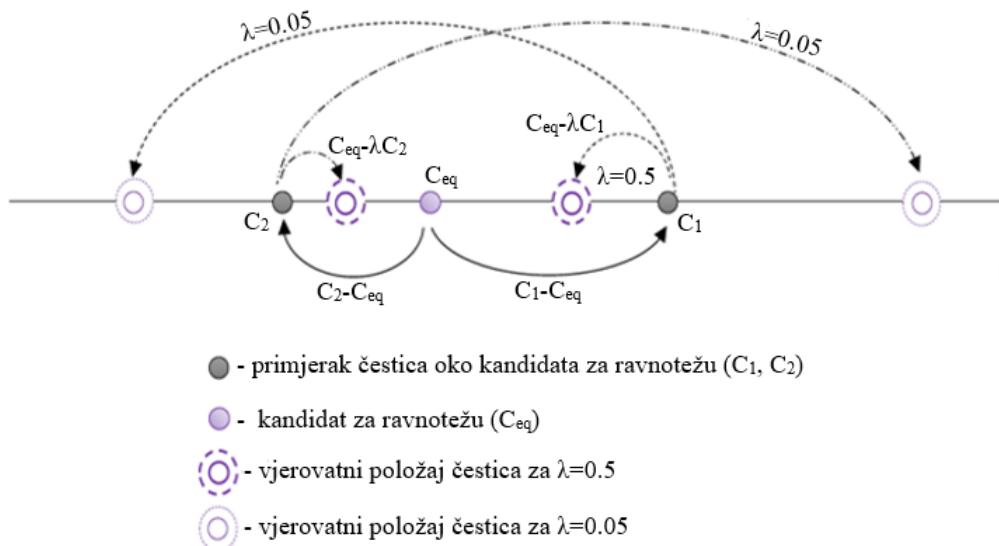
$$\overrightarrow{MCP} = \begin{cases} 0.5r_1 & r_2 \geq MP \\ 0 & r_2 < MP \end{cases}, \quad (3.13)$$

gdje su  $r_1$  i  $r_2$  nasumični brojevi iz intervala  $[0,1]$ , a  $\overrightarrow{MCP}$  vektor konstruisan na osnovu relacije (3.13) i definisan kao parametar kontrole brzine generisanja, koji uključuje i mogućnost doprinosa stope generisanja procesu ažuriranja. Vjerovatnoća ovog doprinosa koji određuje koliko čestica koristi proces generisanja da ažurira svoja stanja određena je vjerovatnoćom generisanja ( $MP$ ). Relacija (3.13) se javlja na nivou svake čestice. Dobar balans izmedju istraživanja i eksploracije postiže se za  $MP=0.5$ . Konačno, pravilo ažuriranja EO algoritma su data sljedećom relacijom:

$$\overrightarrow{C} = \overrightarrow{C_{eq}} + (\overrightarrow{C} - \overrightarrow{C_{eq}}) \overrightarrow{P} + \frac{\overrightarrow{M}}{\vec{\lambda} V} (1 - \overrightarrow{P}), \quad (3.14)$$

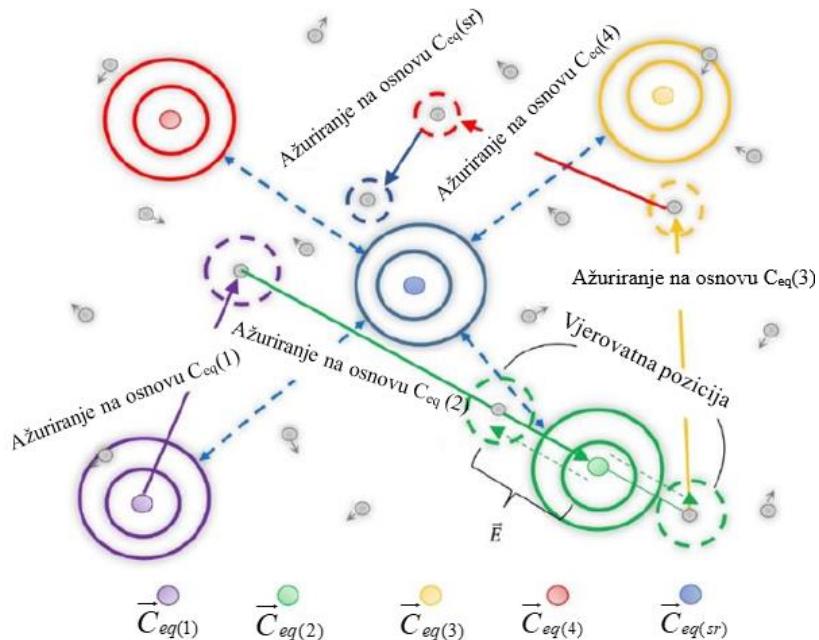
gdje je  $P$  definisano relacijom (3.9), a  $V$  se smatra jediničnim. Prvi član u relaciji (3.14) predstavlja ravnotežnu koncentraciju, dok drugi i treći predstavljaju varijacije u koncentraciji. Drugi član je odgovoran za globalno pretraživanje prostora (doprinosi istraživanju koristeći velike varijacije u koncentraciji), kako bi se pronašla optimalna tačka. Treći član doprinosi tačnosti rješenja (doprinosi eksploraciji koristeći male varijacije u koncentraciji). U zavisnosti od parametara kao što su koncentracija čestica i ravnotežnih kandidata, ili stope obrta ( $\lambda$ ), drugi i treći član mogu imati isti ili suprotan predznak. Isti znaci uslovjavaju veliku varijaciju koncentracije, što pomaže boljem pretraživanju cijelog domena, dok suprotan znak čini varijaciju malom, pomažući u lokalnim pretragama.

Iako je drugi sabirak iz relacije (3.14) zadužen za pronašetak rješenja relativno udaljenih od ravnotežnih kandidata, dok treći sabirak iste relacije ima ulogu u poboljšanju rješenja koja su bliža kandidatima, to se ne dešava uvijek. Mala stopa obrta (npr.  $\lambda < 0.05$ ), u imeniku trećeg člana povećava njegovu varijaciju i pomaže u istraživanju u nekim dimenzijama. Na slici 3.5.1 je predstavljen način na koji pomenuti pojmovi doprinose istraživanju i eksploraciji.  $C_1 - C_{eq}$  sa slike 3.5.1 predstavlja drugi sabirak iz relacije (3.14), dok  $C_{eq} - \lambda C_1$  predstavlja treći sabirak iste relacije ( $M = f(M_0)$ ). Stopa generisanja kontroliše varijacije nastale uslijed male stope obrta  $\lambda$ . Budući da se  $\lambda$  mijenja sa svakom promjenom dimenzije, veće varijacije se dešavaju samo onim dimenzijama s malim vrijednostima  $\lambda$ .



Slika 3.5.1: Proces ažuriranja koncentracije čestica u zavisnosti od vrijednosti stope obrta  $\lambda$

Na slici 3.5.2 prikazan je način na koji kandidati za ravnotežu utiču na predmetnu česticu, tj. uticaj pomenutih kandidata na ažuriranje koncentracije čestica u EO algoritmu. U početnim iteracijama kandidati za ravnotežni položaj imaju različite položaje, a eksponencijalni faktor generiše velike slučajne brojeve. Ovaj proces ažuriranja u koracima pomaže česticama u pokrivanju cijelog domena prilikom pretrage. Suprotan scenario se dešava u poslednjim iteracijama, kada kandidati okružuju optimalnu tačku sličnim konfiguracijama, i tada eksponencijalni faktor generiše male slučajne brojeve, što pomaže u preciziranju rješenja pružanjem manjih veličina koraka. Ovaj koncept se može proširiti na više dimenzija pri čemu se koncentracija ažurira kretanjem čestica u  $n$ -dimenzionalnom prostoru.



Slika 3.5.2: Uticaj kandidata za ravnotežni položaj na ažuriranje koncentracije čestica

### 3.6. Pregled pojmove i pseudokod EO algoritma

Prije nego što bude predstavljen pseudokod EO algoritma, biće napravljen pregled pomenutih pojmove vezanih za EO algoritam. Takođe biće objasnjen i jedan pojam koji do sada nije pomenut u radu, a to je- ušteda memorije čestice. Ovaj pregled će biti koristan zbog boljeg razumijevanja pseudokoda i samog principa rada algoritma, imajući u vidu koliko rad sa metaheurističkim algoritmima može biti konfuzan.

Pregled osnovnih pojmove vezanih za EO algoritam dat je u nastavku:

- $a_1$  - konstanta kojom se podešava sposobnost istraživanja algoritma, odnosno njome je određeno koliko bi nova pozicija bila udaljena od ravnotežnog kandidata. Kako vrijednost  $a_1$  može povećati varijaciju koncentracije, ona bi trebala biti dovoljno velika da proširi sposobnost istraživanja. Treba uzeti u obzir da bi vrijednosti  $a_1 > 3$  dale slabije performanse sistema, gurajući čestice da pretražuju po samim granicama prostora pretrage.
- $a_2$  - konstanta kojom se podešava sposobnost eksploracije algoritma, tj. njome je određen intezitet eksploracije, pretragom u okolini najboljeg rješenja.
- Ekvilibrijumski skup ( $C_{eq,b}$ ) - vektor koji se sastoji od pet čestica, od kojih četiri predstavljaju kandidate za ravnotežno stanje, a koncentracija pete čestice je aritmetička sredina koncentracija prethodne četiri. Prve četiri čestice pomažu u istraživanju prostora, dok je uloga pete da poboljšava eksploraciju. U suštini, ažuriranje koncentracija koje se vrši na osnovu ovih kandidata poboljšava, u početku, sposobnost algoritma da globalno pretražuje prostor. Prolaskom sve više iteracija, proces istraživanja iščezava a poboljšava se sposobnost eksploracije.
- $sign(r-0.5)$  - kontroliše smjer istraživanja i eksploracije. Obzirom da je  $r$  iz intervala  $[0,1]$  sa uniformnom raspodjelom, postoji jednak vjerovatnoća negativnih i pozitivnih predznaka kojima je određen smjer.
- Vjerovatnoća generisanja ( $MP$ ) - kontroliše vjerovatnoću uticaja stope generisanja na proces ažuriranja. Za  $MP=1$  važi da stopa generisanja nema uticaj na proces optimizacije. Ovo stanje naglašava visoku sposobnost istraživanja, pa često dovodi do netačnih rješenja. Za  $MP=0$  važi da će stopa generisanja uvijek uticati na proces optimizacije, što povećava vjerovatnoću stagnacije u okviru lokalnog optimuma. Empirijski je utvrđeno da se za  $MP=0.5$  postiže dobra ravnoteža između procesa istraživanja i eksploracije.
- Ušteda memorije - karakteristika koja omogućava čuvanje niza najboljih čestica. Ova funkcija vrši poređenje rezultata svake čestice u trenutnoj iteraciji sa onima iz prethodne iteracije. Ukoliko nova čestica postigne bolje uklapanje (bolju ocjenu) izvršiće se njen

prepisivanje u niz. Pomenuti mehanizam unapređuje eksploracijske sposobnosti algoritma.

Detaljan pseudokod EO algoritma dat je u nastavku:

- 1: *Inicijalizacija populacije čestica  $i = 1, \dots, n$*
- 2: *Postavljanje ocjene ravnotežnih kandidata na visoku vrijednost (ocjenom se definiše mjera zadovoljenja kriterijuma optimalnosti)*
- 3: *Dodjeljivanje vrijednosti slobodnim parametrima  $a_1, a_2, MP$*
- 4: ***While***(Iter<Max\_Iter)
- 5: ***For***  $i=1: \text{broj čestica}(n)$
- 6: *Proračunavanje ocjene  $i$ -te čestice (ocjena se odnosi na stepen zadovoljenja kriterijuma- manja vrijednost ocjene implicira manju grešku, tj. bolje zadovoljenje zadatog kriterijuma)*
- 7: ***If***  $\text{ocjena}(\vec{C}_i) < \text{ocjena}(\vec{C}_{eq1})$
- 8: *Zamijeniti  $\vec{C}_{eq1}$  sa  $\vec{C}_i$  i zamijeniti ocjene  $\text{ocjena}(\vec{C}_{eq1})$  sa  $\text{ocjena}(\vec{C}_i)$  (pod zamjenom se podrazumijeva upisivanje vrijednosti  $\vec{C}_i$  u promjenljivu  $\vec{C}_{eq1}$ , a na isti način se pamti i bolja od dvije ocjene)*
- 9: ***Elseif***  $\text{ocjena}(\vec{C}_i) > \text{ocjena}(\vec{C}_{eq1}) \ \& \ \text{ocjena}(\vec{C}_i) < \text{ocjena}(\vec{C}_{eq2})$
- 10: *Zamijeniti  $\vec{C}_{eq2}$  sa  $\vec{C}_i$  i zamijeniti ocjena( $\vec{C}_{eq2}$ ) sa  $\text{ocjena}(\vec{C}_i)$*
- 11: ***Elseif***  $\text{ocjena}(\vec{C}_i) > \text{ocjena}(\vec{C}_{eq1}) \ \& \ \text{ocjena}(\vec{C}_i) > \text{ocjena}(\vec{C}_{eq2}) \ \&$   
***&ocjena}(\vec{C}\_i) < \text{ocjena}(\vec{C}\_{eq3})***
- 12: *Zamijeniti  $\vec{C}_{eq3}$  sa  $\vec{C}_i$  i zamijeniti ocjena( $\vec{C}_{eq3}$ ) sa  $\text{ocjena}(\vec{C}_i)$*
- 13: ***Elseif***  $\text{ocjena}(\vec{C}_i) > \text{ocjena}(\vec{C}_{eq1}) \ \& \ \text{ocjena}(\vec{C}_i) > \text{ocjena}(\vec{C}_{eq2}) \ \&$   
***&ocjena}(\vec{C}\_i) > \text{ocjena}(\vec{C}\_{eq3}) \ \& \ \text{ocjena}(\vec{C}\_i) < \text{ocjena}(\vec{C}\_{eq4})***
- 14: *Zamijeniti  $\vec{C}_{eq4}$  sa  $\vec{C}_i$  i zamijeniti ocjena( $\vec{C}_{eq4}$ ) sa  $\text{ocjena}(\vec{C}_i)$*
- 15: *End (if)*
- 16: *End (for)*
- 17:  $\vec{C}_{eq(sr)} = (\vec{C}_{eq(1)} + \vec{C}_{eq(2)} + \vec{C}_{eq(3)} + \vec{C}_{eq(4)}) / 4$
- 18: *Formiranje ekvilibrijumskog skupa:  $\vec{C}_{eq,b} = \{\vec{C}_{eq(1)}, \vec{C}_{eq(2)}, \vec{C}_{eq(3)}, \vec{C}_{eq(4)}, \vec{C}_{eq(sr)}\}$*
- 19: *Aktiviranje uštede memorije (if Iter>1)*

$$20: Dodjeljivanje vrijednosti \quad t = \left(1 - \frac{Iter}{Max\_Iter}\right)^{\left(a_2 \frac{Iter}{Max\_Iter}\right)}$$

21: **For**  $i=1$ :broj čestica( $n$ )

22: Nasumični odabir jednog kandidata iz ekvilibrijumskog skupa

23: Generisanje nasumičnih vektora  $\vec{\lambda}, \vec{r}$

24: Konstruisanje eksponencijalnog faktora  $\vec{P} = a_1 \text{sign}(\vec{r} - 0.5) \left[ e^{-\vec{\lambda}t} - 1 \right]$

$$25: \text{Konstruisanje vektora kontrole } \overrightarrow{MCP} = \begin{cases} 0.5r_1 & r_2 \geq MP \\ 0 & r_2 < MP \end{cases}$$

26: Konstruisanje vektora početne vrijednosti  $\overrightarrow{M}_0 = \overrightarrow{MCP} (\overrightarrow{C}_{eq} - \vec{\lambda} \overrightarrow{C})$

27: Konstruisanje vektora stope generisanja  $\overrightarrow{M} = \overrightarrow{M}_0 \overrightarrow{P}$

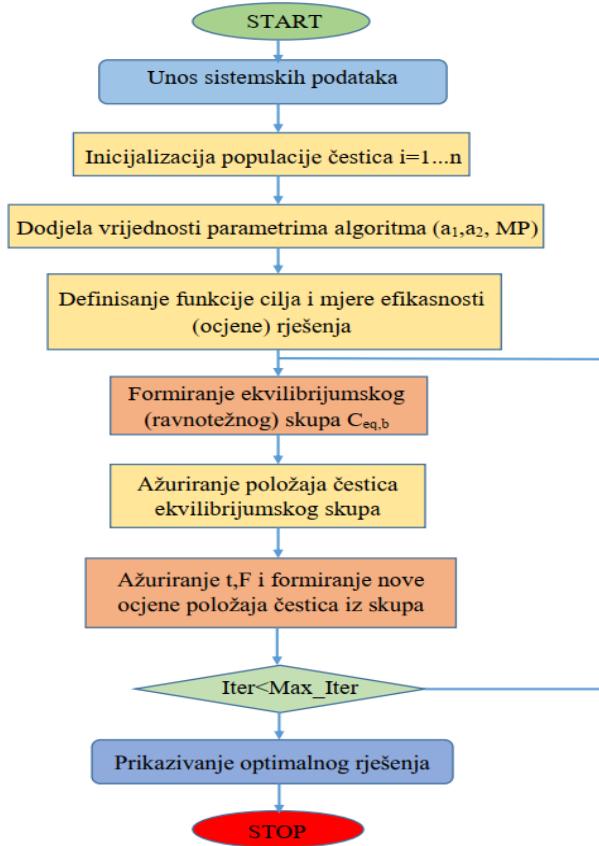
28: Ažuriranje koncentracije  $\overrightarrow{C} = \overrightarrow{C}_{eq} + (\overrightarrow{C} - \overrightarrow{C}_{eq}) \overrightarrow{P} + \frac{\overrightarrow{M}}{\lambda V} (1 - \overrightarrow{P})$

29: End (**for**)

30: Iter=Iter+1

31: End **while**

U cilju bolje preglednosti u nastavku je prikazan dijagram toka EO algoritma (slika 3.6.1):



Slika 3.6.1: Dijagram toka EO algoritma

### 3.7. Računska složenost EO algoritma

Računska složenost ( $O$ ) optimizacionog algoritma predstavljenja je funkcijom koja povezuje vrijeme izvršavanja algoritma sa veličinom ulaznog problema. Složenost zavisi od broja čestica ( $n$ ), broja dimenzija ( $d$ ) i broja iteracija ( $k$ ), dok je  $e$  dio koji se odnosi na evaluaciju (ocjenu) funkcije (relacija (3.15)).

$$O(EO)=O(\text{definisanje problema}) + O(\text{inicijalizacija}) + O(k(\text{evaluacija funkcije})) + \\ + O(k(\text{ušteda memorije})) + O(k(\text{ažuriranje koncentracije})), \quad (3.15)$$

gdje oznaka  $O()$  predstavlja računsku složenost nekog procesa.

Imajući u vidu prethodno navedeno, relacija koja opisuje ukupnu složenost proračuna ima sljedeći oblik:

$$O(EO)=O(1+nd+ken+kn+knd) \cong O(knd+ken). \quad (3.16)$$

Opis EO algoritma, kao i komparativna analiza EO i ostalih optimizacionih algoritama predstavljena je od strane autora rada [21]. Na osnovu izvršenih poređenja, dolazi se do zaključka da EO algoritam može nadmašiti neke od najpoznatijih algoritama kao što su *Particle Swarm Optimization* (PSO), *Genetic Algorithm* (GA), *Gravitational Search Algorithm* (GSA), *Salp Swarm Algorithm* (SSA), *Grey Wolf Optimizer* (GWO). Takođe je, u prethodno navedenoj referenci, EO algoritam testiran prilikom rješavanja određenih inženjerskih problema, gdje se pokazao veoma efikasnim.

### 3.8. Binarni EO algoritam

Za razliku od EO algoritma, kod kojeg čestice mogu biti bilo gdje u prostoru pretraživanja, kod *Binarnog EO* (BEO) algoritma [23, 24] pozicija čestice je kodirana binarnim vektorom, odnosno čestice ažuriraju svoje pozicije promjenom od 0 do 1 ili od 1 do 0. Njihove pozicije su strogo ograničene, te stoga nije moguće koristiti relaciju (3.7) pri ažuriranju pozicije. Shodno navedenom, može se zaključiti da je suštinska razlika između EO i BEO algoritma mehanizam ažuriranja pozicije.

Kod EO algoritma, pri ažuriranju pozicije čestice glavnu ulogu imaju ravnotežni skup, eksponencijalni faktor  $P$  i stopa generisanja  $M$ . Ravnotežni skup sadrži četiri optimalna rješenja i peti član kao prosjek pomenuta četiri. Kako kod BEO algoritma svi članovi, pa i onaj koji predstavlja prosjek moraju biti jednaki 0 ili 1, mora se izvršiti modifikacija proračuna člana koji

predstavlja srednju vrijednost prva četiri iz ravnotežnog skupa. Način proračuna petog člana ravnotežnog skupa kod BEO algoritma predstavljen je sljedećom relacijom:

$$C_{eq(sr)} = \begin{cases} 1, & C_{eq,1} + C_{eq,2} + C_{eq,3} + C_{eq,4} \geq 2 \\ 0, & \text{ostalo} \end{cases}. \quad (3.17)$$

Relacija (3.17) obezbjeđuje da su sve vrijednosti u ravnotežnom skupu jednake 0 ili 1. Iz pomenute relacije se može zaključiti da ako polovina od četiri optimalne vrijednosti iz ravnotežnog skupa ima vrijednost 1, onda važi da je  $C_{eq(sr)} = 1$ . Kod BEO algoritma postoji velika vjerovatnoća da se dobije 1 iz ravnotežnog skupa.

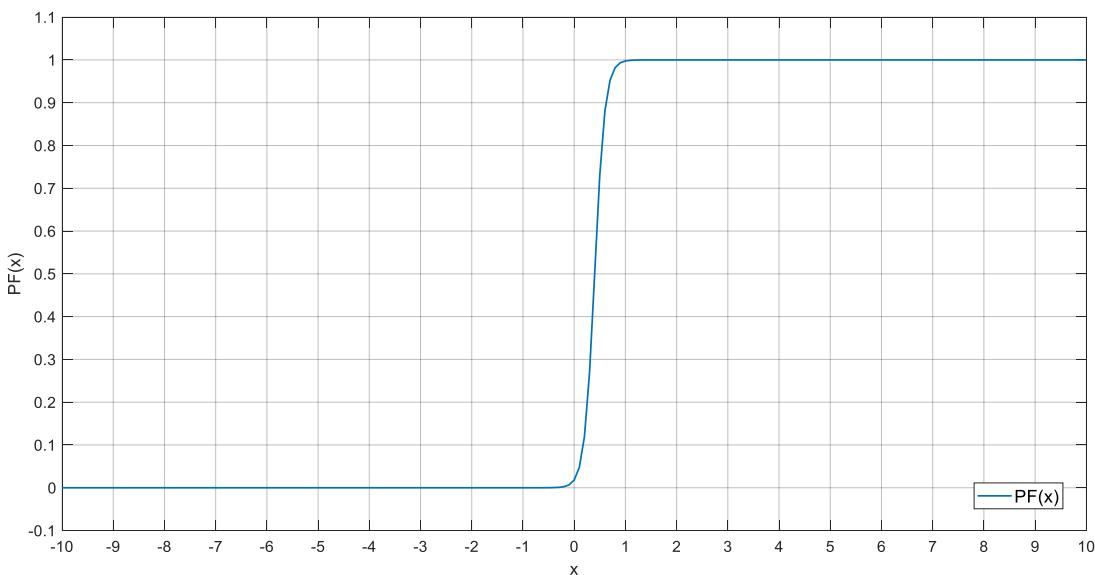
Eksponencijalni faktor  $P$  i stopa generisanja  $M$ , koji imaju važnu ulogu pri ažuriranju pozicije čestica, kod BEO algoritma moraju se preslikati u interval  $[0,1]$ , što se postiže pomoću funkcije prenosa  $PF(x)$  koja je predstavljena relacijom (3.18):

$$PF(x) = \frac{1}{1 + e^{-10(x-0.4)}}, \quad (3.18)$$

gdje za  $j$ -tu iteraciju važi:

$$x = (C_i^j - C_{eq}^j)P + (M / \lambda)(1 - P). \quad (3.19)$$

Kriva prenosne funkcije  $PF(x)$  predstavljena je na slici 3.8.1:



Slika 3.8.1: Kriva prenosne funkcije BEO algoritma

Treba imati u vidu da postoji više različitih prenosnih funkcija pomoću kojih je moguće vršiti preslikavanje kontinualnih vrijednosti u binarne, a ovdje predstavljena  $PF(x)$  je samo jedna od pomenućih.

Nakon preslikavanja  $P$  i  $M$ , vrši se njihovo upoređivanje sa nasumičnim brojem iz intervala  $[0,1]$ , pa nova jednačina ažuriranja dobija sljedeći oblik:

$$C_i^j = \begin{cases} 1 - C_i^j & PF(x) \geq rand \\ C_i^j & ostalo \end{cases}. \quad (3.20)$$

Iz prethodno izloženog može se zaključiti da je BEO algoritam varijacija koja zadržava najveći broj operacija osnovnog EO algoritma, tako da pravi dobar balans između istraživanja i eksploatacije rješenja. Funkcija prenosa BEO algoritma praktično preslikava operativni rezultat EO algoritma u vrijednosti iz intervala  $[0,1]$ , stoga ima presudan uticaj na performanse algoritma. Brža konvergencija i jednostavnija implementacija jesu osnovne prednosti BEO algoritma u odnosu na EO algoritam. Autori radova [24-27] izvršili su poređenje BEO algoritma sa ostalim algoritmima čija je namjena rješavanje problema optimizacije, na osnovu čega su izveli zaključak da je BEO veoma konkurentan algoritam u pomenutoj oblasti.

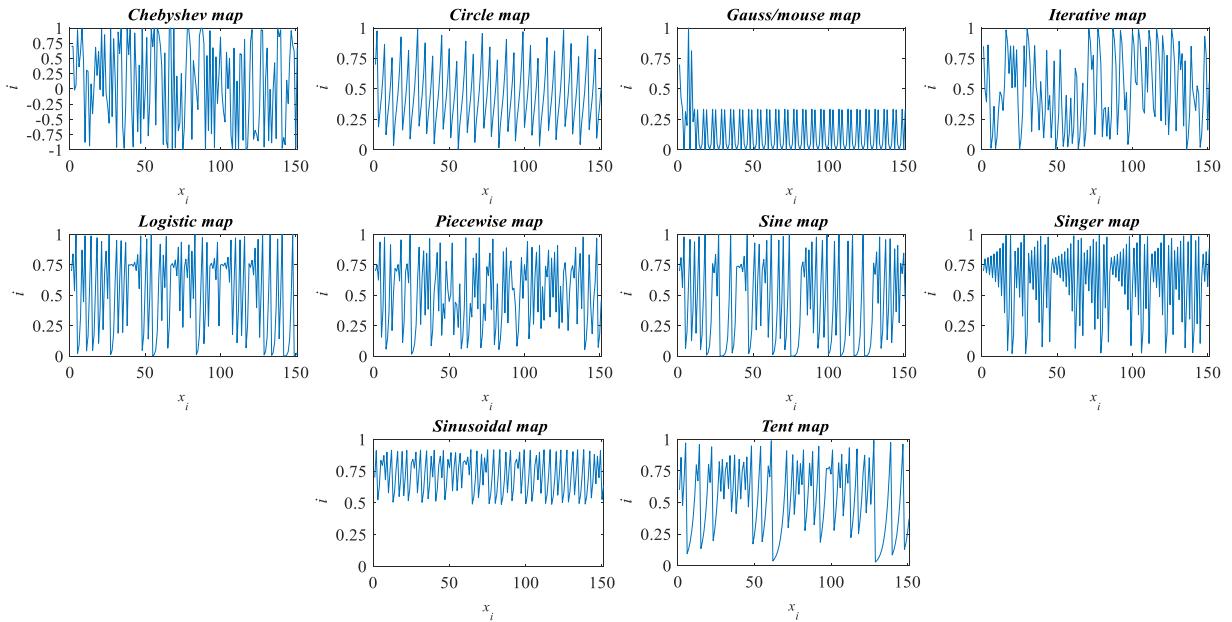
### 3.9. Haotični EO algoritam

U cilju postizanja boljeg pretraživanja prostora i bržeg pronalaska globalnog optimuma, tj. unapređenja procesa estimacije parametara regulatora, izvršeno je modifikovanje EO algoritma. Pomenuta modifikacija se odnosi na integrisanje haotičnih mapa [28] u kod EO algoritma, čime se poboljšava proces inicijalizacije, brzina i konvergentnost rješenja algoritma.

Integriranjem haotičnih mapa dobija se *Haotični EO* (ChEO) algoritam [29, 30] kod kojeg inicijalizacija prestaje biti nasumična, već se početne grupe rješenja dobijaju odabriom vrijednosti iz jedne od haotičnih mapa koje će biti predstavljene u nastavku.

Neke od najčešće primjenjivanih haotičnih mapa su: *Chebyshev*, *Circle*, *Gauss/mouse*, *Iterative*, *Logistic*, *Piecewise*, *Sine*, *Singer*, *Sinusoidal* i *Tent*. Grafici svake od pomenutih mapa prikazani su na slici 3.9.1, dok su njihove matematičke formulacije predstavljene u Tabeli (3.9.1).

Brojni optimizacioni algoritmi imaju problem u vidu preuranjene konvergencije, loših sposobnosti lokalnog ili globalnog pretraživanja kao i visoke računske složenosti. Smisao primjene haotičnih mapa jeste u pokušaju prevazilaženja pomenutih problema. Integriranjem mehanizma haosa u EO algoritam, izbjegava se zarobljenost u lokalnom optimumu, pri čemu se postiže i povećanje performansi lokalne pretrage. Prethodno navedeno implicira pronalazak boljeg optimalnog rješenja.



Slika 3.9.1: Grafici haotičnih mapa

Tabela 3.9.1: Matematičke formulacije haotičnih mapa

<i>Naziv mape</i>	<i>Matematička formulacija mape</i>
<i>Chebyshev mapa</i>	$x_{i+1} = \cos(i \times \arccos(x_i)),$
<i>Circle mapa</i>	$x_{i+1} = \text{mod}(x_i + b - \frac{a}{2\pi} \sin(2\pi x_i), 1), \quad a = 0.5, b = 0.2$
<i>Gauss/mouse mapa</i>	$x_{i+1} = \begin{cases} 0, & x_i = 0 \\ \text{mod}\left(\frac{1}{x_i}, 1\right), & x_i \neq 0 \end{cases}$
<i>Iterative mapa</i>	$x_{i+1} = \sin\left(\frac{a\pi}{x_i}\right), \quad a = 0.7$
<i>Logistic mapa</i>	$x_{i+1} = ax_i(1-x_i), \quad a = 4$
<i>Piecewise mapa</i>	$x_{i+1} = \begin{cases} \frac{x_i}{P}, & 0 \leq x_i < P \\ \frac{x_i - P}{0.5 - P}, & P \leq x_i < 0.5 \\ \frac{1 - P - x_i}{0.5 - P}, & 1 - P \leq x_i < 0.5 \\ \frac{1 - x_i}{P}, & 1 - P \leq x_i < 1 \end{cases} \quad P = 0.4$
<i>Sine mapa</i>	$x_{i+1} = \sin(x_i\pi)$
<i>Singer mapa</i>	$x_{i+1} = u(7.86x_i - 23.31x_i^2 + 28.75x_i^3 - 13.302875x_i^4), \quad u = 1.07$
<i>Sinusoidal mapa</i>	$x_{i+1} = 2.3x_i^2 \sin(x_i\pi)$
<i>Tent mapa</i>	$x_{i+1} = \begin{cases} \frac{x_i}{0.7}, & x_i < 0.7 \\ \frac{10}{3}(1 - x_i), & x_i > 0.7 \end{cases} \quad x_1 = 0.6$

Kako su pri izvršavanju EO algoritma potrebne nasumične vrijednosti iz intervala [0,1] vrši se, ukoliko je to potrebno, skaliranje jednačina mapa (množenjem koeficijentima), kako bi vrijednosti koje mape generišu bile iz pomenutog intervala.

I BEO i ChEO algoritam će, kao modifikovani oblici EO algoritma, u nastavku ovog rada biti primjenjeni u cilju estimacije parametara regulatora u pogonu sa motorom jednosmjerne struje, gdje će biti izvršena i komparativna analiza rezultatata dobijenih pomoću izvornog oblika EO algoritma i pomenutih modifikovanih oblika istog.

## 4. Simulacioni rezultati

U ovom poglavlju će biti izvršena analiza simulacionih rezultata optimizacije parametara regulatora u pogonu sa motorom jednosmjerne struje. Takođe, biće izvršeno poređenje rezultata dobijenih različitim kombinacijama strukture regulatora, kriterijumske funkcije i modifikacija EO algoritma. Sva istraživanja su realizovana modelovanjem posmatranog sistema u *Matlabu*, i realizacijom modela u *Matlab-Simulinku*.

Za potrebe ovog istraživanja korišćeni su kataloški podaci *EMG30* motora jednosmjerne struje [31, 32]. Pregled vrijednosti parametara pomenutog motora predstavljen je u Tabeli 4.1.

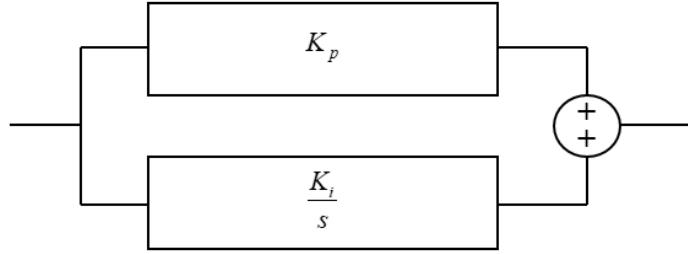
Tabela 4.1: Parametri *EMG30* motora jednosmjerne struje

<i>Parametar motora</i>	<i>Vrijednost parametra motora</i>
Nominalni napon (U)	12V
Nominalni moment ( $T_{em}$ )	0.147Nm
Moment trenja ( $T_{tr}$ )	0.04Nm
Nominalna brzina ( $\omega_n$ )	17.8rad/s
Brzina praznog hoda ( $\omega_o$ )	22.62rad/s
Nominalna struja ( $I_{an}$ )	430mA
Maksimalna struja ( $I_{amax}$ )	2.5A
Otpornost armature ( $R_a$ )	7.101Ω
Induktivnost armature ( $L_a$ )	3.4mH
Moment inercije (J)	0.00567 kgm <sup>2</sup>
Koefficijent trenja (B)	0.000931 Nms/rad
Konstanta momenta (K)	0.509 Nm/A
Konstanta brzine (K <sub>b</sub> )	0.509Vs/rad

Za potrebe istraživanja, u ovom radu razmatrana je primjena sljedećih struktura regulatora: PI (*Proportional-Integral*), PID (*Proportional-Integral-Derivative*), 2-DOF PID (*Two-Degree-of-Freedom Proportional-Integral-Derivative*) i FOPID (*Fractional-Order Proportional-Integral-Derivative*) regulatora.

PI regulator [33] kombinuje proporcionalno i integralno dejstvo u cilju postizanja željenih rezultata. Često se primjenjuje u pogonima sa regulacijom brzine MJSS. Prenosna funkcija PI regulatora data je relacijom (4.1), dok je šema pomenutog regulatora predstavljena na slici 4.1.

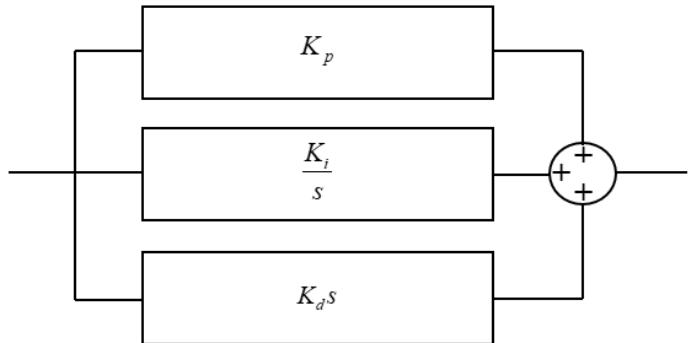
$$C_{PI} = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (4.1)$$



Slika 4.1: Šema PI regulatora

PID regulator [34] ima najširu primjenu u oblasti regulacije brzine MJSS. Pomenuti regulator objedinjuje proporcionalno, integralno i diferencijalno dejstvo, što ga uz relativno malu cijenu i jednostavnost, preporučuje u svim sistemima gdje se zahtijeva postizanje veoma kvalitetnih performansi rada u pogledu brzine reagovanja, stabilnosti, tačnosti rada kao i trajanja prelaznog procesa. Prenosna funkcija PID regulatora dana je relacijom (4.2), dok je šema pomenutog regulatora predstavljena na slici 4.2.

$$C_{PID} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (4.2)$$

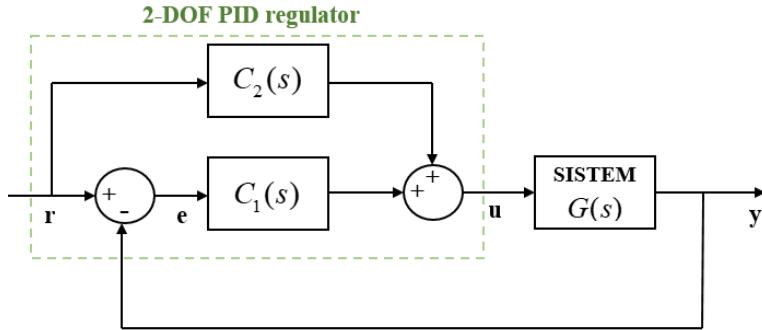


Slika 4.2: Šema PID regulatora

Varijanta PID regulatora koja daje bolje performanse u pogledu brzine odziva, stabilnosti i otpornosti na poremećaje u odnosu na sam PID regulator, jeste 2-DOF PID regulator [35]. Još jedna od prednosti ovog regulatora jeste ublažavanje uticaja promjena referentnog signala na kontrolni signal. U *feedforward* konfiguraciji, 2-DOF PID regulator se dekomponuje na jedan klasični PID regulator ( $C_1(s)$  na slici 4.3), na čijem je ulazu dovoden signal greške, i na drugi *feedforward* regulator ( $C_2(s)$  na slici 4.3) na čijem je ulazu dovoden referentni signal. Prenosne funkcije pomenuta dva dijela 2-DOF PID kontrolera dati su relacijama (4.3) i (4.4), dok je šema *feedforward* konfiguracije 2-DOF PID regulatora predstavljena na slici 4.3.

$$C_1(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d s}{T_f s + 1} \quad (4.3)$$

$$C_2(s) = (b-1)K_p + \frac{(c-1)K_d s}{T_f s + 1} \quad (4.4)$$

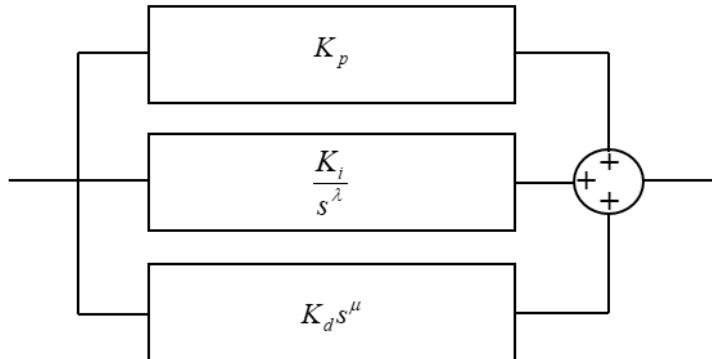


Slika 4.3: Šema *feedforward* konfiguracije 2-DOF PID regulatora

U prethodnim jednačinama  $T_f$  je vremenska konstanta koja se odnosi na filter, dok je  $b$  težinski koeficijent proporcionalnog dejstva i  $c$  težinski koeficijent diferencijalnog dejstva.

FOPID regulator [36] predstavlja varijaciju PID regulatora koja implementira necjelobrojni izvod i integral. U odnosu na PID, kod FOPID regulatora postoje još dva podesiva parametra - stepen necjelobrojne integracije ( $\lambda$ ) i stepen necjelobrojne diferencijacije ( $\mu$ ). Prenosna funkcija FOPID regulatora data je relacijom (4.5), dok je šema pomenutog regulatora predstavljena na slici 4.4.

$$C_{FOPID} = K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} + K_d s^\mu \quad (4.5)$$



Slika 4.4: Šema FOPID regulatora

Uloga kriterijumske funkcije jeste ocjenjivanje performansi sistema i na taj način predstavlja osnovu za optimizaciju parametara regulatora. Kriterijumska funkcija u suštini kvantifikuje razliku između željenog i ostvarenog odziva sistema. Prilikom estimacije parametara regulatora, cilj je pronaći set parametara koji minimizuje vrijednost kriterijumske funkcije, što znači da sistem postiže najbolje performanse u skladu sa određenim mjerilima. Kriterijumske funkcije korišćene u ovom radu su sljedeće: integral apsolutne greške (engl. *Integral of the*

*Absolute Error* - IAE), integral kvadrata greške (engl. *Integral of the Squared Error* - ISE), integral proizvoda vremena i kvadrata greške (engl. *Integral of Time multiplied by the Squared Error* - ITSE). Ukoliko je poznato da je sa  $e(t)$  označena greška u sistemu u vremenu  $t$ , a sa  $T$  ukupno vrijeme simulacije, matematičke formulacije pomenutih kriterijumskih funkcija predstavljene su u Tabeli 4.2.

Tabela 4.2: Matematičke formulacije kriterijumskih funkcija

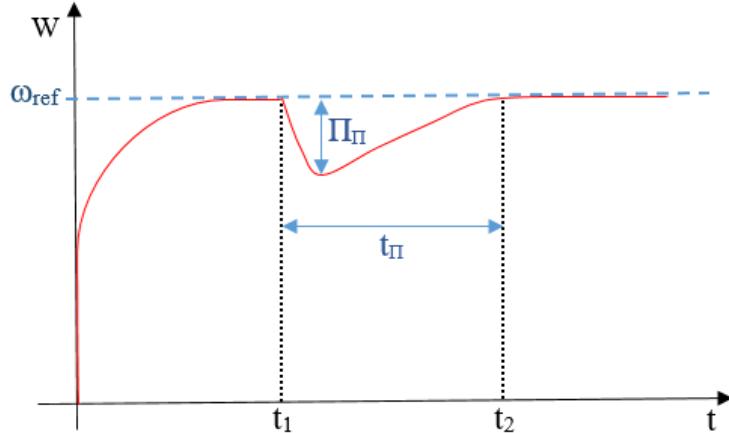
Naziv kriterijumske funkcije	Matematička formulacija kriterijumske funkcije
IAE	$\int_0^T  e(t)  dt$
ISE	$\int_0^T e(t)^2 dt$
ITSE	$\int_0^T t e(t)^2 dt$

Nabrojane kriterijumske funkcije će, u kombinaciji sa EO algoritmom i varijacijama istog (BEO i ChEO), biti primjenjene za optimizaciju parametara prethodno opisanih struktura regulatora u cilju neutralisanja efekta poremećaja kojim se simulira promjena momenta opterećenja motora.

Moment opterećenja motora se tokom simulacije modeluje step poremećajem. Razmatrana su dva slučaja - kada amplituda poremećaja ima vrijednost jednaku 75% vrijednosti zbiru nominalnog i momenta trenja ( $T_{opt}=0.75(T_{em}+T_{tr})$ ), i drugi slučaj kada je amplituda poremećaja jednaka zbiru nominalnog i momenta trenja ( $T_{opt}=(T_{em}+T_{tr})$ ). Procjena kvaliteta postignutih rezultata će se vršiti u odnosu na dva parametra -  $\Pi_\Pi$  (podbačaj) i  $t_\Pi$  (vrijeme smirenja podbačaja). Ove dvije veličine biće objasnijene u nastavku.

Pretpostavlja se postojanje proizvoljnog pogona sa MJSS čija je prenosna funkcija označena sa  $W(s)$ . Zadatak regulatora u takvom pogonu je održavanje brzine na zadatoj (referentnoj) vrijednosti  $\omega_{ref}$ . Nakon pokretanja simulacije, posle određenog vremena motor postiže referentnu brzinu obrtanja. Kao što je prikazano na slici 4.5, u trenutku  $t_1$  simuliran je step poremećaj (opterećenje) koji će da izazove pad brzine obrtanja pogona. Dejstvom regulatora taj poremećaj će biti prigušen, tj. brzina će opet postići referentnu, ili njoj veoma blisku vrijednost (na slici 4.5 - trenutak  $t_2$ ). Shodno navedenom, podbačaj  $\Pi_\Pi$  se definiše kao vrijednost najvećeg odstupanja (pada) brzine od referentne vrijednosti u toku dejstva poremećaja, dok vrijeme smirenja

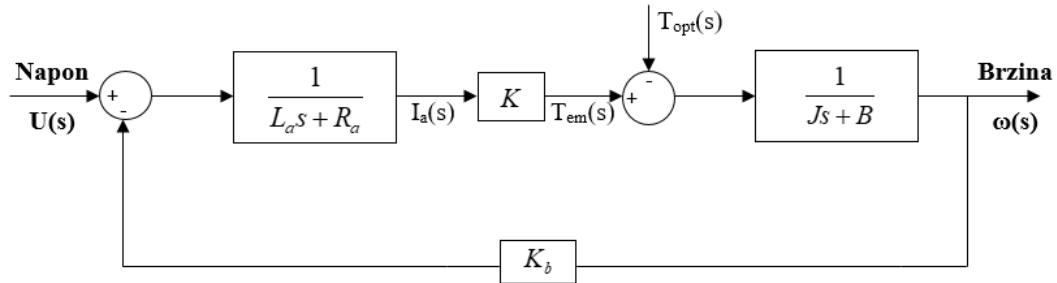
podbačaja  $t_{\Pi}$  se definiše kao vrijeme koje protekne od trenutka početka dejstva poremećaja ( $t_1$ ) do trenutka prigušenja poremećaja, odnosno trenutka kad brzina ponovo dostigne referentnu ili njoj blisku vrijednost. U cilju boljeg razumijevanja prethodno navedenog, u nastavku je data slika 4.5 na kojoj su predstavljene pomenute veličine.



Slika 4.5: Podbačaj ( $\Pi_{\Pi}$ ) i vrijeme smirenja podbačaja ( $t_{\Pi}$ )

#### 4.1. Simulacioni rezultati neregulisanog pogona

Na slici 4.1.1 predstavljen je neregulisani pogon (MJSS bez regulacionog sistema).



Slika 4.1.1: Neregulisani pogon (MJSS)

Prenosna matrica sistema sa slike 4.1.1 data je sljedećom relacijom:

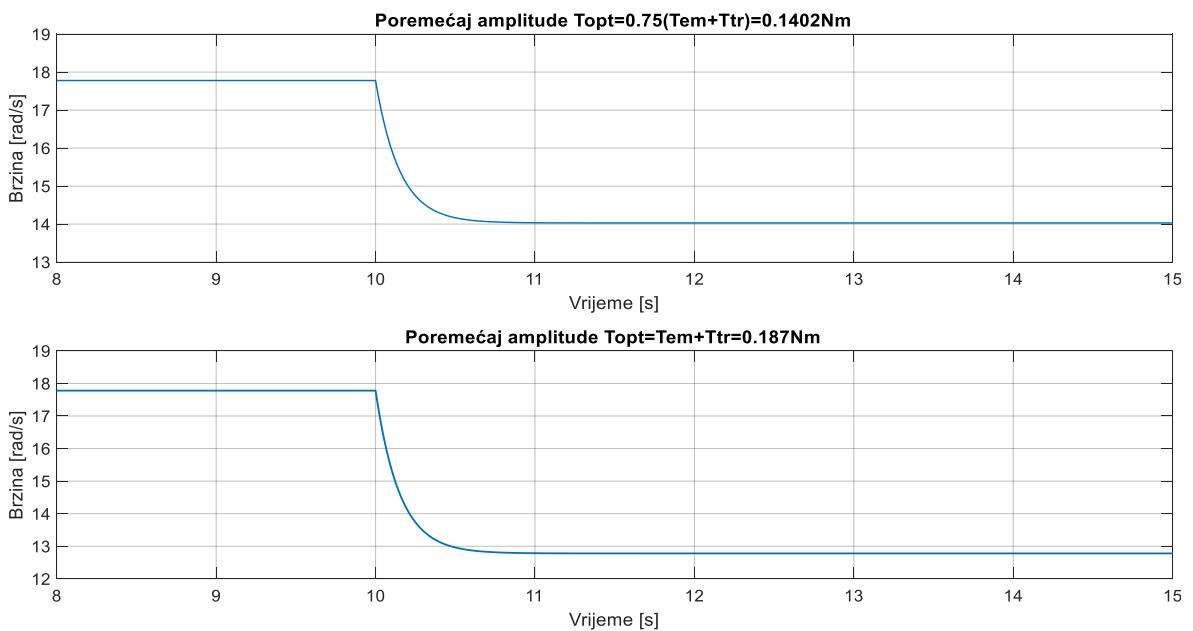
$$\omega(s) = [W_1(s) \quad W_2(s)] \begin{bmatrix} U(s) \\ T_{opt}(s) \end{bmatrix}, \quad (4.6)$$

gdje  $W_1(s)$  i  $W_2(s)$  za razmatrani slučaj neregulisanog pogona imaju sljedeći oblik:

$$W_1(s) = \frac{K}{L_a J s^2 + (L_a B + R_a J) s + R_a B + K K_b}, \quad (4.7)$$

$$W_2(s) = \frac{-(L_a s + R_a)}{L_a J s^2 + (L_a B + R_a J)s + R_a B + K K_b}. \quad (4.8)$$

Simulacija odziva brzine neregulisanog pogona je odrđena na način što je, pri već postignutoj nominalnoj brzini, u trenutku  $t=10\text{s}$  simuliran step poremećaj kojim se modeluje opterećenje. Ovdje se pod opterećenjem podrazumijeva zbir nominalnog momenta motora ( $T_{\text{em}}$ ) i momenta trenja ( $T_{\text{tr}}$ ) kojim se uzima u obzir otpor koji motor mora savladati kako bi pokrenuo opterećenje i održavao isto u kretanju. Amplituda ovog poremećaja je, u prvom slučaju, jednaka  $T_{\text{opt}}=0.75(T_{\text{em}}+T_{\text{tr}})=0.1402\text{Nm}$ , dok je u drugom slučaju amplituda poremećaja jednaka  $T_{\text{opt}}=T_{\text{em}}+T_{\text{tr}}=0.187\text{Nm}$ . Kako je u ovom radu od interesa onaj dio odziva brzine gdje se pojavljuje dejstvo poremećaja, u cilju bolje preglednosti rezultata uvećan je pomenuti dio grafika. Dobijeni grafici odziva brzine sistema na dejstvo step poremećaja prikazani su na slici 4.1.2.



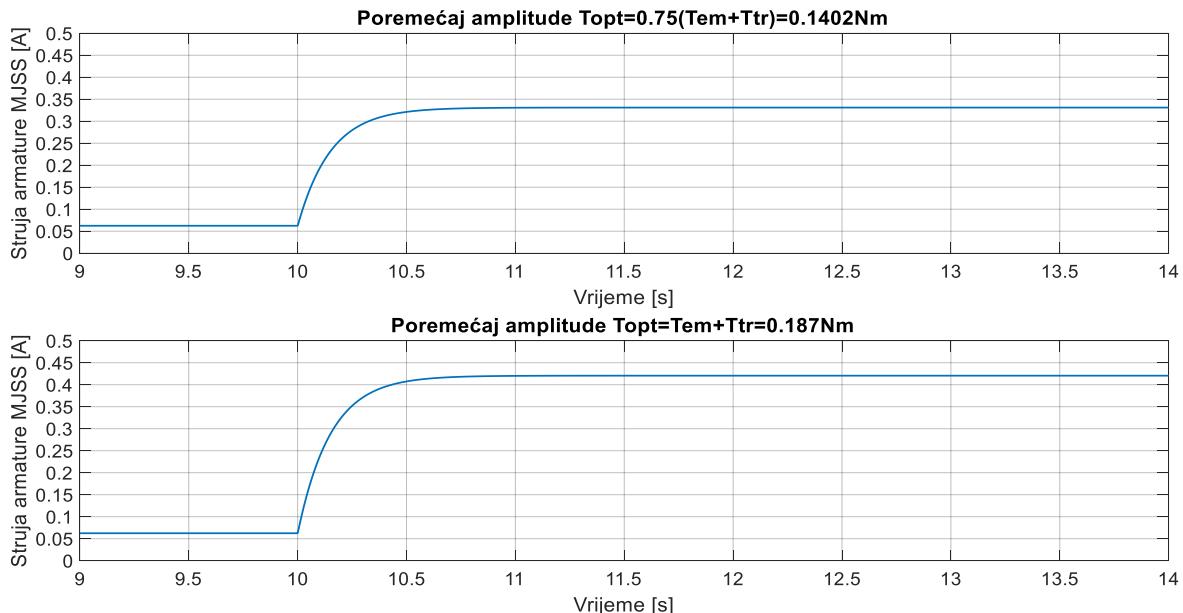
Slika 4.1.2: Step odzivi brzine neregulisanog pogona na dejstvo step poremećaja

Na osnovu predstavljenih rezultata može se zaključiti da podbačaj ( $\Pi_\Pi$ ) u prvom slučaju ( $T_{\text{opt}}=0.1402\text{Nm}$ ) ima vrijednost 3.7510 rad/s, odnosno da se pri datom opterećenju brzina smanji za 3.7510 rad/s, odnosno za 21.0730% vrijednosti nominalne brzine (17.8 rad/s). U drugom slučaju ( $T_{\text{opt}}=0.187\text{Nm}$ ), podbačaj iznosi 5.0005 rad/s, odnosno procentualni podbačaj je 28.0927%. Za oba predstavljena slučaja vrijeme smirenja podbačaja ( $t_\Pi$ ) praktično je beskonačno, tj. brzina motora se neće vratiti na referentnu vrijednost, što je očekivano obzirom na odsustvo regulacionog sistema u pogonu.

Treba imati u vidu da pod uticajem opterećenja u neregulisanom pogonu dolazi do trajnog pada brzine MJSS uslijed odsustva reakcije motora na promjene opterećenja. Takođe MJSS u

neregulisanom pogonu sporije reaguje na promjene uslova rada. Uvođenjem regulatora u pogon moguće je prevazići navedene nedostatke, tj. postići stabilnost sistema i precizno upravljanje brzinom MJSS.

Prilikom analize pogona sa MJSS pod opterećenjem potrebno je uzeti u obzir i struju armature ( $I_a$ ) koja protiče kroz armaturu motora i pruža ključne informacije o radu i performansama motora. Na slici 4.1.3 predstavljeni su grafici struja armature motora za oba razmatrana slučaja.



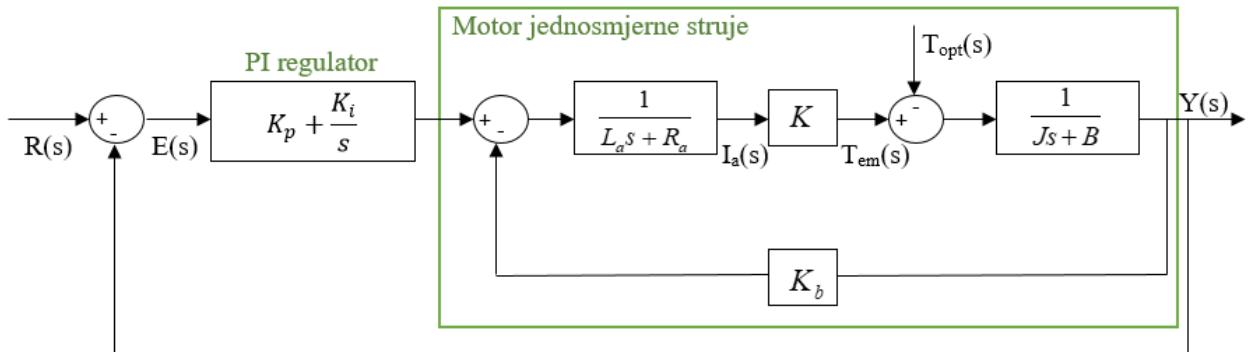
Slika 4.1.3: Struje armature neregulisanog pogona

Kada je u pitanju struja armature, sa dobijenih grafika se može zaključiti da je struja koja protiče kroz namotaje neopterećenog motora jednaka 0.0624A, dok je za slučaj opterećenog motora jednaka 0.3311A (za  $T_{opt}=0.1402\text{Nm}$ ), odnosno 0.4206A (za  $T_{opt}=0.187\text{Nm}$ ). U trenutku  $t=10\text{s}$ , dejstvo poremećaja kojim se modeluje opterećenje propraćeno je skokom struje armature MJSS. Povećanje opterećenja motora dovodi do povećanja struje armature kako bi se održala određena brzina obrtanja motora. Analizom struje motora određuje se koliko je motor opterećen, što je bitan pokazatelj prilikom formiranja upravljačkog algoritma u regulisanim pogonima, a sve u cilju održavanja stabilnosti brzine, sigurnosti rada i izbjegavanja preopterećenosti pogona. U analiziranom neregulisanom pogonu, za slučaj opterećenja  $T_{opt}=0.187\text{Nm}$ , struja armature MJSS (0.4206A) ima vrijednost neznatno manju od vrijednosti nominalne struje MJSS (0.4300A).

Na osnovu svega navedenog može se zaključiti da struja armature opterećenog neregulisanog pogona ima vrijednost blisku nominalnoj struci, dok pad brzine uslijed opterećivanja MJSS ima značajnu vrijednost, a pritom je i trajan.

## 4.2. Estimacija parametara PI regulatora

Na slici 4.2.1 predstavljen je regulisani pogon sa PI regulatorom.



Slika 4.2.1: Blok dijagram pogona sa PI regulatorom

Prenosna matrica sistema sa slike 4.2.1 data je sljedećom relacijom:

$$Y(s) = [G_{1-PI}(s) \quad G_{2-PI}(s)] \begin{bmatrix} R(s) \\ T_{opt}(s) \end{bmatrix}, \quad (4.9)$$

gdje  $G_{1-PI}(s)$  i  $G_{2-PI}(s)$  za razmatrani pogon sa PI regulatorom imaju sljedeći oblik:

$$G_{1-PI}(s) = \frac{KK_p s + KK_i}{L_a J s^3 + (L_a B + R_a J) s^2 + (R_a B + KK_p + KK_b) s + KK_i}, \quad (4.10)$$

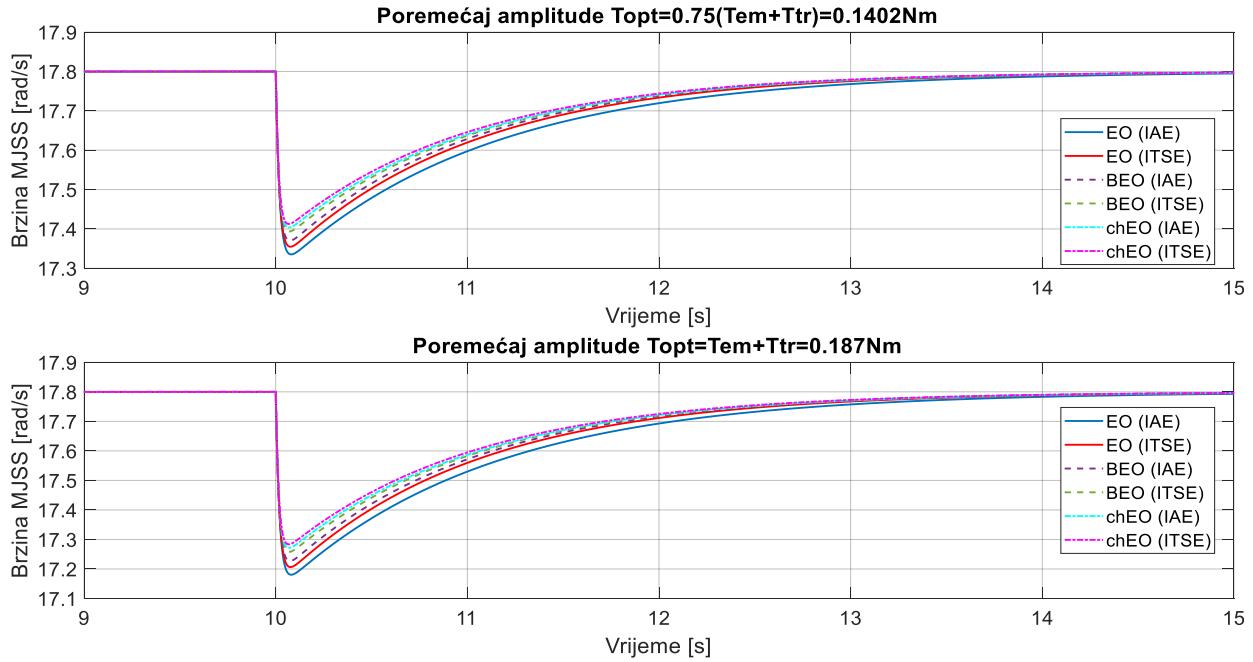
$$G_{2-PI}(s) = \frac{-L_a s^2 - R_a s}{L_a J s^3 + (L_a B + R_a J) s^2 + (R_a B + KK_p + KK_b) s + KK_i}. \quad (4.11)$$

Različitim kombinacijama EO algoritma i njegovih modifikacija (BEO i ChEO) sa kriterijumskim funkcijama IAE i ITSE izvršena je estimacija parametara PI regulatora. Grafici odziva brzine pogona sa PI regulatorom na step poremećaj (u trenutku  $t=10s$ ) kojim se modeluje opterećenje, za dva slučaja različitog opterećenja, dati su na slici 4.2.2. Parametri PI regulatora dobijeni algoritamskom pretragom, primijenjene kriterijumske funkcije i njihove vrijednosti, kao i parametri u odnosu na koje se vrši komparacija dobijenih setova parametara – podbačaj ( $\Pi$  i  $\Pi_{\Pi\%}$ ) i vrijeme smirenja podbačaja ( $t_{\Pi0.05\%}$ <sup>1</sup>,  $t_{\Pi1\%}$ <sup>2</sup> i  $t_{\Pi1.5\%}$ <sup>3</sup>) predstavljeni su u Tabelama 4.3 i 4.4.

<sup>1</sup> Vrijeme koje protekne od trenutka dejstva step poremećaja (pada vrijednosti brzine) do trenutka kad odziv postigne 99.95% vrijednosti referentne brzine

<sup>2</sup> Vrijeme koje protekne od trenutka dejstva step poremećaja (pada vrijednosti brzine) do trenutka kad odziv postigne 99% vrijednosti referentne brzine

<sup>3</sup> Vrijeme koje protekne od trenutka dejstva step poremećaja (pada vrijednosti brzine) do trenutka kad odziv postigne 98.5% vrijednosti referentne brzine



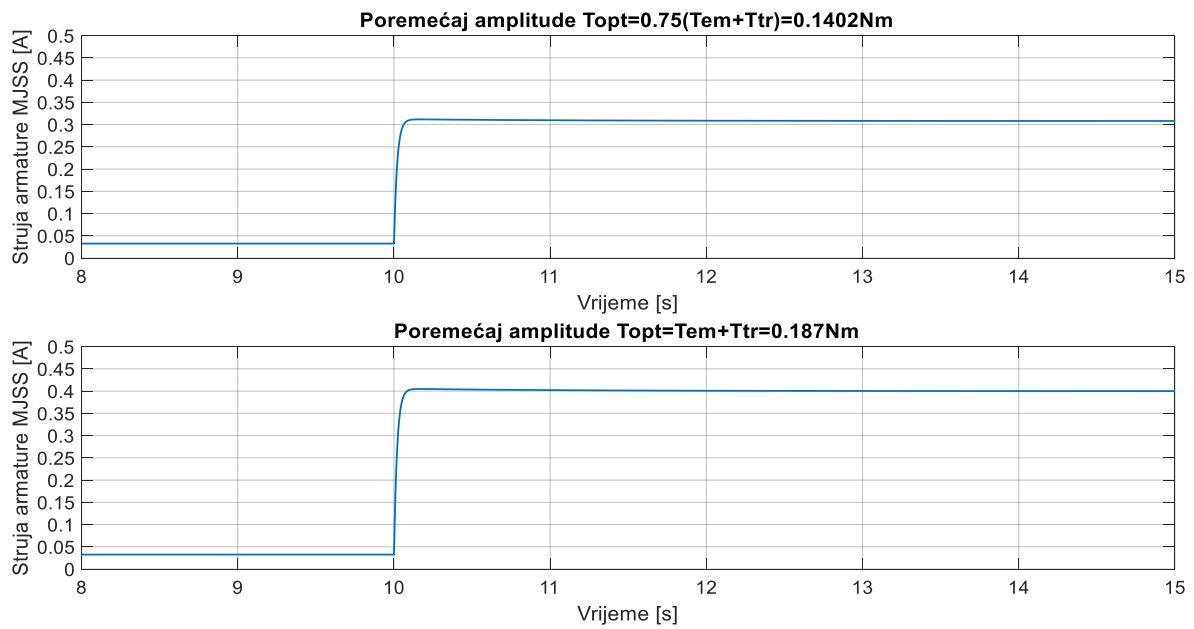
Slika 4.2.2: Step odzivi brzine pogona sa PI regulatorom na dejstvo step poremećaja

Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti sljedeće:

- Simulacije su odrađene za dvije vrijednosti opterećenja: 0.1402Nm i 0.187Nm. Parametri regulatora su estimirani pri većoj vrijednosti opterećenja i naknadno su testirani za manju vrijednost opterećenja u cilju analize reakcije regulatora na promjene uslova rada. Pritom su, u tabelama gdje su izloženi rezultati, date vrijednosti podbačaja i vremena smirenja podbačaja za oba slučaja vrijednosti opterećenja. Za manju vrijednost opterećenja (0.1402Nm) dato je vrijeme smirenja podbačaja  $t_{\Pi1\%}$ , dok su za veću vrijednost opterećenja određena  $t_{\Pi0.05\%}$  i  $t_{\Pi1.5\%}$  u cilju detaljnijeg sagledavanja koliko brzo brzina ponovo „raste“ ka referentnoj vrijednosti. Za obje razmatrane vrijednosti opterećenja rad pogona je stabilan, sa veoma sličnim graficima odziva, koji se razlikuju u vrijednostima podbačaja i vremena smirenja podbačaja. Na osnovu navedenog, kao i na osnovu grafika sa slike 4.2.2 može se uvidjeti da zaključci izvedeni za rezultate dobijene pri  $T_{\text{opt}}=0.187\text{Nm}$  važe u identičnom obliku i za slučaj manjeg opterećenja. Time je opravданo akcenat komentarisanja rezultata staviti na podbačaju  $\Pi_{\Pi}$  i vremenu smirenja podbačaja  $t_{\Pi0.05\%}$  za  $T_{\text{opt}}=0.187\text{Nm}$ , a sve u cilju pojednostavljenja analize rezultata. Navedeno važi i za ostale obrađene regulatore u ovom radu.
- Bolje rezultate prilikom pretrage parametara regulatora dala je ITSE u odnosu na IAE kriterijumsku funkciju za slučaj svih korišćenih algoritama. Najbolji rezultat u odnosu na vrijednost kriterijumske funkcije dao je set parametara estimiran kombinacijom ChEO (ITSE) i on iznosi 2.1635.

- Kada je riječ o podbačaju, ChEO algoritam je dao najbolje rezultate. Isto tako, BEO algoritam dao je bolje rezultate u odnosu na EO algoritam. Najveći podbačaj za  $T_{opt}=0.187\text{Nm}$  je u slučaju EO (IAE) i iznosi  $0.6195\text{rad/s}$  (3.4804%), dok je najmanji podbačaj ostvaren realizacijom ChEO (ITSE) i iznosi  $0.5165\text{rad/s}$  (2.9018%). Za slučaj kada je  $T_{opt}=0.1402\text{Nm}$  pomenute realizacije imaju vrijednosti  $0.4647\text{rad/s}$  (2.6105%) i  $0.3874$  (2.1764%), respektivno (25% manje u odnosu na slučaj za veće  $T_{opt}$ ). Bitno je naglasiti da je primjenom PI regulatora podbačaj smanjen gotovo 10 puta u odnosu na neregulisani pogon.
- Najbolje rezultate u pogledu vremena smirenja podbačaja ( $t_{II0.05\%}$ ) dao je ChEO algoritam. BEO opet daje bolje rezultate u odnosu na EO algoritam, mada treba primijetiti da za obje kriterijumske funkcije BEO i ChEO algoritam daju slične vrijednosti vremena smirenja podbačaja. Za slučaj  $T_{opt}=0.187\text{Nm}$ , najlošiji rezultat za  $t_{II0.05\%}$  dala je realizacija EO (IAE) i iznosi  $4.5709\text{s}$ , dok je najbolji u slučaju ChEO (ITSE) i iznosi  $3.9963\text{s}$ . Vrijednosti  $t_{II1.5\%}$  za dva navedena slučaja su  $1.0123\text{s}$  i  $0.7389\text{s}$ , respektivno. Za  $T_{opt}=0.1402\text{Nm}$ , pri pomenutim kombinacijama algoritama i kriterijumskih funkcija, vrijednosti  $t_{II0.05\%}$  su  $4.2593\text{s}$  i  $3.7111\text{s}$ , respektivno, odnosno za po približno 7% manje od tih vrijednosti u slučaju veće vrijednosti  $T_{opt}$ . Ključna prednost implementacije PI regulatora u pogon jeste postizanje bolje reakcije pogona na promjene opterećenja u poređenju sa neregulisanim pogonom, odnosno prihvatljiva vrijednost vremena smirenja podbačaja u odnosu na trajni pad brzine kod opterećenog neregulisanog pogona.
- Imajući sve navedeno u vidu, može se zaključiti da PI regulator omogućava stabilno i precizno upravljanje brzinom pogona sa MJSS, uz efikasnu reakciju pogona na zahtjev za promjenom radnih uslova.

Struje armature pogona sa PI regulatorom, za različite vrijednosti opterećenja, predstavljene su na slici 4.2.3. Prikazane su struje samo za realizaciju EO (IAE), obzirom na identične rezultate koji se dobijaju u svim ostalim slučajevima. Sa dobijenih grafika se može zaključiti da struja armature pogona sa PI regulatorom za slučaj neopterećenog pogona ima vrijednost  $0.0327\text{A}$ , dok za opterećeni pogon ima vrijednost  $0.3081\text{A}$  (za  $T_{opt}=0.1402\text{Nm}$ ), odnosno  $0.3999\text{A}$  (za  $T_{opt}=0.187\text{Nm}$ ). Takođe, jasno je da prisustvo regulatora u pogonu omogućava mnogo bržu reakciju, odnosno promjenu vrijednosti struje armature, što se može uočiti na graficima sa slike 4.2.3.



Slika 4.2.3: Struje armature pogona sa PI regulatorom

Pregled svih dobijenih rezultata za pogon sa PI regulatorom, za dva slučaja vrijednosti opterećenja, predstavljen je u Tabelama 4.3 i 4.4.

Tabela 4.3: Pregled rezultata pogona sa PI regulatorom ( $T_{\text{opt}}=0.187\text{Nm}$ )

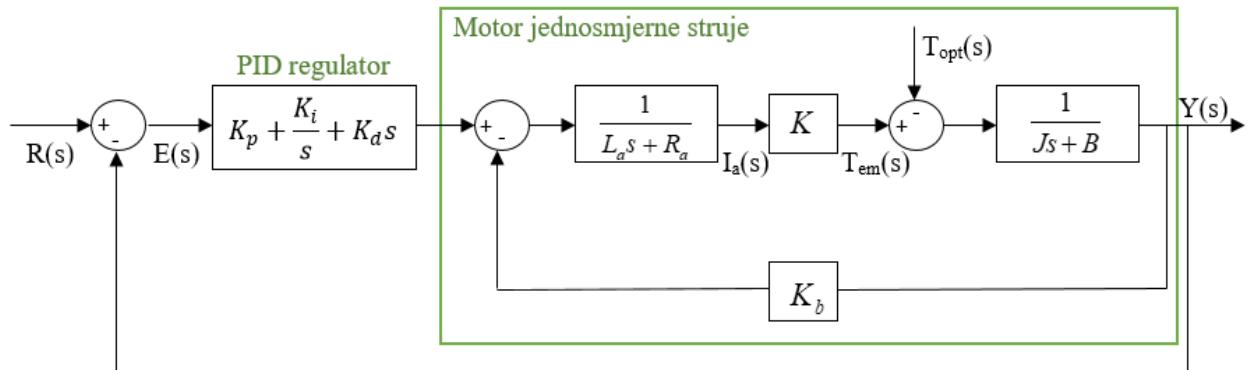
Algoritam	Kriterijumska funkcija	Vrijednost kriterijumske funkcije	Parametri PI regulatora		Podbačaj		Vrijeme smirenja podbačaja	
			K <sub>p</sub>	K <sub>i</sub>	$\Pi_{\text{p}} \text{ [rad/s]}$	$\Pi_{\text{p}\%} \text{ [%]}$	$t_{\Pi0.05\%} \text{ [s]}$	$t_{\Pi1.5\%} \text{ [s]}$
EO	IAE	3.2966	3.4618	3.6098	0.6195	3.4804	4.5709	1.0123
	ITSE	3.1451	3.6292	4.0687	0.5936	3.3346	4.1828	0.8953
BEO	IAE	2.7790	3.7802	4.2822	0.5732	3.2203	4.0844	0.8459
	ITSE	2.5786	4.0420	4.4968	0.5419	3.0443	4.0699	0.7941
ChEO (Gauss mapa)	IAE	2.5948	4.1674	4.5861	0.5281	2.9670	4.0774	0.7721
	ITSE	2.3118	4.2745	4.7561	0.5165	2.9018	3.9963	0.7389

Tabela 4.4: Pregled rezultata pogona sa PI regulatorom ( $T_{\text{opt}}=0.1402\text{Nm}$ )

Algoritam	Kriterijumska funkcija	Podbačaj		Vrijeme smirenja podbačaja	
		$\Pi_{\text{p}} \text{ [rad/s]}$	$\Pi_{\text{p}\%} \text{ [%]}$	$t_{\Pi0.05\%} \text{ [s]}$	$t_{\Pi1\%} \text{ [s]}$
EO	IAE	0.4647	2.6105	4.2593	1.1400
	ITSE	0.4452	2.5011	3.8949	1.0132
BEO	IAE	0.4299	2.4154	3.8008	0.9621
	ITSE	0.4064	2.2833	3.7831	0.9116
ChEO (Gauss mapa)	IAE	0.3961	2.2254	3.7852	0.8905
	ITSE	0.3874	2.1764	3.7111	0.8557

### 4.3. Estimacija parametara PID regulatora

Na slici 4.3.1 predstavljen je regulisani pogon sa PID regulatorom.



Slika 4.3.1: Blok dijagram pogona sa PID regulatorom

Prenosna matrica sistema sa slike 4.3.1 data je sljedećom relacijom:

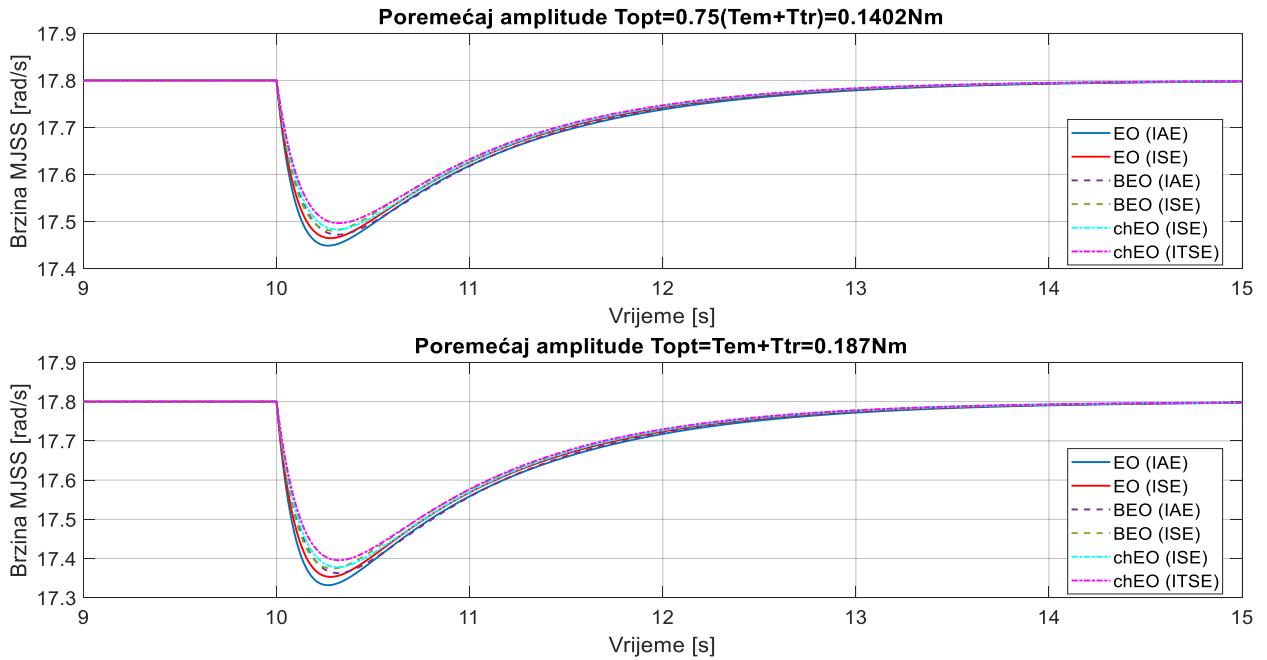
$$Y(s) = \begin{bmatrix} G_{1-PID}(s) & G_{2-PID}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R(s) \\ T_{opt}(s) \end{bmatrix}, \quad (4.12)$$

gdje  $G_{1-PID}(s)$  i  $G_{2-PID}(s)$  za razmatrani pogon sa PID regulatorom imaju sljedeći oblik:

$$G_{1-PID}(s) = \frac{KK_d s^2 + KK_p s + KK_i}{L_a J s^3 + (L_a B + R_a J + KK_d) s^2 + (R_a B + KK_p + KK_b) s + KK_i}, \quad (4.13)$$

$$G_{2-PID}(s) = \frac{-L_a s^2 - R_a s}{L_a J s^3 + (L_a B + R_a J + K K_d) s^2 + (R_a B + K K_p + K K_b) s + K K_i}. \quad (4.14)$$

Za potrebe estimacije parametara PID regulatora primijenjene su kombinacije prethodno predstavljene tri varijacije EO algoritma sa IAE, ISE i ITSE kriterijumskim funkcijama. Grafici odziva brzine pogona sa PID regulatorom na step poremećaj (u trenutku  $t=10\text{s}$ ), kojim se modeluje opterećenje, za dva slučaja različitog opterećenja, dati su na slici 4.3.2. Parametri PID regulatora dobijeni algoritamskom pretragom, kao i pregled svih ostalih rezultata koji se odnose na estimirane setove parametara predstavljeni su u Tabelama 4.5 i 4.6.



Slika 4.3.2: Step odzivi brzine pogona sa PID regulatorom na dejstvo step poremećaja

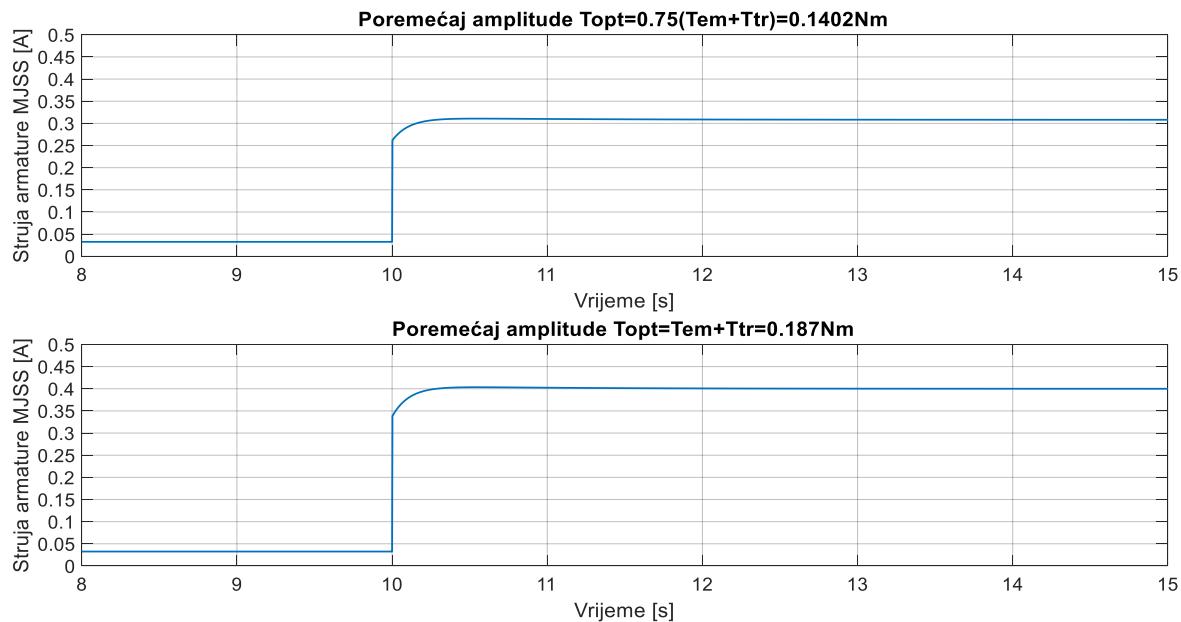
Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti sljedeće:

- Bolje rezultate prilikom pretrage parametara regulatora dala je primjena ISE u odnosu na primjenu IAE kriterijumske funkcije (kod EO i BEO algoritma), dok je kod ChEO algoritma bolji rezultat dala primjena ITSE kriterijumske funkcije. Najbolje rezultate u odnosu na vrijednosti kriterijumskih funkcija ostvarila je primjena ChEO algoritma (ISE=2.1931 i ITSE=2.1635).
- Najbolje rezultate po pitanju podbačaja dao je ChEO algoritam, dok je BEO algoritam opet dao bolje vrijednosti od izvornog EO algoritma. Najveći podbačaj za  $T_{opt}=0.187\text{Nm}$  je u slučaju EO (IAE) i iznosi 0.4680rad/s (2.6293%), dok je najmanji podbačaj ostvaren realizacijom ChEO (ITSE) i iznosi 0.4044rad/s (2.2717%). Vrijednosti podbačaja za  $T_{opt}=0.1402\text{Nm}$  su očekivano manje za 25% u odnosu na slučaj punog opterećenja. Najveći podbačaj dobijen u pogonu sa PID regulatorom manji je od najmanjeg podbačaja dobijenog u pogonu sa PI regulatorom, što dovoljno govori o razlici u efikasnosti pomenuta dva regulatora.
- Najbolji rezultati u pogledu vremena smirenja podbačaja ( $t_{II0.05\%}$ ) ostvareni su kombinacijom ChEO (ITSE) (3.6830s za  $T_{opt}=0.187\text{Nm}$ ), pri čemu treba primijetiti da između rezultata dobijenih različitim algoritmima nema drastične razlike u pogledu vremena smirenja podbačaja. Najduže  $t_{II0.05\%}$  dobijeno je primjenom realizacije EO (IAE) (3.9629s za  $T_{opt}=0.187\text{Nm}$ ). Vrijednosti  $t_{II1.5\%}$  za dvije navedene realizacije iznose 0.9053s i 0.8402s,

respektivno. Generalno, u odnosu na vrijeme smirenja podbačaja, PID daje bolje rezultate u odnosu na PI regulator.

- Poređenjem odziva brzine na step poremećaj za pogon sa PI i PID regulatorom može se primijetiti da su odzivi u slučaju PID regulatora manje strmi, tj. PID regulator se postepeno prilagođava promjenama i ima više „glatke“ prelaze pri promjeni brzine, što se može pripisati prisustvu diferencijalnog člana regulatora. Nasuprot navedenom, kod pogona sa PI regulatorom su promjene oštire, što dovodi do naglijih promjena brzine MJSS. Navedeno čini PID efikasnijim i preciznijim u održavanju brzine MJSS u odnosu na primjenu PI regulatora.

Struje armature pogona sa PID regulatorom, za različite vrijednosti opterećenja, predstavljene su na slici 4.3.3. Prikazane su struje samo za realizaciju EO (IAE), obzirom na identične rezultate koji se dobijaju u svim ostalim slučajevima.



Slika 4.3.3: Struje armature pogona sa PID regulatorom

Što se tiče vrijednosti struja armature pogona sa PID regulatorom, one su iste kao i kod pogona sa PI regulatorom. Osnovna razlika jeste u tome što kod pogona sa PID regulatorom struja brže raste kada se motor optereti, što je rezultat dodatnog diferencijalnog člana u PID regulatoru, koji istom omogućava bržu reakciju na promjenu opterećenja. Iako oba regulatora imaju dobre rezultate kada je održavanje stabilnosti struje armature MJSS u pitanju, PID regulatoru se daje prednost kada je od interesa brže prilagođavanje promjenama opterećenja.

Pregled svih dobijenih rezultata za pogon sa PID regulatorom, za dva slučaja vrijednosti opterećenja, predstavljen je u Tabelama 4.5 i 4.6.

Tabela 4.5: Pregled rezultata pogona sa PID regulatorom ( $T_{\text{opt}}=0.187\text{Nm}$ )

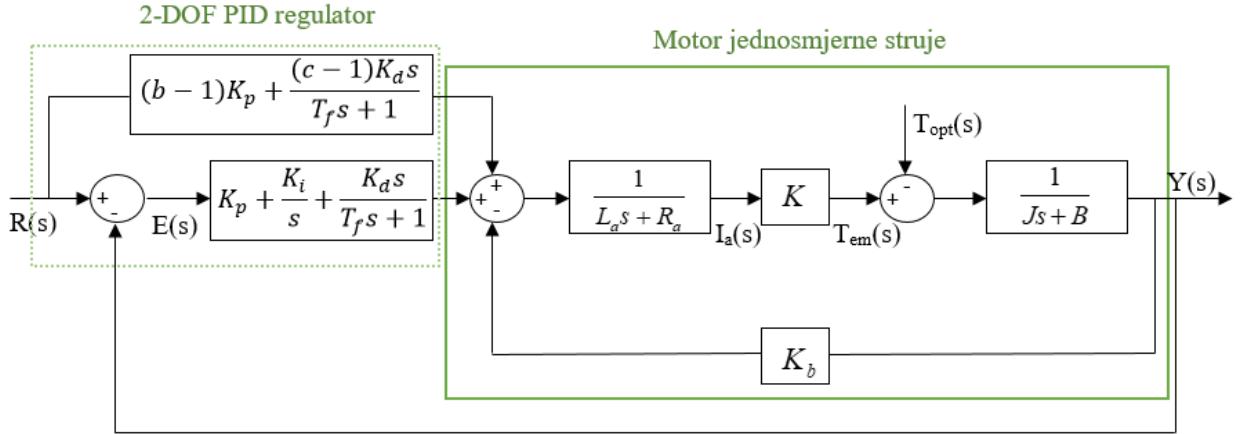
Algoritam	Kriterijumska funkcija	Vrijednost kriterijumske funkcije	Parametri PID regulatora			Podbačaj		Vrijeme smirenja podbačaja	
			Kp	Ki	Kd				
			$\Pi_{\Pi} [\text{rad/s}]$	$\Pi_{\Pi\%} [\%]$	$t_{\Pi0.05\%} [\text{s}]$	$t_{\Pi1.5\%} [\text{s}]$			
EO	IAE	2.6462	4.1596	4.4974	0.3825	0.4680	2.6293	3.9629	0.9053
	ISE	2.4298	4.3292	4.7541	0.4372	0.4469	2.5105	3.8277	0.8707
BEO	IAE	2.5355	4.3470	4.6938	0.5385	0.4370	2.4549	3.8391	0.9125
	ISE	2.2166	4.5508	4.9457	0.4860	0.4254	2.3897	3.7960	0.8416
ChEO (Iterative mapa)	ISE	2.1931	4.5074	4.9543	0.5571	0.4221	2.3711	3.7225	0.8678
	ITSE	2.1635	4.7075	5.1448	0.6041	0.4044	2.2717	3.6830	0.8402

Tabela 4.6: Pregled rezultata pogona sa PID regulatorom ( $T_{\text{opt}}=0.1402\text{Nm}$ )

Algoritam	Kriterijumska funkcija	Podbačaj		Vrijeme smirenja podbačaja	
		$\Pi_{\Pi} [\text{rad/s}]$	$\Pi_{\Pi\%} [\%]$	$t_{\Pi0.05\%} [\text{s}]$	$t_{\Pi1\%} [\text{s}]$
EO	IAE	0.3510	1.9720	3.6952	1.0153
	ISE	0.3352	1.8829	3.5689	0.9776
BEO	IAE	0.3277	1.8412	3.5832	1.0196
	ISE	0.3190	1.7923	3.5376	0.9490
ChEO (Iterative mapa)	ISE	0.3165	1.7784	3.4731	0.9729
	ITSE	0.3033	1.7038	3.4349	0.9460

#### 4.4. Estimacija parametara 2-DOF PID regulatora

Na slici 4.4.1 predstavljen je regulisani pogon sa 2-DOF PID regulatorom.



Slika 4.4.1: Blok dijagram pogona sa 2-DOF PID regulatorom

Prenosna matrica sistema sa slike 4.4.1 data sljedećom relacijom:

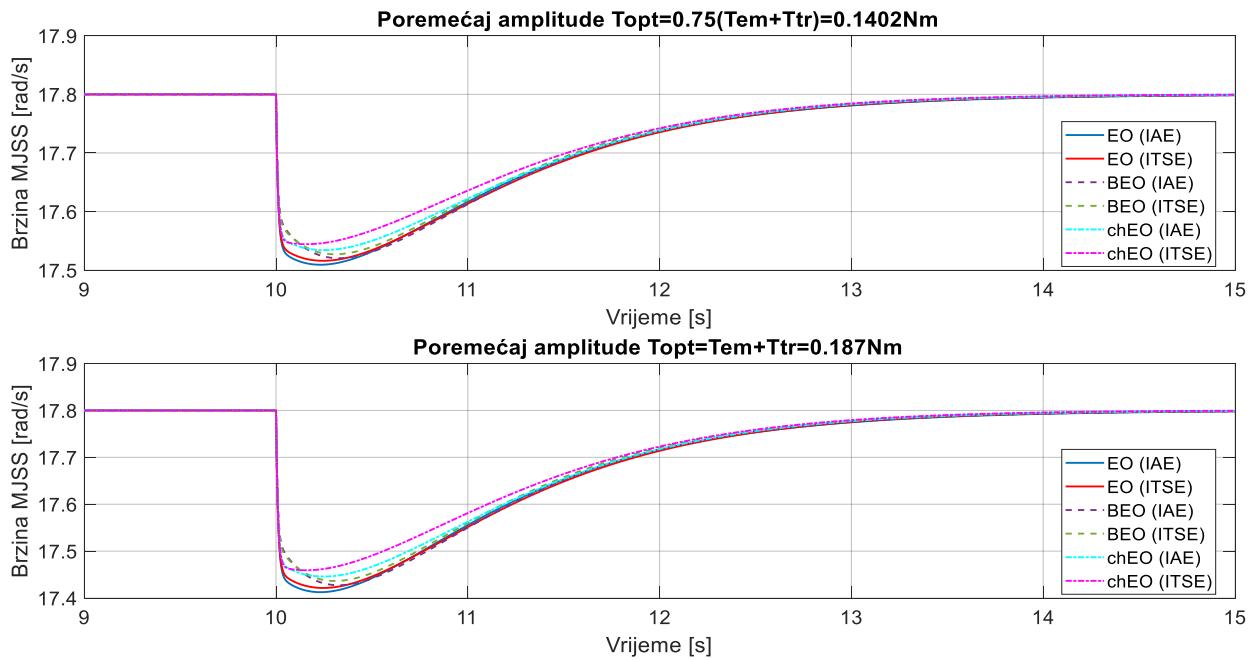
$$Y(s) = \begin{bmatrix} G_{1-2DOFPID}(s) & G_{2-2DOFPID}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R(s) \\ T_{opt}(s) \end{bmatrix}, \quad (4.15)$$

gdje  $G_{1-2DOFPID}(s)$  i  $G_{2-2DOFPID}(s)$  za razmatrani pogon sa 2-DOF PID regulatorom imaju sljedeći oblik:

$$G_{1-2DOFPID}(s) = \frac{K_c \frac{K_d}{T_f s + 1} s^2 + KK_p(b+1)s + KK_i}{L_a J s^3 + (L_a B + R_a J + \frac{K_d}{T_f s + 1}) s^2 + (R_a B + KK_p + KK_b)s + KK_i}, \quad (4.16)$$

$$G_{2-2DOFPID}(s) = \frac{-L_a s^2 - R_a s}{L_a J s^3 + (L_a B + R_a J + \frac{K_d}{T_f s + 1}) s^2 + (R_a B + KK_p + KK_b)s + KK_i}. \quad (4.17)$$

Prilikom estimacije parametara 2-DOF PID regulatora primijenjene su kombinacije EO algoritma i njegovih modifikacija (BEO i ChEO) sa IAE i ITSE kriterijumskim funkcijama. Grafici odziva brzine pogona sa 2-DOF PID regulatorom na step poremećaj (u trenutku  $t=10s$ ) kojim se modeluje opterećenje, za dva slučaja različitog opterećenja, dati su na slici 4.4.2. Estimirani parametri 2-DOF PID regulatora, kao i pregled ostalih rezultata koji se odnose na dobijene setove parametara predstavljeni su u Tabelama 4.7 i 4.8.



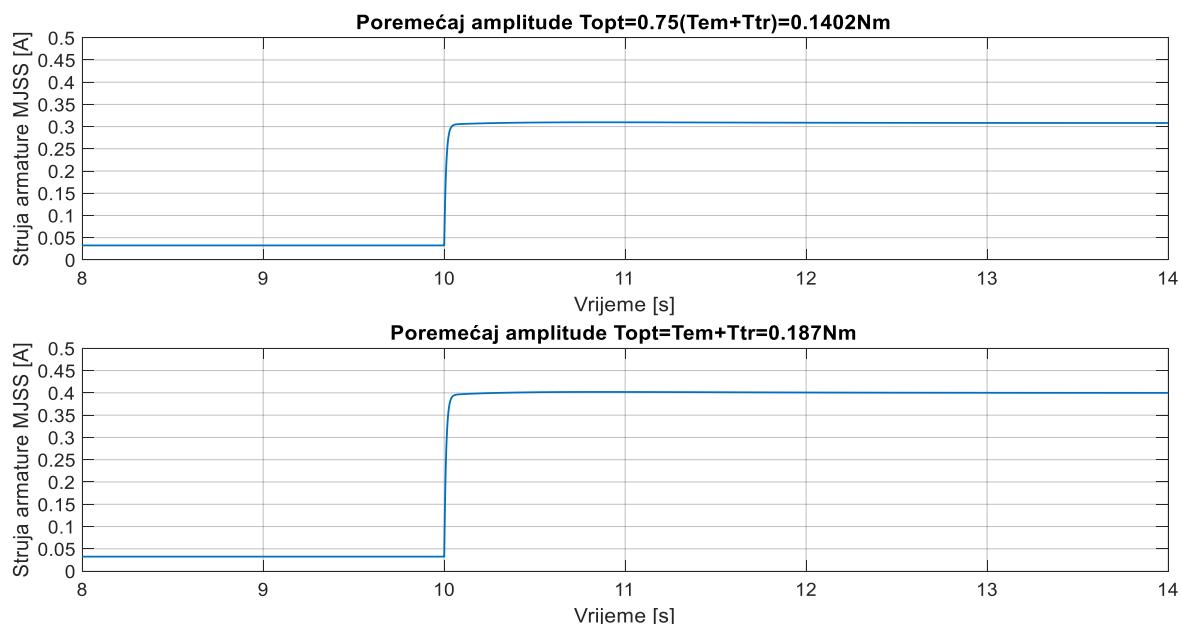
Slika 4.4.2: Step odzivi brzine pogona sa 2-DOF PID regulatorom na dejstvo step poremećaja

Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti sljedeće:

- Bolje rezultate prilikom pretrage parametara regulatora dala je ITSE u odnosu na IAE kriterijumsku funkciju. Najbolji rezultat u odnosu na vrijednost kriterijumske funkcije dao je set parametara estimiran primjenom ChEO algoritma, uz ITSE, i iznosi 2.9868.
- Kada je riječ o podbačaju, najveća vrijednost podbačaja je dobijena primjenom EO (IAE) i iznosi 0.3876 rad/s (za  $T_{opt}=0.187\text{Nm}$ ), što je opet manje od najboljeg rezultata koji je postignut pomoću PID regulatora. Najbolji rezultati za 2-DOF PID regulator, odnosno najmanje vrijednosti podbačaja postignute su primjenom ChEO algoritma. Realizacija ChEO (ITSE) ostvarila je podbačaj od 0.3408 rad/s (1.9148%) pri  $T_{opt}=0.187\text{Nm}$ . Regulator je imao stabilne reakcije na pad brzine za obje vrijednosti opterećenja, imajući u vidu da su padovi pri manjem opterećenju ( $T_{opt}=0.1402\text{Nm}$ ) bili manji za 25% u odnosu na puno opterećenje ( $T_{opt}=0.187\text{Nm}$ ).
- 2-DOF PID regulator je očekivano dao bolje rezultate sa aspekta vremena smirenja podbačaja ( $t_{II0.05\%}$ ) u odnosu na primjenu PI i PID regulatora. Generalno, nema značajnijih međusobnih razlika u vrijednostima  $t_{II0.05\%}$  za različite realizacije dobijene istim algoritmom kod 2-DOF PID regulatora. Najbolji rezultat dala je realizacija ChEO (ITSE) i njegova vrijednost je  $t_{II0.05\%}=3.4847\text{s}$ , dok je kod realizacije EO (IAE) trebalo da protekne najviše vremena do ponovne stabilizacije brzine (3.7518 s). Vrijednosti  $t_{II1.5\%}$  za dvije pomenute realizacije su 0.7446 s i 0.9021 s, respektivno. Vremena smirenja podbačaja su za manju vrijednost podbačaja srazmjerno manja u odnosu na slučajeve gdje je primijenjeno puno opterećenje motora.

- Na prethodnim graficima se može primijetiti da odziv brzine ima strmiji pad nakon dejstva poremećaja, što je posljedica brze reakcije na poremećaj. U kasnijim fazama odziva se primjećuje postepen i kontrolisan porast brzine, što ukazuje na stabilnu i preciznu regulaciju. Za očekivati je da 2-DOF PID regulator ostvaruje bolje rezultate u odnosu na PI i PID regulator u pogledu podbačaja i vremena smirenja podbačaja obzirom na veću slobodu prilikom podešavanja regulatora koja je posljedica postojanja većeg broja podesivih parametara regulatora.

Struje armature pogona sa 2-DOF PID regulatorom, za različite vrijednosti opterećenja, predstavljene su na slici 4.4.3. Prikazane su samo struje dobijene realizacijom EO (IAE), obzirom na identične rezultate koji se dobijaju u svim ostalim slučajevima.



Slika 4.4.3: Struje armature pogona sa 2-DOF PID regulatorom

Vrijednosti struja armature za oba slučaja opterećenja kod pogona sa 2-DOF PID regulatorom iste su kao kod pogona sa dva prethodno opisana regulatora (PI i PID). Obzirom na slobodu prilagođavanja većeg broja parametara, pogon sa 2-DOF PID regulatorom očekivano preciznije prati promjene opterećenja sa aspekta struje armature MJSS.

Pregled svih dobijenih rezultata za pogon sa 2-DOF PID regulatorom, za dva slučaja vrijednosti opterećenja, predstavljen je u Tabelama 4.7 i 4.8.

Tabela 4.7: Pregled rezultata pogona sa 2-DOF PID regulatorom ( $T_{\text{opt}}=0.187\text{Nm}$ )

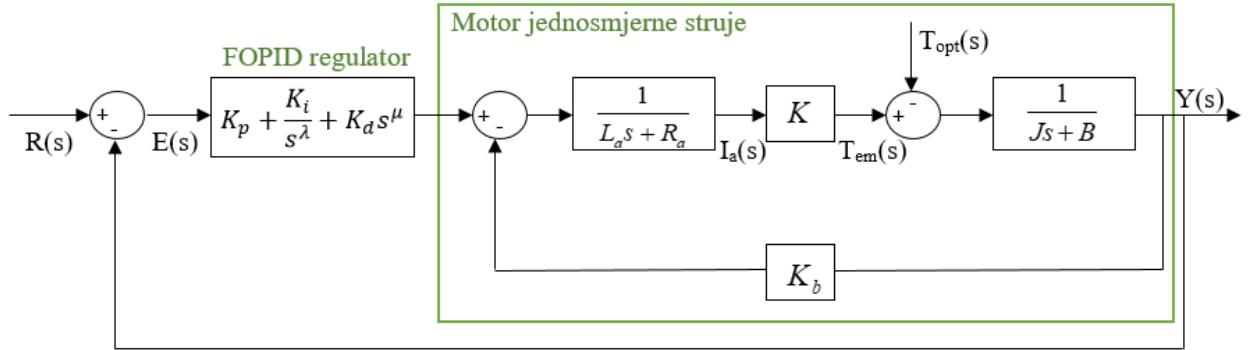
Algoritam	Kriterijumska funkcija	Vrijednost kriterijumske funkcije	Parametri 2-DOF PID regulatora						Podbačaj		Vrijeme smirenja podbačaja	
			K <sub>p</sub>	K <sub>i</sub>	K <sub>d</sub>	T <sub>f</sub>	b	c	Π <sub>Π</sub> [rad/s]	Π <sub>Π%</sub> [%]	t <sub>Π0.05%</sub> [s]	t <sub>Π1.5%</sub> [s]
EO	IAE	3.3371	4.2522	4.6751	0.5513	0.21463	0.95110	0.62008	0.3876	2.1773	3.7518	0.9021
	ITSE	3.0006	4.2458	4.6778	0.6595	0.23534	0.96410	0.63132	0.3786	2.1268	3.6875	0.9172
BEO	IAE	3.5392	4.3544	4.7507	0.6741	0.15970	0.93661	0.54102	0.3727	2.0939	3.6910	0.9272
	ITSE	3.6409	4.4671	4.9199	0.6697	0.17245	0.92204	0.45023	0.3637	2.0432	3.6359	0.8814
ChEO (Sine mapa)	IAE	3.3797	4.4786	4.9574	0.7633	0.25413	0.94122	0.51471	0.3542	1.9900	3.5747	0.8554
	ITSE	2.9868	4.7247	5.3051	0.8214	0.31814	0.94225	0.55964	0.3408	1.9148	3.4847	0.7446

Tabela 4.8: Pregled rezultata pogona sa 2-DOF PID regulatorom ( $T_{\text{opt}}=0.1402\text{Nm}$ )

Algoritam	Kriterijumska funkcija	Podbačaj		Vrijeme smirenja podbačaja	
		Π <sub>Π</sub> [rad/s]	Π <sub>Π%</sub> [%]	t <sub>Π0.05%</sub> [s]	t <sub>Π1.5%</sub> [s]
EO	IAE	0.2907	1.6330	3.5196	1.0318
	ITSE	0.2839	1.5951	3.4719	1.0519
BEO	IAE	0.2795	1.5704	3.4660	1.0549
	ITSE	0.2728	1.5324	3.4136	1.0116
ChEO (Sine mapa)	IAE	0.2657	1.4925	3.3751	0.9998
	ITSE	0.2556	1.4361	3.2965	0.9016

## 4.5. Estimacija parametara FOPID regulatora

Na slici 4.5.1 predstavljen je regulisani pogon sa FOPID regulatorom.



Slika 4.5.1: Blok dijagram pogona sa FOPID regulatorom

Prenosna matrica sistema sa slike 4.5.1 data je sljedećom relacijom:

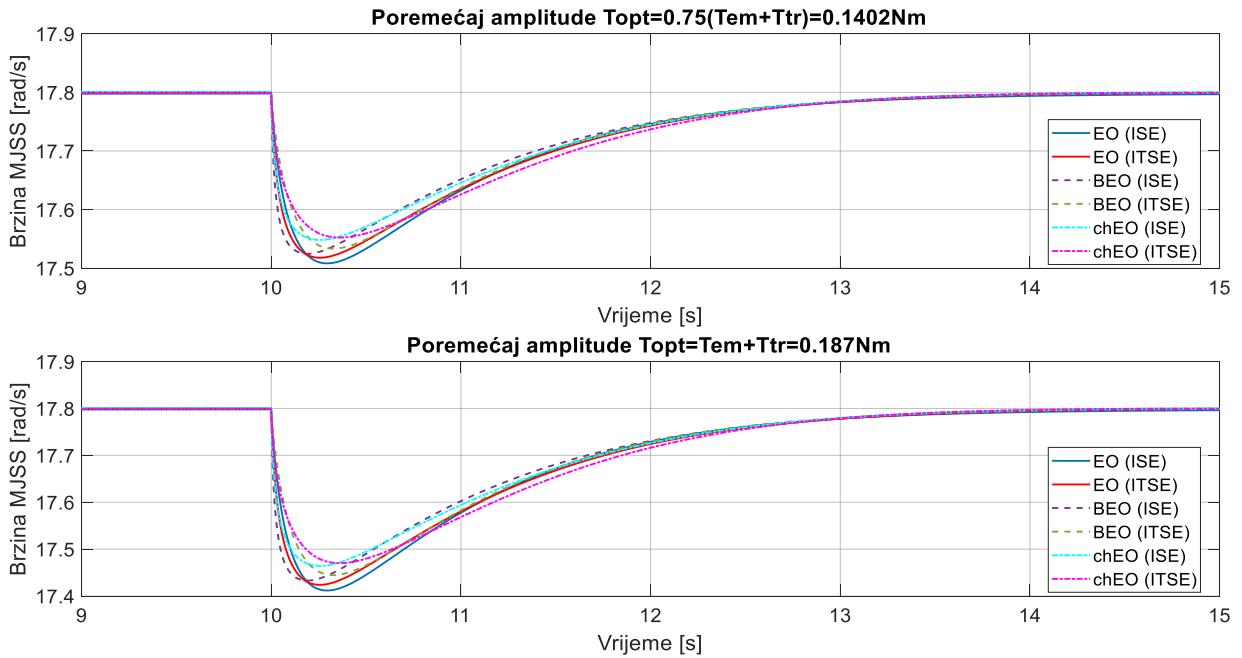
$$Y(s) = [G_{1-FOPID}(s) \quad G_{2-FOPID}(s)] \begin{bmatrix} R(s) \\ T_{opt}(s) \end{bmatrix}, \quad (4.18)$$

gdje  $G_{1-FOPID}(s)$  i  $G_{2-FOPID}(s)$  za razmatrani pogon sa FOPID regulatorom imaju sljedeći oblik:

$$G_{1-FOPID}(s) = \frac{KK_d s^{\lambda+\mu} + KK_p s^\lambda + KK_i}{KK_d s^{\lambda+\mu} + L_a J s^{\lambda+2} + (L_a B + R_a J) s^{\lambda+1} + (R_a B + KK_p + KK_b) s^\lambda + KK_i}, \quad (4.19)$$

$$G_{2-FOPID}(s) = \frac{-L s^{\lambda+1} - R_a s^\lambda}{KK_d s^{\lambda+\mu} + L_a J s^{\lambda+2} + (L_a B + R_a J) s^{\lambda+1} + (R_a B + KK_p + KK_b) s^\lambda + KK_i}. \quad (4.20)$$

Za potrebe estimacije parametara FOPID regulatora primjenjene su kombinacije EO algoritma i njegovih modifikacija (BEO, ChEO) sa ISE i ITSE kriterijumskim funkcijama. Grafici odziva brzine pogona sa FOPID regulatorom na step poremećaj (u trenutku  $t=10s$ ) kojim se modeluje opterećenje, za dva slučaja različitog opterećenja, dati su na slici 4.5.2. Parametri FOPID regulatora dobijeni pretragom, kao i pregled ostalih rezultata koji se odnose na dobijene setove parametara predstavljeni su u Tabelama 4.9 i 4.10.



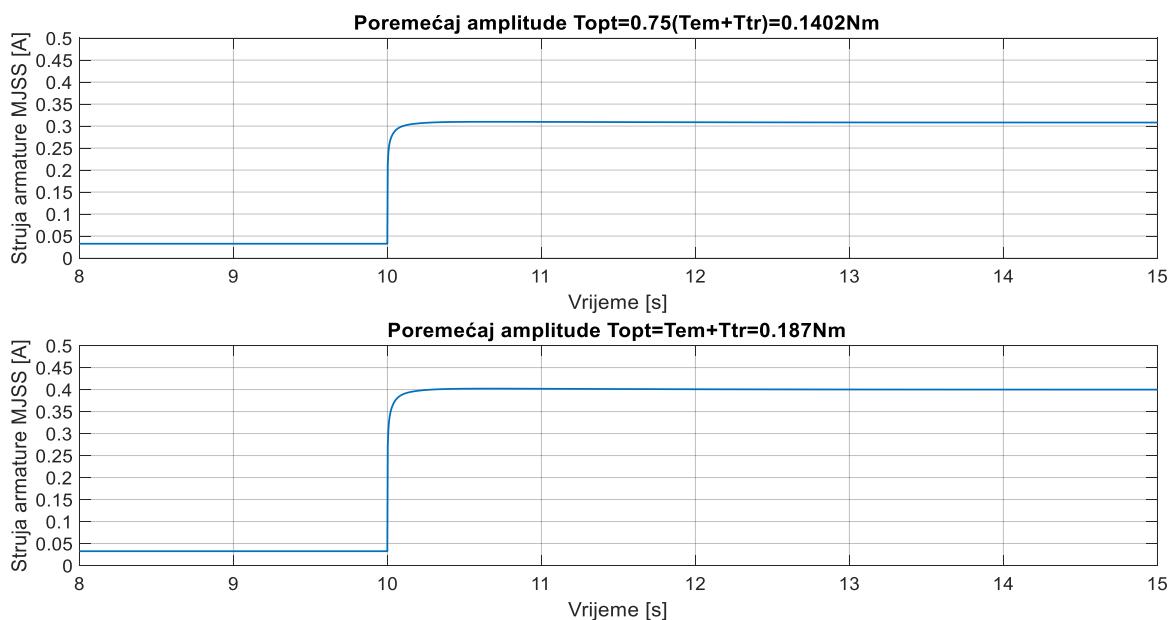
Slika 4.5.2: Step odzivi brzine pogona sa FOPID regulatorom na dejstvo step poremećaja

Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti sledeće:

- Bolje rezultate pri estimaciji parametara dala je ITSE u odnosu na ISE kriterijumsku funkciju, bez obzira na primjenjeni algoritam. Najbolje minimizovanje kriterijumske funkcije postignuto je realizacijom BEO (ITSE) kojom je ostvarena vrijednost ITSE=1.8949.
- Sa aspekta vrijednosti podbačaja, najbolji rezultat je dobijen realizacijom ChEO (ITSE) i njegova vrijednost je bila 0.3299rad/s (1.8536%) za  $T_{opt}=0.187\text{Nm}$ , dok je, pri istom opterećenju, najlošije „odreagovala“ realizacija EO (ISE) koja je ostvarila podbačaj od 0.3883rad/s (2.1814%). BEO algoritam je dao bolje rezultate sa aspekta vrijednosti podbačaja u odnosu na EO algoritam. Podbačaji pri manjoj vrijednosti opterećenja (0.1402Nm) su srazmjerno manji (za 25%) u odnosu na dobijene pri radu pogona pod punim opterećenjem (0.187Nm).
- Realizacije sa FOPID regulatorom dale su nešto manje vrijednosti vremena smirenja podbačaja u odnosu na 2-DOF PID regulator. EO i BEO algoritmi su za dvije realizacije sa različitim kriterijumskim funkcijama dali slične rezultate, dok je najbolji rezultat u pogledu vremena smirenja podbačaja dala realizacija ChEO (ITSE) čija je vrijednost  $t_{II0.05\%}=3.4379\text{s}$  za  $T_{opt}=0.187\text{Nm}$ . Najduže dobijeno vrijeme smirenja ( $t_{II0.05\%}=3.7154\text{s}$ ) za puno opterećenje ( $T_{opt}=0.187\text{Nm}$ ) dala je realizacija EO (ISE). Vrijednosti  $t_{II1.5\%}$  za dva prethodno navedena slučaja iznose 0.8163s i 0.8215s, respektivno, iz čega se može zaključiti da pomenute realizacije imaju slične vrijednosti za  $t_{II1.5\%}$ , pri nešto većoj razlici kod vrijednosti  $t_{II0.05\%}$ .

- Međusobno najsličniji rezultati ostvareni su primjenama 2-DOF PID i FOPIID regulatora. Napredna struktura FOPIID regulatora omogućava precizno i efikasno reagovanje na dejstvo poremećaja, čineći pad i ponovni uspon brzine postepenim i kontrolisanim, bez naglih oscilacija u odzivu.
- Najbolji rezultat sa aspekta podbačaja i vremena smirenja podbačaja, u odnosu na sve kombinacije regulatora, kriterijumske funkcije i algoritama obrađenih u ovom radu, dala je realizacija FOPIID (ChEO, ITSE) čije su vrijednosti  $\Pi_{II}=0.3299 \text{rad/s}$  (1.8536%), dok je  $t_{II,0.05\%}=3.4379 \text{s}$ .

Struje armature pogona sa FOPIID regulatorom, za različite vrijednosti opterećenja, predstavljene su na slici 4.5.3. Prikazane su samo struje dobijene u slučaju EO (ITSE), obzirom na identične rezultate koji se dobijaju u svim ostalim slučajevima.



Slika 4.4.3: Struje armature pogona sa FOPIID regulatorom

Vrijednosti struja armature za oba slučaja opterećenja kod pogona sa FOPIID regulatorom iste su kao kod pogona sa prethodno opisanim regulatorima. Implementacija necjelobrojnog izvoda i integrala kod FOPIID regulatora omogućava finije podešavanje kontrolnih akcija, te samim tim i bržu stabilizaciju struje armature u odnosu na klasični PID regulator.

Pregled svih dobijenih rezultata za pogon sa FOPIID regulatorom, za dva slučaja vrijednosti opterećenja, predstavljen je u Tabelama 4.9 i 4.10.

Tabela 4.9: Pregled rezultata pogona sa FOPID regulatorom ( $T_{\text{opt}}=0.187\text{Nm}$ )

Algoritam	Kriterijumska funkcija	Vrijednost kriterijumske funkcije	Parametri FOPID regulatora					Podbačaj		Vrijeme smirenja podbačaja	
			Kp	Ki	Kd	$\lambda$	$\mu$	$\Pi_{\Pi} [\text{rad/s}]$	$\Pi_{\Pi\%} [\%]$	$t_{\Pi0.05\%} [\text{s}]$	$t_{\Pi1.5\%} [\text{s}]$
EO	ISE	2.0633	4.4283	5.3454	0.7514	0.98997	0.81145	0.3883	2.1814	3.7154	0.8215
	ITSE	2.0505	4.4076	5.2269	0.8153	0.99865	0.66021	0.3762	2.1135	3.5862	0.7877
BEO	ISE	2.4536	4.5088	5.5963	0.8137	0.99652	0.51091	0.3671	2.0624	3.5957	0.6759
	ITSE	1.8949	4.9196	5.4999	0.8777	0.99955	0.84859	0.3555	1.9970	3.5288	0.7860
ChEO (Circle mapa)	ISE	2.0589	4.4755	5.6624	1.2541	0.99884	0.52697	0.3358	1.8867	3.4660	0.6888
	ITSE	1.9835	4.1845	5.5541	1.6375	0.98994	0.61964	0.3299	1.8536	3.4379	0.8163

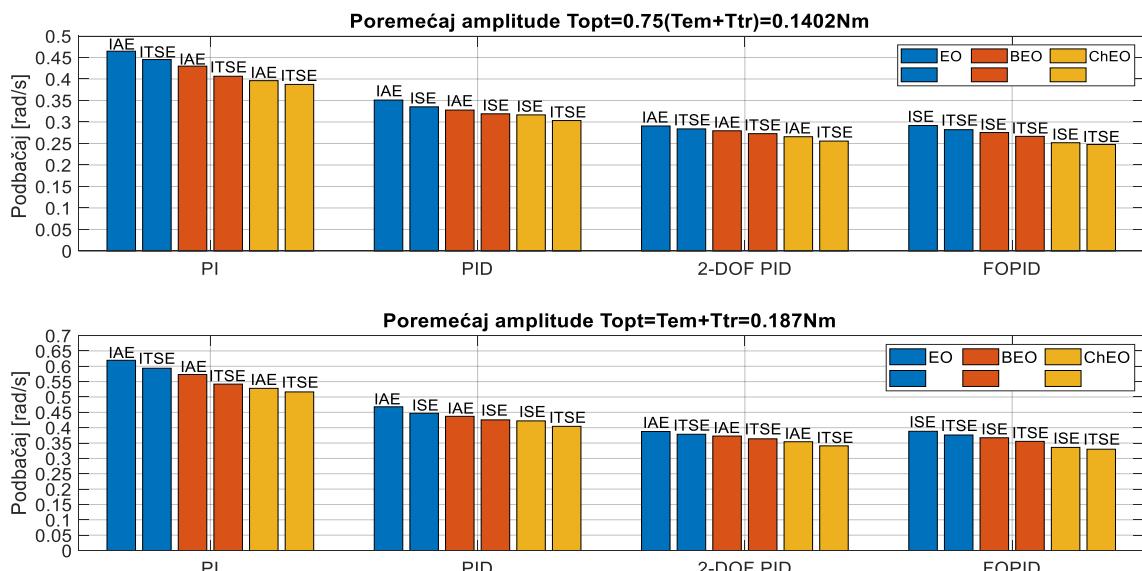
Tabela 4.10: Pregled rezultata pogona sa FOPID regulatorom ( $T_{\text{opt}}=0.1402\text{Nm}$ )

Algoritam	Kriterijumska funkcija	Podbačaj		Vrijeme smirenja podbačaja	
		$\Pi_{\Pi} [\text{rad/s}]$	$\Pi_{\Pi\%} [\%]$	$t_{\Pi0.05\%} [\text{s}]$	$t_{\Pi1\%} [\text{s}]$
EO	ISE	0.2917	1.6388	3.4730	0.9403
	ITSE	0.2821	1.5850	3.3806	0.9170
BEO	ISE	0.2754	1.5472	3.3779	0.8065
	ITSE	0.2666	1.4978	3.3161	0.9108
ChEO (Circle mapa)	ISE	0.2517	1.4143	3.2846	0.8343
	ITSE	0.2477	1.3917	3.2921	0.9726

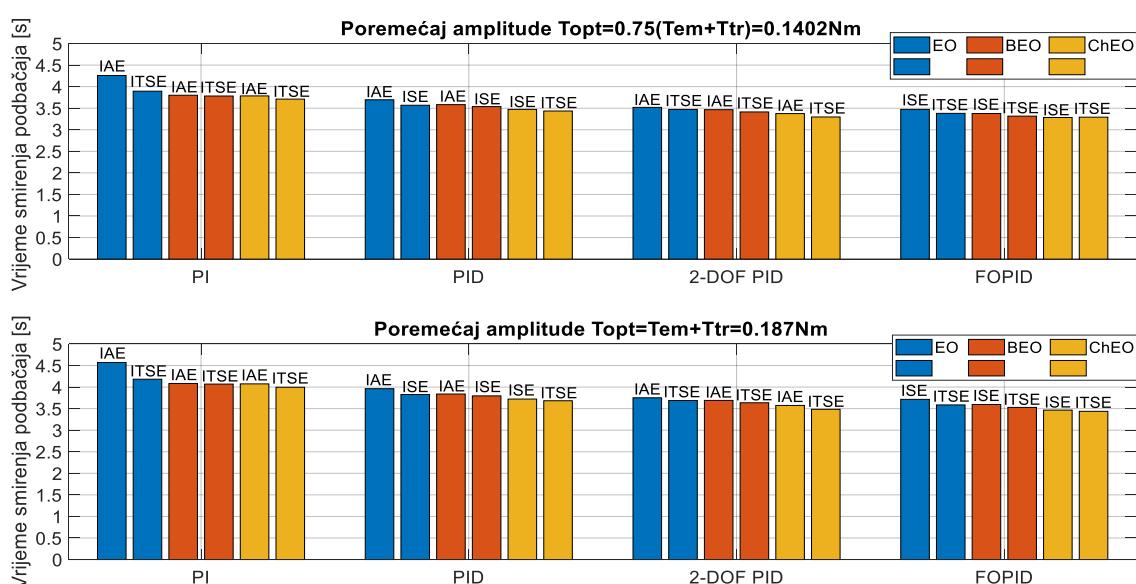
## 4.6. Komparativna analiza simulacionih rezultata

U cilju boljeg sagledavanja načina na koji različite strategije regulacije (različite kombinacije strukture regulatora, algoritama i kriterijumskih funkcija) utiču na dinamiku pogona i efikasnost njegovog rada u ovom poglavlju izvedena je komparativna analiza dobijenih rezultata. Komparativna analiza omogućava detaljnije razumijevanje prednosti i nedostataka različitih regulacionih strategija, te identifikaciju najkvalitetnijih pristupa za regulaciju brzine pogona sa MJSS.

Na slici 4.6.1 su prikazane vrijednosti podbačaja, dok su na slici 4.6.2 prikazane vrijednosti vremena smirenja podbačaja ( $t_{\Pi 0.05\%}$ ) za sve pristupe obuhvaćene prethodnim analizama.



Slika 4.6.1: Vrijednosti podbačaja  $\Pi_{\Pi}$

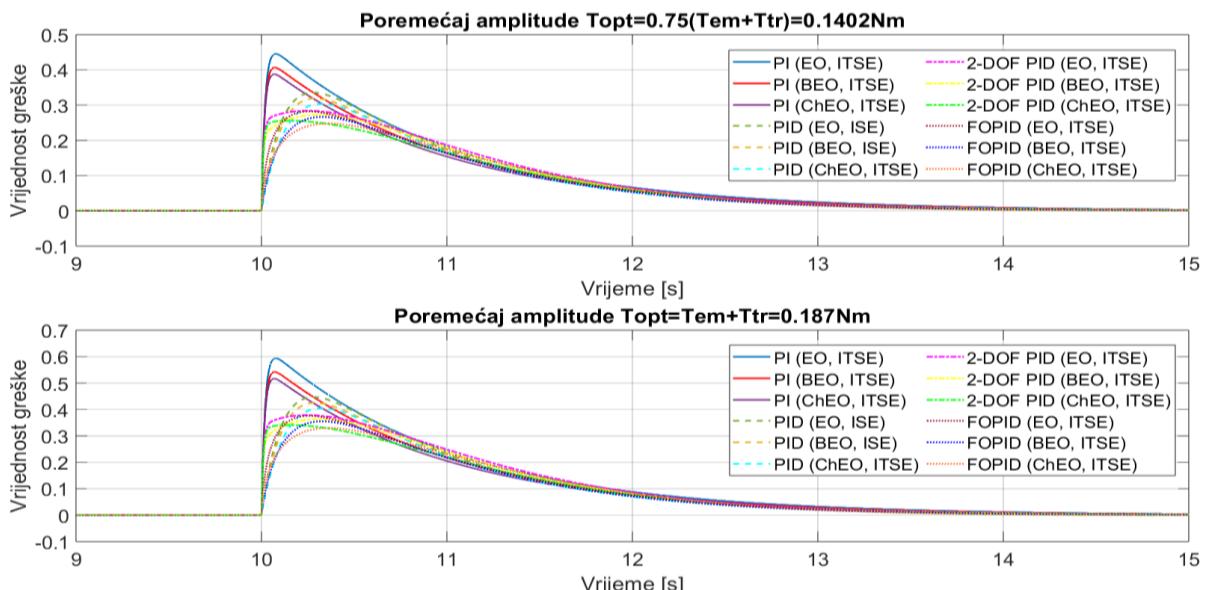


Slika 4.6.2: Vrijednosti vremena smirenja podbačaja  $t_{\Pi 0.05\%}$

Kada je riječ o podbačaju, svi obrađeni slučajevi daju zadovoljavajuće rezultate. PID regulator daje bolje vrijednosti u odnosu na PI regulator, dok 2-DOF PID i FOPID daju bolje u odnosu na prethodna dva. Najsličnije vrijednosti podbačaja imaju 2-DOF PID i FOPID regulator međusobno kod primjene EO algoritma, dok se nešto osjetnija razlika javlja kod primjene ChEO algoritma. Generalno, najbolje rezultate za svaku od struktura regulatora daje primjena ChEO algoritma, a kao najbolja kriterijumska funkcija pokazala se ITSE, dok su se pomoću ISE dobijali bolji rezultati u odnosu na IAE kriterijumsku funkciju. Najmanja vrijednost podbačaja za  $T_{\text{opt}}=0.187\text{Nm}$  ostvarena je realizacijom FOPID (ChEO, ITSE) i iznosi 0.3299rad/s, odnosno 1.8536%.

Svi obrađeni slučajevi su dali relativno kvalitetne rezultate u odnosu na vrijednost vremena smirenja podbačaja (primjena PID regulatora je očekivano omogućila dobijanje boljih rezultata od primjene PI regulatora, dok su bolje rezultate od prethodno navedenih omogućile primjene 2-DOF PID i FOPID regulatora). FOPID je generalno imao nešto manja vremena smirenja podbačaja u odnosu slučajeve sa istim primijenjenim algoritmima kod 2-DOF PID regulatora. Najbolje vrijednosti vremena smirenja podbačaja ostvarene su pretragom parametara regulatora pomoću ChEO algoritma, kod svake od obrađenih struktura regulatora, pri čemu su se rezultati dobijeni pomoću ITSE kriterijuma pokazali kao najbolji. Za svaki regulator ponaosob, ne postoji drastična razlika između najboljeg i najgoreg postignutog rezultata u pogledu vremena smirenja podbačaja. Najmanja vrijednost vremena smirenja podbačaja ( $t_{\text{II}0.05\%}$ ) za  $T_{\text{opt}}=0.187\text{Nm}$  ostvarena je realizacijom FOPID (ChEO, ITSE) i iznosi 3.4379s.

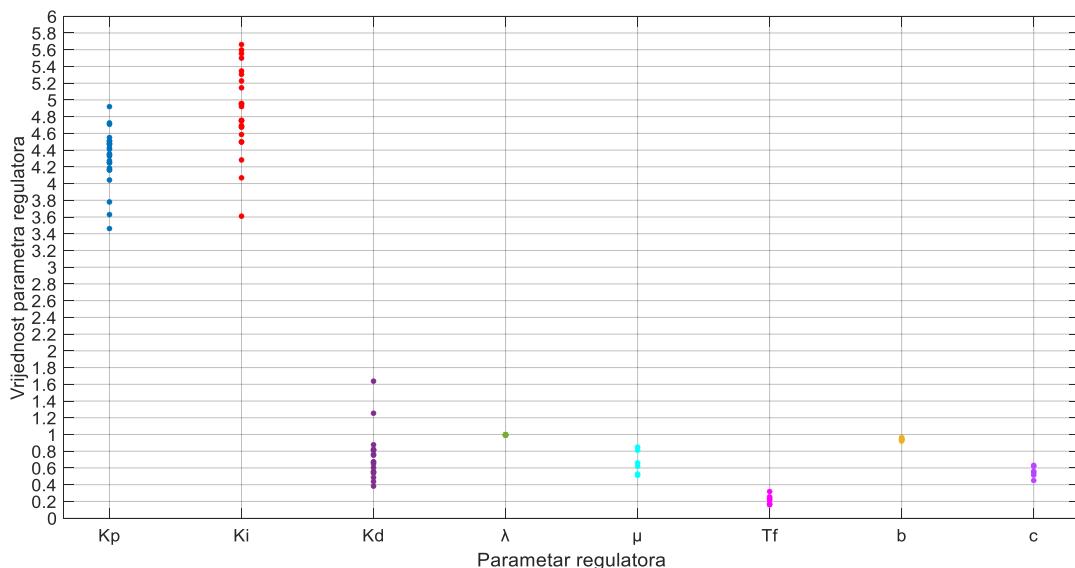
Na slici 4.6.3 prikazani su grafici grešaka za obrađene strukture regulatora (razmatrane su realizacije koje ostvaruju manju vrijednost greške za svaki od posmatranih algoritama).



Slika 4.6.3: Vrijednosti greške analiziranih step odziva

Na osnovu grafika grešaka moguće je detaljno sagledati razlike u reakciji pogona sa svakom od obrađenih struktura regulatora pri promjeni vrijednosti opterećenja MJSS. Jasno je da je PI regulator manje efikasan u odnosu na ostale predstavljene regulatore, dok su razlike između 2-DOF PID i FOPIID regulatora najmanje. Takođe na osnovu prethodne slike može se zaključiti da ni za jednu ponuđenu realizaciju nema naglih oscilacija na graficima grešaka što potvrđuje dobru prilagodljivost regulatora na promjene opterećenja. Upravo na osnovu analize pomenutih grafika moguće je dobiti smjernice za dalje unapređivanje strategije optimizacije pomenutog pogona, o čemu će biti riječi u nastavku ovog rada.

Na slici 4.6.4 su prikazane estimirane vrijednosti parametara za svaku od prethodno obrađenih struktura regulatora.



Slika 4.6.4: Vrijednosti estimiranih parametara regulatora

Na prethodnoj slici se može uočiti da se vrijednost parametra  $K_p$ , koji je ključan pri smanjivanju podbačaja brzine prilikom dejstva poremećaja, kreće u opsegu od 3.4 do 5, dok se  $K_i$ , koji direktno utiče na smanjenje vremena smirenja podbačaja, kreće u opsegu 3.6 do 5.8. Za neke parametre regulatora, kao što su težinski koeficijent proporcionalnog dejstva ( $b$ ) kod 2-DOF PID regulatora i stepen necjelobrojne integracije ( $\lambda$ ) kod FOPIID regulatora, moguće je primijetiti da se kreću oko bliskih vrijednosti. Grafici kao prethodni veoma su značajni pri odabiru optimalne strategije regulacije za određenu primjenu, obzirom da omogućavaju identifikaciju potencijalnih područja na kojima treba vršiti pretragu parametara regulatora u cilju dobijanja što kvalitetnijeg odziva sistema.

U nastavku rada će biti analizirano ponašanje rada pogona sa svakim od obrađenih struktura regulatora u slučaju varijabilnih uslova rada. Varijabilni uslovi se odnose na efekat

promjene referentne brzine obrtanja i vrijednosti opterećenja. U tom cilju izvršena je simulacija u trajanju od 40s. U početku referentna brzina pogona iznosi 16rad/s, dok se u trenutku  $t=8$ s povećava na 16.8rad/s, nakon toga u trenutku  $t=18$ s slijedi povećanje na 17.8rad/s, i na kraju u trenutku  $t=30$ s od pogona se zahtijeva smanjenje brzine na 17 rad/s. Kada je u pitanju opterećenje ono se modeluje step poremećajima u trenucima  $t=12$ s,  $t=22$ s i  $t=34$ s i njihove vrijednosti su 0.1402Nm, 0.187Nm i 0.1309Nm, respektivno.

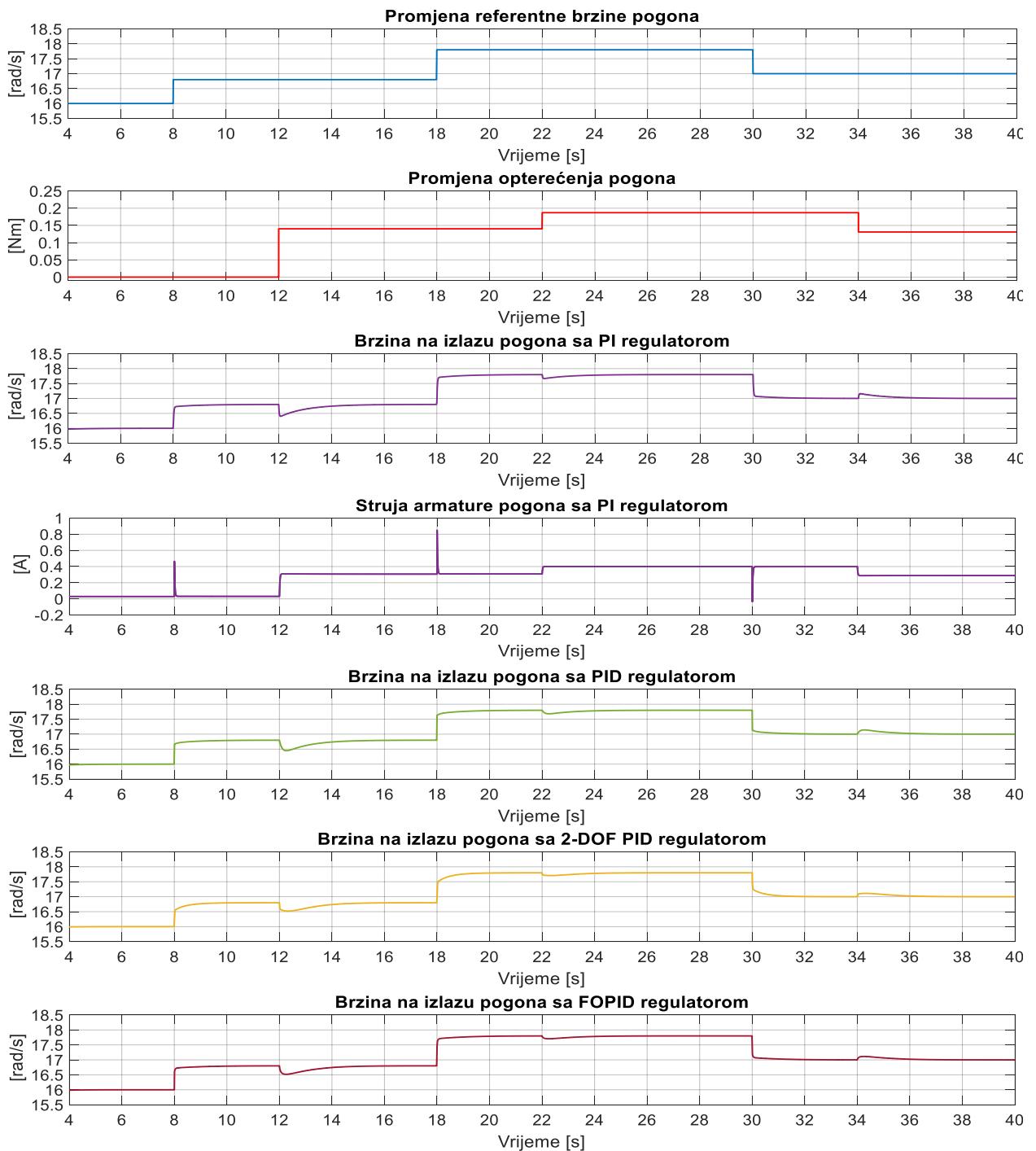
Strukture regulatora, algoritmi i kriterijumske funkcije, kao i parametri regulatora korišćeni za potrebe analize rada pogona pri varijabilnim uslovima dati su u nastavku:

- PI regulator, ChEO (IAE),  $K_p=4.1674$ ,  $K_i=4.5861$ ,
- PID regulator, EO (IAE),  $K_p=4.1596$ ,  $K_i=4.4974$ ,  $K_d=0.3825$ ,
- 2-DOF PID regulator, BEO (IAE),  $K_p=4.3544$ ,  $K_i=4.7507$ ,  $K_d=0.6741$ ,  $T_f=0.15970$ ,  
 $b=0.93661$ ,  $c=0.54102$ ,
- FOPID regulator, EO (ITSE),  $K_p=4.4076$ ,  $K_i=5.2269$ ,  $K_d=0.8153$ ,  $\lambda=0.99865$ ,  
 $\mu=0.66021$ .

Na slici 4.6.5 predstavljeni su odzivi brzine pogona sa svim strukturama regulatora na varijabilne uslove rada. Takođe je predstavljena i struja armature pogona sa PI regulatorom.

Kroz predstavljeni eksperiment u kojem su pogoni sa svim strukturama regulatora bili podvrgnuti varijabilnim uslovima rada u vidu promjena referentne vrijednosti brzine i opterećenja MJSS tokom vremena, može se zaključiti da su svi korišćeni regulatori ostvarili dobar odziv brzine pogona, bez pojave preskoka ili oscilacija u odzivima. Očekivano su oni regulatori kod kojih ima više slobode, u smislu podešavanja više parametara, ispratili promjene uslova rada uz manje vrijednosti podbačaja i brže reakcije na zahtjev promjene referentne vrijednosti brzine obrtanja.

U trenutku  $t=12$ s dolazi do najvećeg pada brzine obrtanja uslijed opterećivanja pogona, dok u trenutku  $t=22$ s je podbačaj evidentno manji obzirom da se radi o već opterećenom motoru. U trenutku  $t=34$ s dolazi do blagog porasta brzine, što je posledica smanjenja vrijednosti opterećenja pogona. Povećanje vrijednosti opterećenja MJSS struja je ispratila kontrolisanim porastom vrijednosti, dok su promjene referentne vrijednosti brzine ispraćene trenutnim skokovima struje čije amplitude ostaju u granicama dozvoljenih za razmatrani motor. U trenutku  $t=30$ s dolazi do trenutne promjene struje u negativnom smjeru, što je posljedica usporavanja motora, tj. regenerativnog režima rada kada motor djeluje kao generator energije, vraćajući dio svoje energije nazad u električni sistem.



Slika 4.6.5: Odziv pogona na varijabilne uslove rada

Prilikom odabira strategije regulacije u nekom pogonu treba pronaći kompromis između kvaliteta performansi koje zahtijeva neki pogon, cijene, jednostavnosti implementacije i složenosti algoritma koji se primjenjuje. Iako složeniji regulatori mogu pružiti kvalitetniji odziv, u nekim slučajevima umjerena preciznost uz jednostavnu implementaciju, uštedu u troškovima i memorijskim resursima, mogu zadovoljiti potrebe određenih operacija u pogonima.

## 4.7. Promjenljivi parametri MJSS

U ovom poglavlju izvršena je analiza rada pogona sa MJSS pri promijenjenim parametrima motora. Ovo istraživanje ima veliki praktični značaj obzirom da pri radu mašine, vremenom parametri MJSS bivaju podložni promjenama uslijed spoljnih uticaja, naprezanja i varijacija u samom sistemu. Prethodno navedeno se prvenstveno odnosi na promjene temperature i habanje djelova motora. Povećanje temperature ima najveći uticaj na otpornost namotaja mašine ( $R_a$ ), tj. dovodi do povećanja otpornosti namotaja, zatim smanjuje induktivnost namotaja ( $L_a$ ) i povećava trenje unutar mehaničkih djelova motora ( $B$ ). Habanje djelova motora najviše utiče na povećanje trenja između pokretnih djelova motora, kao i smanjenje momenta inercije motora ( $J$ ) uslijed promjene u geometriji ili materijalima rotora. Imajući u vidu da promjena temperature i habanje imaju direktni ili indirektni uticaj na promjenu nekog parametra motora, koja može biti manja ili veća, u ovom poglavlju analiza rada motora je izvršena za dva seta promijenjenih parametara MJSS koji su dati u Tabeli 4.11. Setom 1 parametara se simulira promjena parametara uslijed uticaja povećanja temperature, dok se set 2 odnosi na simulaciju rada uslijed promjene parametara MJSS koji su posljedica habanja djelova motora.

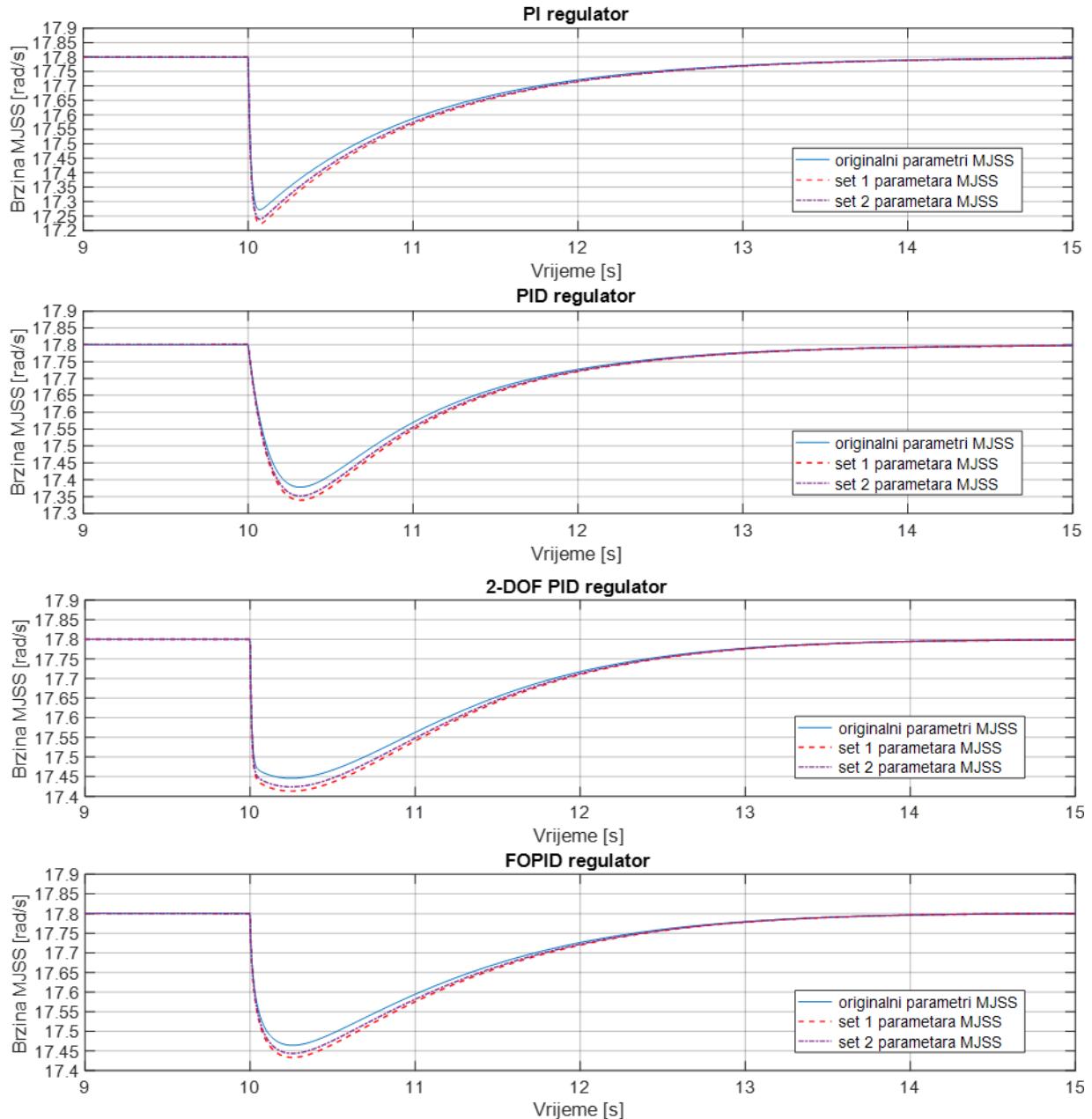
Tabela 4.11: Setovi parametara MJSS

Originalni parametri MJSS	Set 1 parametara MJSS	Set 2 parametara MJSS
$R_a=7.101\Omega$	$R_a=7.45\Omega$	$R_a=7.32\Omega$
$L_a=3.4mH$	$L_a=3.3mH$	$L_a=3.34mH$
$J=0.00567 \text{ kgm}^2$	$J=0.00545 \text{ kgm}^2$	$J=0.00538 \text{ kgm}^2$
$B=0.000931 \text{ Nms/rad}$	$B=0.00099 \text{ Nms/rad}$	$B=0.00102 \text{ Nms/rad}$
$K=0.509 \text{ Nm/A}$	$K=0.490 \text{ Nm/A}$	$K=0.495 \text{ Nm/A}$
$K_b=0.509Vs/rad$	$K_b=0.490Vs/rad$	$K_b=0.495Vs/rad$

Analiza rada pogona sa aspekta promjene vrijednosti parametara MJSS sprovedena je za sve četiri obrađene strukture regulatora. Uzeto je u obzir da u svim pomenutim slučajevima u trenutku  $t=10s$  postoji dejstvo poremećaja čija je amplituda  $0.187Nm$ . Korišćene strukture regulatora, algoritmi i kriterijumske funkcije, kao i parametri regulatora dati su u nastavku:

- PI regulator, ChEO (IAE),  $K_p=4.1674$ ,  $K_i=4.5861$ ,
- PID regulator, ChEO (ISE),  $K_p=4.5074$ ,  $K_i=4.9543$ ,  $K_d=0.5571$ ,
- 2-DOF PID regulator, ChEO (IAE),  $K_p=4.4786$ ,  $K_i=4.9574$ ,  $K_d=0.7633$ ,  $T_f=0.25413$ ,  $b=0.94122$ ,  $c=0.51471$ ,
- FOPID, ChEO (ISE),  $K_p=4.4755$ ,  $K_i=5.6624$ ,  $K_d=1.2541$ ,  $\lambda=0.99884$ ,  $\mu=0.52697$ .

Na slici 4.7.1 predstavljeni su odzivi brzine pogona za slučaj svake obrađene strukture regulatora, i to odziv za originalne parametre i odzivi za dva promijenjena seta parametara. Dobijeni rezultati su predstavljeni u Tabeli 4.12.



Slika 4.7.2: Step odzivi brzine pogona na step poremećaj za promijenjene parametre MJSS

Na osnovu dobijenih rezultata za sve obrađene strukture regulatora, može se zaključiti da promjena parametara MJSS, za oba seta promijenjenih parametara, nije značajno uticala na promjenu vremena smirenja podbačaja koje se dobija za originalne parametre MJSS.

Tabela 4.12: Pregled rezultata za odzive sa promijenjenim parametrima MJSS

Regulator	Originalni parametri MJSS		Set 1 parametara MJSS		Set 2 parametara MJSS	
	$\Pi_{\Pi}$ [rad/s] ( $\Pi_{\Pi\%}$ [%])	$t_{\Pi0.05\%}$ ( $t_{\Pi1.5\%}$ ) [s]	$\Pi_{\Pi}$ [rad/s] ( $\Pi_{\Pi\%}$ [%])	$t_{\Pi0.05\%}$ ( $t_{\Pi1.5\%}$ ) [s]	$\Pi_{\Pi}$ [rad/s] ( $\Pi_{\Pi\%}$ [%])	$t_{\Pi0.05\%}$ ( $t_{\Pi1.5\%}$ ) [s]
PI	0.5281 (2.9670)	4.0744 (0.7721)	0.5763 (3.2378)	4.1474 (0.8602)	0.5609 (3.1514)	4.1246 (0.8313)
PID	0.4221 (2.3711)	3.7225 (0.8678)	0.4608 (2.5888)	3.7828 (0.9472)	0.4481 (2.5176)	3.7643 (0.9211)
2-DOF PID	0.3542 (1.9900)	3.5747 (0.8554)	0.3869 (2.1737)	3.6188 (0.9649)	0.3761 (2.1128)	3.6005 (0.9301)
FOPID	0.3358 (1.8867)	3.4660 (0.6888)	0.3668 (2.0605)	3.5074 (0.7997)	0.3565 (2.0031)	3.4947 (0.7642)

Kada je u pitanju podbačaj, zaključak je identičan za sva četiri primjenjena regulatora. Usljed promjene parametara dolazi do povećanja vrijednosti podbačaja, s tim što se veći podbačaj dobija za set 1 (simulacija promjene parametara MJSS usljed povećanja temperature) u odnosu na set 2 parametara MJSS (simulacija promjene parametara MJSS usljed habanja djelova motora). U odnosu na slučaj sa originalnim parametrima MJSS, u slučaju seta 1 parametara podbačaj se povećao oko 9%, dok u slučaju seta 2 parametara to povećanje iznosi oko 6%, za sve obrađene regulatore.

Promjena parametara MJSS rezultirala je nešto većim padom brzine pod opterećenjem u odnosu na slučaj originalnih parametara motora, ali imajući u vidu generalno slične grafike za svaki od setova parametara, može se zaključiti da pomenute promjene nijesu značajno uticale na dinamiku rada pogona. Uprkos promjenama parametara MJSS, pogon je zadržao stabilnost rada, pružajući pouzdanost i zadovoljavajuće performanse i pod različitim uslovima rada.

## 5. Zaključak

Motori jednosmjerne struje ostaju aktuelni i u vremenima moderne tehnologije zahvaljujući svojoj jednostavnosti, pouzdanosti i efikasnosti. Isti imaju širok spektar primjene, od uređaja u domaćinstvu, preko velikih industrijskih pogona, pa sve do vozila na električni pogon. Uprkos sve većoj dominaciji motora naizmjениčne struje, motori jednosmjerne struje predstavljaju pravi izbor u situacijama gdje se zahtijeva precizna kontrola brzine i obrtnog momenta. Mogućnost precizne kontrole nad brzinom i momentom uz relativno jednostavne i jeftine upravljačke sisteme, čini pogone sa MJSS i dalje konkurentnim u postizanju visokih standarda kvaliteta i produktivnosti. Regulacija brzine pogona sa MJSS, kao tehnički i ekonomski izazov, privlači veliku pažnju istraživača i inženjera, o čemu svjedoči ogroman broj radova napisanih na ovu temu.

Najveći dio dostupne literature bavi se regulacijom brzine pogona sa MJSS u praznom hodu. Ovaj rad se bavi estimacijom parametara regulatora za regulaciju brzine MJSS sa aspekta neutralisanja poremećaja kojim se modeluje opterećenje motora. U radu je predloženo više različitih struktura regulatora, kriterijumskih funkcija i metaheurističkih algoritama za proces optimizacije parametara regulatora, kako bi se postigla stabilnost brzine i preciznost upravljanja motorom jednosmjerne struje pri promjeni vrijednosti momenta opterećenja.

Simulacioni rezultati potvrđuju efikasnost predloženog EO algoritma u optimizaciji parametara za sve četiri predložene strukture regulatora (PI, PID, 2-DOF PID i FOPID). U odnosu na primjenjene kriterijumske funkcije - IAE, ISE i ITSE, najbolji rezultati ostvareni su upotrebom ITSE kriterijumske funkcije, pri kvalitetnim rezultatima ostvarenim i pomoću ostale dvije (IAE i ISE). Primjenom modifikovanih verzija EO algoritma - BEO kao modifikacije koja vrši operacije sa binarnim vrijednostima i ChEO koja je postignuta implementacijom haotičnih mapa, postignuti su kvalitetniji rezultati u odnosu na izvorni EO algoritam, čime se potvrđuje da se procesom modifikacije i hibridizacije dobijaju moćniji algoritmi za optimizaciju parametara regulatora. Ovaj rad je ilustrovaо uticaj odabira adekvatne kombinacije strukture regulatora, kriterijumske funkcije i algoritma na postizanje što kvalitetnijeg step odziva sistema. Izloženi setovi parametara regulatora u prethodnim poglavljima, osim što daju kvalitetan odziv na dejsvo poremećaja kojim se modeluje opterećenje MJSS, održavaju stabilnost brzine i pri promjenama vrijednosti momenta opterećenja i referentne vrijednosti brzine obrtanja tokom trajanja simulacije, kao i pri varijaciji parametara MJSS.

Treba imati u vidu da ne postoji najefikasnije rješenje za prethodno navedenu problematiku, već da za što boljim rješenjem treba tragati kroz različite kombinacije konfiguracija

regulatora i algoritama, kao i kroz uključivanje dejstva različitih poremećaja u simulacijama u cilju razvoja robusnijih sistema upravljanja.

Buduća istraživanja vezana za ovu oblast treba usmjeriti na napredna tehnološka (oblast energetske elektronike) i teorijska rješenja, te unapređenje novih konfiguracija regulatora, optimizacionih algoritama i kriterijumskih funkcija. Na osnovu rezultata eksperimentalnih ispitivanja motora i regulatora u realnim uslovima bilo bi moguće prilagoditi simulacione modele laboratorijskim rezultatima u cilju jednostavnije implementacije simulacionih strategija u realnosti.

## 6. Literatura

- [1] V. Vučković, „Električni pogoni“, *Akademска misao*, Beograd, 2002.
- [2] Š. Mašić, S. Smaka, „Elektromotorni pogoni“, *Elektrotehnički fakultet u Sarajevu*, 2011.
- [3] Lj. Piotrovskij, „Električni strojevi“, *Tehnička knjiga*, Zagreb, 1989.
- [4] B. Jurković, „Elektromotorni pogoni“, *Školska knjiga*, Zagreb, 1978.
- [5] M. Čalasan, „Maštine jednosmjerne struje, sa zbirkom zadataka i ilustrativnim primjerima“, *Akademска misao*, Beograd, 2020.
- [6] S. Vukosavić, „Električne maštine“, *Akademска misao*, Beograd, 2010.
- [7] P. Matić, „Električne maštine 1“, *Akademска misao*, Beograd, 2016.
- [8] B. Mitraković, „Maštine za jednosmernu struju“, *Naučna knjiga*, Beograd, 1971.
- [9] M. F. Golnaraghi, B. C. Kuo, “Automatic Control Systems”, 10th edition, *McGraw-Hill Education*, Njujork, 2017.
- [10] K. J. Astrom, T. Hagglund, “PID Controllers, Theory, Design and Tuning”, 2nd Edition, *Instrument Society of America*, 1995.
- [11] S. M. Almufti, A. A. Shaban, R. I. Ali, J. A. Dela Fuente, “Overview of Metaheuristic Algorithms”, *Polaris Global Journal of Scholarly Research and Trends*, vol. 2, april 2023, pp. 10-32
- [12] M. Solihin, L. Tack, L. Moey, “Tuning of PID Controller Using Particle Swarm Optimization (PSO)”, *Proceeding of the International Conference on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, vol. 1, januar 2011.
- [13] 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
- [14] 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
- [15] M. Khalilpour, N. Razmjoooy, 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.
- [16] S. Mirjalili, A. Gandomi, S. Z. Mirjalili, S. Saremi, Shahzad, “Salp Swarm Algorithm: A bio-inspired optimizer for engineering design problems”, *Advances in Engineering Software*, vol. 114, jul 2017.

- [17] 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
- [18] 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
- [19] 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
- [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. Faramarzi, M. Heidarinejad, B. Stephens, S. Mirjalili, “Equilibrium optimizer: A novel optimization algorithm”, *Knowledge-Based Systems*, vol. 191, novembar 2019.
- [22] I. D. Fajuke, A. Raji, “Optimal tuning of PID controller for speed control of DC motor using equilibrium optimizer”, *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 30, april 2023, pp. 89-101
- [23] P. Hu, S. Chu, V. Snasel, J. Pan, “ Binary Equilibrium Optimizer Algorithm”, *Journal of Network Intelligence*, vol. 7, februar 2022, pp. 45-58
- [24] Y. Gao, Y. Zhou, Q. Luo, “An Efficient Binary Equilibrium Optimizer Algorithm for Feature Selection”, *IEEE Access*, vol. PP, avgust 2020, pp. 1-1
- [25] A. Faramarzi, S. Mirjalili, M. Heidarinejad, Mohammad, “Binary Equilibrium Optimizer: theory and application in building optimal control problems”, *Energy and Buildings*, vol. 277, septembar 2022, pp. 112503
- [26] R. Xi, D. Lv, Y. Yu, X. Huang, Z. Wang, L. Gu, Y. Zhang, “Optimization of Location-Routing for Multi-Vehicle Combinations with Capacity Constraints Based on Binary Equilibrium Optimizers”, *Axioms*, vol. 13, no. 1, 2024.
- [27] B. Mohamed, L. Mohaisen, “Binary Equilibrium Optimization Algorithm for Computing Connected Domination Metric Dimension Problem”, *Scientific Programming*, vol. 2022, oktobar 2022, pp. 1-15
- [28] S. Saremi, S. Mirjalili, A. Lewis, “Biogeography-based optimization with chaos”, *Neural Computing and Applications*, oktobar 2014, pp. 1077-1097

- [29] Y. Liu, H. Ding, Z. Wang, G. Jin, “A chaos-based adaptive equilibrium optimizer algorithm for solving global optimization problems”, *Mathematical biosciences and engineering : MBE*, vol. 20, septembar 2023, pp. 17242-17271
- [30] R. Rai, K. G. Dhal, “ Recent Developments in Equilibrium Optimizer Algorithm: Its Variants and Applications”, *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 30, april 2023.
- [31] K. Boudane, “Velocity Control of a DC Motor Using PID and CDM Method Based on Matlab/Simulink and Arduino”, master rad, *Instituto Politecnico de Braganca*, Portugal, 2021.
- [32] J. Gonçalves, J. Lima, P. Costa, A. P. Moreira, “Modeling and Simulation of the EMG30 Geared Motor with Encoder Resorting to SimTwo: The Official Robot@Factory Simulator”, jul 2013.
- [33] E. Kossove, M. Abu-Ayyad, V. Prabhu, “PI Controller Research and Design”, avgust 2018.
- [34] Y. Sun, Yuxuan, “PID controller combined with intelligent algorithm”, *Applied and Computational Engineering*, vol. 6, jun 2023, pp. 595-601
- [35] M. Araki, H. Taguchi, “Two-Degree-of-Freedom PID Controller”, *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 1, januar 2004.
- [36] A. Tepljakov, “Fractional-Order PID Controller Design”, doktorska disertacija, *Tallinn University of Technology*, Estonija, novembar 2016.
- [37] L. Stojić, V. Milenković, T. Šekara, M. Rapaić, “Uporedna analiza kriterijuma optimalnosti za projektovanje PID regulatora pod ograničenjima na robusnost i osjetljivost na merni šum”, *Infoteh*, Jahorina , vol. 16, mart 2017, pp. 669-674