

**UNIVERZITET CRNE GORE**  
**ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET PODGORICA**

MSc Mihailo Micev

**Novi pristupi u identifikaciji i optimizaciji  
parametara glavnih komponenti sistema  
za regulaciju pobude sinhronih  
generatora**

– Doktorska disertacija –

Podgorica, 2023. godine

**UNIVERSITY OF MONTENEGRO**  
**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING**

MSc Mihailo Micev

**Novel approaches for identification and  
parameters optimization of main  
components of synchronous generators'  
excitation control system**

– Doctoral dissertation –

Podgorica, 2023 year

## PODACI O DOKTORANDU, MENTORIMA I ČLANOVIMA KOMISIJE

<b>PODACI O DOKTORANDU:</b>	
<b>Ime i prezime:</b>	Mihailo Micev
<b>Datum i mjesto rođenja:</b>	01. 11. 1995. godine, Podgorica, Crna Gora
<b>Naziv završenog studijskog programa:</b>	Energetika i automatika, Automatika
<b>Godina završetka:</b>	2017
<b>MENTOR:</b>	dr Martin Čalasan, vanredni profesor, Univerzitet Crne Gore, Elektrotehnički fakultet, Podgorica
<b>KOMENTOR:</b>	dr Milovan Radulović, redovni profesor, Univerzitet Crne Gore, Elektrotehnički fakultet, Podgorica
<b>KOMISIJA ZA ODBRANU DOKTORSKE DISERTACIJE:</b>	<b>Prof. dr Vladan Vujičić,</b> Univerzitet Crne Gore, Elektrotehnički fakultet, predsjednik  <b>Prof. dr Dušan Stipanović,</b> University of Illinois Urbana-Champaign, The Grainger College of Engineering, član  <b>Prof. dr Gojko Joksimović,</b> Univerzitet Crne Gore, Elektrotehnički fakultet, član  <b>Prof. dr Martin Čalasan,</b> Univerzitet Crne Gore, Elektrotehnički fakultet, mentor  <b>Prof. dr Milovan Radulović,</b> Univerzitet Crne Gore, Elektrotehnički fakultet, komentor
<b>Datum odbrane:</b>	18. 03. 2024. godine

## ZAHVALNICA

Neizmjernu zahvalnost dugujem mom mentoru doc. dr Martinu Čalasanu i komentoru prof. dr Milovanu Raduloviću na ogromnoj pomoći i podršci, brojnim idejama, savjetima i sugestijama, kao i beskrajnom strpljenju prilikom izrade ove disertacije. Prije svega dobrim ljudima, a zatim i pravim prijateljima, sjajnim profesorima i naučnicima, zahvaljujem na ukazanom povjerenju i pruženoj prilici da saradujem sa njima i da se bavim ovom izuzetno aktuelnom problematikom.

Svojim roditeljima Branku i Slavici, kao i bratu Milanu, dugujem veliku zahvalnost na stalnoj, ogromnoj i bezrezervnoj podršci, kao i na nezamjenjivoj pomoći da izgradim svoj životni put. Bez pružene bezuslovne potpore, oslonca, kao i riječi ohrabivanja od strane moje porodice tokom cijelog odrastanja i školovanja sigurno ne bih bio tu gdje sam sad.

Najprije za bezuslovnu emotivnu, a zatim i u svim drugim životnim sferama neopisivo jaku podršku, za brojna odricanja, za nezamjenjive riječi ohrabivanja i potpore, za zajedničko proživljavanje cjelokupnog procesa izrade ove disertacije, za ogromnu dozu strpljenja, kao i za nepokolebljivu vjeru u mene, ogromnu zahvalnost dugujem mojoj Jovani.

Mojim iskrenim i pravim prijateljima Miljanu i Nemanji zahvaljujem za ogromno i bezuslovno povjerenje, za jake riječi ohrabivanja, za zajednička druženja, kao i za stalnu moralnu podršku prilikom izrade ove disertacije.

Veliku zahvalnost upućujem i prof. dr Vladanu Vujičiću na brojnim korisnim savjetima i sugestijama prilikom izrade ove disertacije. Takođe, veoma se zahvaljujem na saradnji i pomoći prof. dr Draganu Petroviću i doc. dr Bogdanu Brkoviću sa Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu.

Izuzetno sam zahvalan kolegama iz Elektroprivrede Crne Gore – Bošku Božoviću, Danilu Mujičiću, Nikoli Dakoviću, Gojku Blagojeviću i Igoru Todoroviću, za pruženu pomoć prilikom sprovođenja eksperimentalnih testova u hidroelektrani „Piva“.

## PODACI O DOKTORSKOJ DISERTACIJI

<b>Naziv doktorskih studija:</b>	Doktorske studije elektrotehnike
<b>Naziv doktorske disertacije:</b>	Novi pristupi u identifikaciji i optimizaciji parametara glavnih komponenti sistema za regulaciju pobude sinhronih generatora
<b>Datum prijave disertacije:</b>	15. 12. 2021. godine
<b>Ključne riječi:</b>	Sinhroni generator, pobudni sistem, sistem za regulaciju pobude, metaheuristički algoritmi, neuralne mreže
<b>Naučna oblast:</b>	Automatika i industrijska elektrotehnika
<b>Uža naučna oblast:</b>	Električne mašine i automatika

## REZIME

Predmet istraživanja ove doktorske disertacije jeste predlog novih pristupa za identifikaciju i optimizaciju parametara glavnih komponenti sistema za regulaciju pobude sinhronog generatora. U tom cilju predloženi su novi hibridni i adaptivni metaheuristički algoritmi, kao i nove kriterijumske funkcije, u cilju optimizacije parametara različitih tipova regulatora kod standardne uprošćene šeme sistema za regulaciju napona. Takođe, predložen je i novi tip regulatora, koji je implementiran u simulacionom modelu koji modeluje potpunu šemu sistema za regulaciju pobude sinhronog generatora. Optimizacija parametara predloženog regulatora izvršena je pomoću novog adaptivnog metaheurističkog algoritma, pri čemu je kriterijumska funkcija formulisana tako da obezbijedi adekvatan dinamički odziv sistema, kao i suzbijanje poremećaja i mjernog šuma. Osim toga, u disertaciji su predložene modifikacije standardne testne procedure za određivanje parametara sinhronog generatora. Predložene modifikacije zasnivaju se na upotrebi metaheurističkih algoritama, kao zamjene za grafičku metodu, u cilju određivanja parametara generatora na osnovu talasnih oblika struje pobude i struje armature snimljene tokom trofaznog kratkog spoja. U disertaciji su razmatrani slučajevi kada se struje pobude i struje armature računaju korišćenjem uprošćenih izraza, ali i primjenom potpunih izraza, koji ne zanemaruju pojedine parametre generatora. Štaviše, u

ovoj disertaciji je predložen novi pristup za estimaciju parametara komponenti uprošćenih šema sistema za regulaciju napona, koji uključuje jednostavnu i po mašinu bezbjednu testnu proceduru. Primjenom predloženog pristupa određeni su neki od najvažnijih realnih parametara sinhronog generatora. Takođe, u ovoj disertaciji je pokazana i primjena *black-box* modelovanja kod sistema za regulaciju pobude sinhronog generatora. Razvijeni su modeli bazirani na neuralnim mrežama, pomoću kojih su modelovane relacije između napona pobude i izlaznog napona generatora, kao i između referentne vrijednosti napona i napona na izlazu generatora. Na kraju, u disertaciji je pokazana kako simulaciona, tako i eksperimentalna verifikacija predloženih metoda. Prikazani su rezultati eksperimenata koji su sprovedeni na realnim sinhronim generatorima u hidroelektranama „Piva“ i „Bajina Bašta“.

**UDK:**

## INFORMATION ON DOCTORAL DISSERTATION

<b>Doctoral studies:</b>	Doctoral studies of electrical engineering
<b>Dissertation title:</b>	Novel approaches for identification and parameters optimization of main components of synchronous generators' excitation regulation system
<b>Date of thesis registration:</b>	15. 12. 2021.
<b>Key words:</b>	Synchronous generator, excitation system, system for excitation control, metaheuristic algorithms, neural networks
<b>Scientific area:</b>	Automation and industrial electrotechnics
<b>Specific scientific area:</b>	Electrical machines and automation

## ABSTRACT

The subject of research of this doctoral dissertation is the proposal of the novel approaches for identification and parameters optimization of the main components of the synchronous generators' excitation regulation system. To that end, new hybrid and adaptive metaheuristic algorithms, as well as new criterion functions, are proposed in order to optimize the parameters of different types of controllers for standard simplified scheme of automatic voltage regulation system. Also, a novel type of the controller is proposed, which is implemented in the simulation model of the complete system for excitation regulation of synchronous generators. The optimization of proposed controller's parameters is carried out using novel adaptive metaheuristic algorithm, where the criterion function is formulated to provide an adequate dynamic response of the system, as well as to suppress the disturbances and measurement noise. In addition, the modifications of standardized test procedure for determining generator's parameters are proposed in this dissertation. The proposed modifications are based on the usage of metaheuristic algorithms, as the substitutions for graphical method, for determining generator's parameters based on field current and armature current waveforms recorded during the three-phase short-circuit. In this

dissertation, various cases are considered – when excitation and armature currents are calculated using simplified expressions, but also using complete expressions, which do not neglect individual parameters of the generator. Moreover, in this dissertation, a novel approach for the estimation of the parameters of the components of the simplified schemes of automatic voltage regulation system, which includes a simple and machine safe test procedure, is proposed. By applying the proposed approach, some of the most important real parameters of the synchronous generator are determined. Also, this dissertation demonstrates the application of black-box modeling in the system for regulating the excitation of a synchronous generator. Models based on neural networks, which provide the relation between the excitation voltage and the output voltage of the generator, as well as between the reference voltage and the output voltage, are developed. At the end, the dissertation provides simulation and experimental verification of the proposed methods. The results of the experiments, which are carried out on real synchronous generators in hydropower plants „Piva“ and „Bajina Basta“, are presented.

**UDK:**



## Predgovor

Sinhronne mašine (SM) predstavljaju najveće proizvođače električne energije u elektroenergetskom sistemu (EES). Sa druge strane, sinhronne mašine su veoma važne prilikom regulacije frekvencije i napona, kao i tokova snaga u EES-u. Zbog izuzetnog značaja za funkcionisanje EES-a, sinhronne mašine su veoma popularne i predstavljaju predmet istraživanja velikog broja naučnih publikacija.

Analiza rada i proučavanje značaja sinhronne mašine u elektroenergetskim sistemima podrazumijeva tačno poznavanje modela same mašine, kao i svih regulacionih kontura kojima ona pripada. S tim u vezi, veoma je važno poznavati što precizniji matematički model mašine, kao i njegove uprošćene varijante. Drugim riječima, izuzetno je važno baviti se istraživanjem različitih testnih procedura za određivanje parametara sinhronne mašine, kao i svih ostalih komponenti sistema za regulaciju pobude. Takođe, veoma je važno adekvatno projektovati odgovarajući regulator, pomoću kojeg se postižu što je moguće bolje performanse primjene SM u EES-u, posebno sa stanovišta djelovanja na EES u cilju stabilizacije napona usljed dejstva poremećaja i mjernih šumova.

Uporna, obimna i istrajna naučna istraživanja iz oblasti identifikacije i optimizacije parametara glavnih komponenti sistema za regulaciju pobude sinhronog generatora sprovedena su u tri pravca (cjeline). U prvoj, ujedno najobimnijoj cjelini, razmatrana je problematika optimalnog dizajna regulatora za pojednostavljenu šemu sistema za regulaciju napona sinhronog generatora. U cilju optimizacije parametara raznih tipova regulatora, predložena je primjena novih kriterijumskih funkcija, kao i hibridnih i adaptivnih varijanti metaheurističkih algoritama. Druga cjelina ove disertacije bavi se estimacijom parametara sinhronog generatora, kao i komponenti uprošćene šeme sistema za automatsku regulaciju napona. Konkretno, u disertaciji su predložene nove hibridne i adaptivne modifikacije metaheurističkih algoritama, sa ciljem poboljšanja postojećih standardnih pristupa za estimaciju parametara sinhronog generatora. Predloženi pristupi se baziraju na aproksimativnim i potpunim izrazima za struje pobude i armature tokom kratkog spoja. Dodatno, u cilju određivanja parametara komponenti uprošćenih šema sistema za regulaciju napona, predložena je nova testna procedura, koja pokazuje brojne prednosti u odnosu na postojeće. Takođe, primjenom pomenutog pristupa, moguće je odrediti parametre samog

sinhronog generatora. Finalno, u trećoj cjelini ove doktorske disertacije, predloženi su pristupi koji omogućavaju modelovanje relacija između napona pobude i izlaznog napona generatora, kao i između referentne vrijednosti i izlaznog napona generatora, bazirani na primjeni neuralnih mreža.

S obzirom na prirodu tematike ove disertacije, kao i ideje i motivaciju za rad i istraživanje, jasno je da je poseban i nezaobilazan zahtjev pri izradi ove doktorske disertacije predstavljalo i eksperimentalno testiranje sistema za regulaciju pobude sinhronih generatora. Eksperimentalni rezultati prikazani u ovoj disertaciji dobijeni su sprovođenjem odgovarajućih testova na realnim sinhronim generatorima u hidroelektranama „Piva“ i „Bajina Bašta“.

Na samom kraju, može se istaći da je naučno-istraživački rad prezentovan u ovoj disertaciji samo početak budućih istraživanja. Zbog toga, može se reći da ova disertacija predstavlja dobru osnovu za buduća istraživanja i usavršavanja.

U Podgorici, oktobar 2023. godine

## Izvod teze

Regulacija napona i tokova reaktivnih snaga u elektroenergetskom sistemu predstavlja jedan od najvažnijih zadataka prilikom funkcionisanja samog sistema. Sinhroni generator, kao najveći proizvođač električne energije u elektroenergetskom sistemu, predstavlja najvažnije naponsko-reaktivno regulaciono sredstvo. Stoga, sistem za automatsku regulaciju pobude, kojim se napon generatora održava na željenoj vrijednosti, veoma je interesantna i aktuelna tema naučnih istraživanja. U ovoj disertaciji posvećena je pažnja razvoju novih pristupa za identifikaciju i optimizaciju parametara glavnih komponenti sistema za regulaciju pobude sinhronog generatora.

Posmatrajući kompletnu strukturu sistema za regulaciju pobude sinhronog generatora, jasno je da regulator predstavlja jednu od glavnih komponenti pomenutog sistema. Stoga, veliki broj naučnih radova je posvećen optimalnom dizajnu različitih tipova regulatora pobudnih sistema. Preciznije, u dostupnoj literaturi, prilikom optimizacije parametara regulatora autori koriste uprošćenu šemu sistema za automatsku regulaciju napona. U pomenutoj literaturi, za optimizaciju parametara regulatora, predložen je veliki broj optimizacionih metoda baziranih na metaheurističkim algoritmima, kao i kriterijumskih funkcija. Najveći broj postojećih kriterijumskih funkcija ima za cilj postizanje što kvalitetnijeg dinamičkog odziva napona generatora, tj. minimizaciju vremena uspona, vremena smirenja, preskoka, itd. U cilju optimalnog dizajna različitih tipova regulatora, u ovoj disertaciji predložene su nove hibridne i adaptivne varijante metaheurističkih algoritama. Takođe, u disertaciji su predložene nove kriterijumske funkcije, čijom primjenom u toku optimizacionog postupka se teži postizanju što manjeg vremena smirenja, vremena uspona i preskoka kod dinamičkog odziva napona generatora. Dobijeni rezultati su jasno pokazali da su predloženi metaheuristički algoritmi superiorniji od drugih metaheurističkih algoritama iz literature korišćenih za poređenje, sa aspekta brzine konvergencije i kvaliteta dobijenih rezultata. Takođe, dinamički odziv napona generatora ima bolje performanse u slučajevima kada se primjene parametri regulatora određeni predloženim algoritmima. Dodatno, za razliku od svih razmatranih naučnih radova u kojima se koristi uprošćena šema, u ovoj disertaciji je razmatran simulacioni model kompletnog sistema za regulaciju pobude, koji uključuje sve dodatne funkcionalne blokove. Simulacioni model je napravljen na osnovu tehničke dokumentacije pobudnog sistema sinhronog generatora snage od 40 MVA iz

hidroelektrane „Perućica“. Novi tip regulatora je predložen za pomenuti kompletni model sistema za regulaciju pobude. Takođe, parametri predloženog tipa regulatora su optimizovani pomoću novog adaptivnog metaheurističkog algoritma i primjenom nove kriterijumske funkcije. Kriterijumi prilikom optimizacije su postizanje što kvalitetnijeg dinamičkog odziva napona generatora, kao i suzbijanje poremećaja i mjernog šuma. Pokazano je da primjena predloženog tipa regulatora dovodi do superiornijih performansi sistema u odnosu na slučajeve kada se koriste konvencionalni regulatori pobudnih sistema.

Veoma važan dio ove disertacije posvećen je estimaciji parametara sinhronog generatora. Naime, u disertaciji su predloženi pristupi za estimaciju parametara sinhronog generatora koji su bazirani na standardnom testu trofaznog kratkog spoja. Predloženi pristupi su zasnovani na eksperimentalno snimljenim talasnim oblicima struje pobude i struje armature snimljenim tokom trajanja trofaznog kratkog spoja. Eksperimentalni test trofaznog kratkog spoja sproveden je na generatoru snage od 109.6 MVA iz hidroelektrane „Bajina Bašta“. Parametri generatora su estimirani primjenom novih hibridnih i adaptivnih metaheurističkih algoritama. Kriterijumska funkcija je formulisana sa ciljem postizanja minimalnog odstupanja proračunatog talasnog oblika struja od odgovarajućih eksperimentalno snimljenih talasnih oblika. U cilju izračunavanja talasnih oblika struja pobude i armature tokom kratkog spoja, korišćeni su uprošćeni, ali i potpuni matematički izrazi. Na osnovu poređenja sa eksperimentalno snimljenim talasnim oblicima, pokazano je da predloženi pristupi omogućavaju precizniju i pouzdaniju estimaciju parametara generatora u odnosu na druge metode iz literature. Dodatno, u okviru ove disertacije predložen je novi pristup za estimaciju parametara komponenti uprošćenih šema sistema za regulaciju napona. Predloženi pristup obuhvata novu testnu proceduru, koja je veoma jednostavna, praktična za izvođenje i ne zahtijeva isključivanje generatora sa mreže. Naime, predložena procedura se sastoji od dodavanja step smetnje male amplitude na referentni napon generatora i snimanja odziva napona generatora u takvom režimu rada. Nakon toga, primjenom metaheurističkih algoritama, sprovedena je estimacija parametara komponenti uprošćenih šema sistema za regulaciju napona. Kriterijumska funkcija je definisana kao minimizacija kvadrata greške između odziva napona dobijenog primjenom uprošćenih modela i odgovarajućeg snimljenog odziva. Parametri su estimirani za dva slučaja – u prvom slučaju je generator modelovan sistemom prvog reda, dok je u drugom slučaju korišćen model generatora trećeg reda. U drugom slučaju, kada je korišćen model generatora trećeg reda, tzv. *Heffron-Phillips*-ov model, određeni su neki realni fizički parametri sinhronog generatora.

Predloženi pristup je verifikovan koristeći eksperimentalno snimljene odzive generatora snage od 120 MVA iz hidroelektrane „Piva“, u režimu rada pod opterećenjem. Prikazani rezultati su pokazali veliki stepen poklapanju između snimljenog odziva napona i odziva koji je dobijen primjenom uprošćenih šema, a čime je i samim tim dokazana tačnost estimiranih parametara.

U okviru ove doktorske disertacije demonstrirana je primjena *black-box* modelovanja kod sistema za automatsku regulaciju pobude sinhronog generatora. Naime, u disertaciji je značajna pažnja posvećena razvoju modela baziranih na neuralnim mrežama. Pri tome, prvi razvijeni model služi za reprezentaciju veze između napona pobude i izlaznog napona generatora, pri čemu je pomenutim modelom obuhvaćen samo sinhroni generator. Drugi razvijeni model omogućava modelovanje relacije između referentnog napona generatora i izlaznog napona generatora, čime je obuhvaćen kompletan sistem za regulaciju pobude. Ulazni i izlazni setovi podataka za obučavanje, kao i za validaciju neuralnih mreža, dobijeni su pomoću nove predložene eksperimentalne testne procedure, opisane u prethodnom segmentu. Predloženi pristupi su verifikovani koristeći eksperimentalno snimljene podatke. Za ovaj dio istraživanja eksperimenti su sprovedeni na generatoru snage od 120 MVA u hidroelektrani „Piva“. Dobijeni rezultati su pokazali veliki stepen poklapanja odziva napona generatora dobijenog pomoću neuralnih mreža sa eksperimentalno snimljenim odzivom. Komparativna analiza je pokazala superiornost neuralnih mreža u odnosu na druge često korišćene modele (nelinearni autoregresioni model sa spoljnim ulazom, *Hammerstein-Wiener* model i model prenosne funkcije).

## Thesis overview

Regulation of voltage and reactive power flows in the electric power system represents one of the main tasks during the functioning of the system. A synchronous generator, as the largest electrical energy producer in the power system, represents the most important voltage-reactive regulation device. Therefore, the system for automatic excitation regulation, which is used for maintaining the generator's voltage on the desired value, is very interesting and current topic for scientific research. In this dissertation, the attention is dedicated to the development of the novel approaches for the identification and optimization of the parameters of main components of the system for synchronous generator's excitation regulation.

Observing the complete structure of the system for regulation of excitation of synchronous generator, it is evident that the controller represents one of the main components of the mentioned system. Therefore, a significant number of scientific papers is dedicated to the optimal design of different types of the controllers for the excitation system. To be precise, in the available literature, the authors apply simplified block diagram of the system for automatic voltage regulation (AVR) when they deal with the optimization of controller's parameters. In the mentioned literature, there are many optimization methods based on the metaheuristic algorithms, as well as the criterion functions, which are proposed for the optimization of controller's parameters. Most of the existing criterion functions have the goal to improve the quality of the generator's voltage dynamic response, i.e. to minimize the rise time, settling time, overshoot, etc. In this dissertation, novel hybrid and adaptive variants of metaheuristic algorithms are proposed for the optimal design of various types of controllers. Also, novel criterion functions, which minimize the settling time, rise time, and overshoot of generator's voltage dynamic response, are proposed in this dissertation. The obtained results clearly showed that the proposed metaheuristic algorithms are superior compared with other metaheuristic algorithms from the literature used for comparison, in terms of the convergence speed and quality of obtained results. Also, the dynamic response of generator's voltage has better performances in cases when the parameters determined with the proposed algorithms are used. Additionally, unlike all of the considered scientific papers where the simplified diagram is used, in this dissertation the simulation model of the complete system for the excitation regulation, which includes all of the additional functional

blocks, is considered. Simulation model is built based on the technical documentation of the excitation system of the 40 MVA synchronous generator from hydropower plant „Perucica“. The novel type of the controller is proposed for the mentioned complete model of the system for the regulation of excitation. Also, the parameters of the proposed type of the controller are optimized using novel adaptive metaheuristic algorithm and novel criterion function. During the optimization, the criteria is to achieve the most possible quality of generator's voltage dynamic response, as well as to mitigate the disturbance and measurement noise. It was demonstrated that the application of the proposed type of controller leads to the superior performances of the system compared with the cases when the conventional types of excitation system controllers are used.

Very important part of this dissertation is dedicated to the estimation of synchronous generator's parameters. Namely, the approaches for the estimation of synchronous generator's parameters, which are based on the standard three-phase short-circuit test, are proposed in this dissertation. The proposed approaches rely on the experimentally recorded waveforms of field current and armature current during the short-circuit. The three-phase short-circuit experimental test is carried out on the 109.6 MVA synchronous generator in hydropower plant „Bajina Basta“. The parameters of the generator were estimated using novel hybrid and adaptive metaheuristic algorithms. The criterion function was formulated in order to achieve minimal deviation between calculated waveforms of the currents and the corresponding experimentally recorded waveforms. In order to obtain the calculated waveforms of field and armature current during the short-circuit, both simplified and full mathematical expressions were applied. Based on the comparison with the experimentally recorded waveforms, it was demonstrated that the proposed approaches provide more accurate and more reliable estimation of the generator's parameters compared with the other approaches from the literature. Additionally, a novel approach for parameters estimation of simplified schemes of the AVR system is proposed in this dissertation. The proposed approach comprises novel test procedure, which is very simple, practical for conducting, and does not require the disconnection of the generator from the grid. Namely, the proposed procedure consists of the addition of the small-amplitude step disturbance on the reference voltage, and recording the generator's voltage response during that operation mode. Afterward, the parameters of the components of simplified AVR schemes were estimated using metaheuristic algorithms. The criterion function is defined to minimize the squared error between the voltage response obtained using simplified models and corresponding

recorded voltage. The parameters were estimated in two cases – in the first case the generator is modeled as the first-order system, while in the second case the third-order model of the generator is applied. In the second case, when the third-order model or so-called Heffron-Phillips model is applied, some of the real physical parameters of the synchronous generator were determined. The proposed approach is verified using experimentally obtained responses of the 120 MVA generator from hydropower plant „Piva“, in the loaded operation mode. The presented results demonstrated the great degree of matching between the recorded voltage response and the voltage response obtained using the simplified schemes. Therefore, the accuracy of the estimated parameters was proven.

Within this doctoral dissertation, the application of black-box modeling in the system for the automatic regulation of synchronous generator's excitation was demonstrated. Namely, the significant attention in this dissertation is paid to the development of the models based on the neural networks. Thereby, the first developed model serves to represent the relation between the field voltage and the output voltage of the generator, by which only generator is comprised. The second developed model provides modeling the relation between generator's reference voltage and the generator's output voltage, by which the complete system for excitation regulation is comprised. The input and output datasets for training, as well as for the validation of neural networks, are obtained using the novel proposed experimental test procedure, described in the previous segment. The proposed approaches are verified using experimentally recorded data. For this part of the research, the experiments are carried out on the 120 MVA generator in hydropower plant „Piva“. The obtained results showed the great degree of matching between the generator's voltage response obtained using neural networks and the experimentally recorded voltage. Comparative analysis proved the superiority of neural networks compared with the other frequently used models (nonlinear autoregression with exogenous input, Hammerstein-Wiener and transfer function model).



# SADRŽAJ

Uvod.....	1
Poglavlje 1.....	10
Sistemi za regulaciju pobude sinhronih mašina .....	10
1.1 Opšta konfiguracija sistema za regulaciju pobude .....	10
1.2 Regulatori pobude i dodatni funkcionalni blokovi.....	13
1.2.1 Podjela i realizacija regulatora pobude .....	13
1.2.2 Matematički modeli regulatora .....	19
1.2.3 Limiteri i dodatni signali kod sistema za regulaciju pobude .....	26
1.2.4 Uređaji za mjerenje kod sistema za regulaciju pobude .....	31
1.3 Pobudnica kod sistema za regulaciju pobude .....	32
1.3.1 Opšte napomene .....	32
1.3.2 Matematički modeli pobudnica .....	33
1.4 Sinhroni generator.....	39
1.4.1 Konstrukcija, princip rada i vrste sinhronog generatora .....	39
1.4.2 Matematičko modelovanje sinhronog generatora .....	41
1.5 Tipovi pobudnih sistema .....	48
1.5.1 Jednosmjerni (DC) sistemi pobude.....	48
1.5.2 Nezavisni naizmjenični (AC) pobudni sistemi.....	49
1.5.3 Statički naizmjenični (ST) sistemi samopobude .....	51
1.6 Uprošćena struktura sistema za regulaciju pobude .....	54
Poglavlje 2 .....	58
Metaheuristički algoritmi i vještačke neuralne mreže .....	58
2.1 Metaheuristički algoritmi.....	58

2.1.1 Optimizacioni problem i metode optimizacije .....	58
2.1.2 Osnovni koncepti i podjele metaheurističkih algoritama.....	59
2.1.3 Osnovni metaheuristički algoritmi korišćeni u ovoj disertaciji .....	63
2.1.4 Hibridne i modifikovane verzije metaheurističkih algoritama .....	85
2.2 Vještačke neuralne mreže ( <i>Artificial Neural Networks</i> – ANN) .....	89
2.2.1 Opšte napomene o neuralnim mrežama .....	89
2.2.2 Matematičko modelovanje vještačkih neuralnih mreža .....	90
2.2.3 Obučavanje neuralnih mreža.....	92
Poglavlje 3 .....	95
Predlog nove strukture i dizajna regulatora pobudnih sistema sinhronih mašina ...	95
3.1 Optimalni dizajn regulatora za uprošćenu šemu sistema za regulaciju napona sinhronog generatora.....	95
3.1.1 Optimalni dizajn idealnog PID regulatora.....	96
3.1.2 Optimalni dizajn realnog PID regulatora .....	102
3.1.3 Optimalni dizajn FOPID regulatora.....	107
3.1.4 Optimalni dizajn PIDD <sup>2</sup> regulatora .....	114
3.1.5 Optimalni dizajn PIDD <sup>2</sup> regulatora sa limiterom napona pobude.....	118
3.2 Predlog nove strukture regulatora za potpunu šemu sistema za regulaciju pobude sinhronog generatora .....	124
3.2.1 Simulacioni model sistema za regulaciju pobude .....	125
3.2.2 Opis predloženog regulatora .....	127
3.2.3 Rezultati simulacija .....	128
Poglavlje 4 .....	135
Modifikacija standardnih procedura za određivanje parametara sinhronih mašina .....	135
4.1 Opis korišćene eksperimentalne postavke i procedure.....	135

4.2 Estimacija parametara sinhronog generatora korišćenjem približnih analitičkih izraza .....	138
4.2.1 Estimacija parametara sinhronog generatora korišćenjem približnog analitičkog izraza za struju pobude .....	138
4.2.2 Estimacija parametara sinhronog generatora korišćenjem približnog analitičkog izraza za struju armature .....	143
4.3 Estimacija parametara sinhronog generatora korišćenjem potpunih izraza za struju pobude i struju armature .....	153
4.3.1 Estimacija parametara sinhronog generatora korišćenjem potpunog izraza za struju armature .....	155
4.3.2 Estimacija parametara sinhronog generatora korišćenjem potpunog izraza za struju pobude .....	160
Poglavlje 5 .....	165
Predlog novog pristupa za određivanja parametara komponenti sistema za regulaciju napona sinhronog generatora .....	165
5.1 Estimacija parametara komponenti sistema za regulaciju napona koristeći simulacioni model .....	165
5.1.1 Estimacija parametara prvog uprošćenog modela sistema za regulaciju napona .....	167
5.1.2 Estimacija parametara drugog uprošćenog modela sistema za regulaciju napona .....	169
5.2 Estimacija parametara komponenti sistema za regulaciju napona koristeći eksperimentalno snimljene rezultate .....	171
5.2.1 Estimacija parametara prvog uprošćenog modela sistema za regulaciju napona .....	175
5.2.2 Estimacija parametara drugog uprošćenog modela sistema za regulaciju napona .....	176
Poglavlje 6 .....	179

Primjeri <i>black-box</i> modelovanja u sistemima za regulaciju pobude sinhronog generatora .....	179
6.1 Opis eksperimentalne procedure .....	179
6.2 Modelovanje veze između napona pobude i napona na krajevima sinhronog generatora primjenom neuralnih mreža .....	180
6.3 Modelovanje veze između referentnog napona i napona na krajevima sinhronog generatora primjenom neuralnih mreža .....	186
Zaključak .....	193
Literatura .....	197

# Uvod

Elektroenergetski sistem (EES) predstavlja skup međusobno povezanih elemenata koji vrše pretvaranje drugih vidova energije u električnu energiju, prenosi tu električnu energiju do udaljenih centara potrošnje, transformiše je u formu pogodnu za isporuku potrošačima gdje se ona pretvara u druge neelektrične forme korisne energije [1]. Generalno, EES pripadaju klasi velikih, složenih i dinamičkih sistema, čija je glavna uloga sigurno, pouzdano i ekonomično snabdijevanje potrošača dovoljnim količinama električne energije propisanog kvaliteta. U cilju ostvarivanja navedene funkcije, savremeni elektroenergetski sistem sastoji se od skupa elektrana, vodova, transformatora i potrošača, koji su međusobno povezani tako da djeluju kao jedna cjelina. EES se može razdvojiti na četiri funkcionalno nezavisna, ali međusobno spregnuta podsistema – proizvodnja, prenos, distribucija i potrošnja. Podsystem proizvodnje čine generatorski kapaciteti u hidroelektranama (HE), termoelektranama (TE), nuklearnim elektranama (NE), kao i obnovljivi izvori električne energije, koji su nezaobilazan dio savremenih EES. Prenos karakteriše primjena vrlo visokih napona koji služe za transport električne energije od elektrana do velikih centara potrošnje. Podsystem distribucije ima funkciju raspodjele električne energije do krajnjih korisnika. Finalno, sistem potrošnje je raspodijeljen na veoma veliki broj krajnjih potrošača različitih snaga. Potrošači se napajaju preko potrošačkih mreža (instalacija), većinom na niskom naponu, dok se određeni potrošači (motori većih snaga) napajaju na srednjem naponu [1].

Napon i frekvencija predstavljaju osnovne indikatore stabilnosti elektroenergetskog sistema, kao i kvaliteta električne energije u istom. Vrijednost nominalne frekvencije je ista u čitavom sistemu, pa se stoga ona naziva globalnim parametrom. Sa druge strane, nominalna vrijednost napona varira u čvorovima sistema, pa se za napon može reći da je lokalni parametar. Frekvencija se održava na konstantnoj vrijednosti djelovanjem na turbinski regulator sinhronog generatora, čime se utiče na mehaničku snagu na osovini, odnosno na proizvodnju aktivne snage generatora. Regulacija napona je povezana sa tokovima reaktivne snage i ista se ostvaruje djelovanjem na pobudu sinhronog generatora ili uz pomoć drugih uređaja za regulaciju napona (kompenzatori, FACTS uređaji, itd.). Kompletan sistem čiji je

zadatak da održi izlazni napon generatora na željenoj vrijednosti naziva se sistem za regulaciju pobude (napona) sinhronog generatora [2].

Jedna od glavnih komponenti sistema za regulaciju pobude sinhronog generatora je regulator, koji je u praksi najčešće realizovan kao Proporcionalno-Integralni (PI) ili Proporcionalno-Integralno-Diferencijalni (PID) regulator. Primarna uloga regulatora je da minimizuje vrijednost greške u ustaljenom stanju, tj. da izlazni napon generatora bude što bliži referentnom, odnosno zadatom naponu. Osim toga, funkcija regulatora je da obezbijedi adekvatno dinamičko ponašanje sistema, tj. najbrži odziv (najmanje vrijeme uspona i vrijeme smirenja) uz najmanji mogući preskok. U dostupnoj literaturi predložen je veliki broj različitih tipova regulatora kod sistema za regulaciju pobude sinhronog generatora. Najčešće korišćeni tip regulatora kod pobudnih sistema sinhronog generatora je idealni PID regulator [3 – 16]. Filtriranjem diferencijalnog dejstva idealnog PID regulatora dobija se tzv. realni PID regulator, koji je primijenjen u [17 – 20]. Modifikacijom idealog PID regulatora, pri čemu redovi izvoda i integrala kod diferencijalnog i integralnog dejstva nisu cijeli već realni brojevi, dobija se FOPID (*Fractional-Order PID*) regulator. Primjena FOPID regulatora kod sistema za automatsku regulaciju napona sinhronog generatora pokazana je u [21 – 29], pri čemu je idealni FOPID regulator primijenjen u [21 – 28], dok je u [29] demonstrirana primjena realne varijante FOPID regulatora. Dodatno, važno je napomenuti da je u [22] predstavljena regulacija napona pomoću adaptivnog regulatora baziranog na referentnom modelu, tzv. FORMRAC (*Fractional-Order Model Reference Adaptive Control*). Ukoliko se klasični PID regulator proširi dodavanjem dvostrukog diferencijalnog dejstva dobija se PIDD<sup>2</sup> regulator, koji je u [30 – 33] primijenjen za regulaciju napona sinhronog generatora. Za razliku od [30 – 33] u kojima je korišćena idealna varijanta PIDD<sup>2</sup> regulatora, u [6] je demonstrirana primjena realnog PIDD<sup>2</sup> regulatora, odnosno PIDA (*PID Acceleration*) regulatora. Jedna od najnovijih modifikacija PID regulatora, četvero-parametarski PID regulator, primijenjen je u [34] u cilju regulacije napona. Modifikacije FOPID regulatora predložene su u [35 – 37], pri čemu autori u [35] koriste FVOPID (*Fractional Variable-Order PID*), odnosno FOPID regulator u digitalnoj formi, kod kojeg se red izvoda i integrala mijenjaju u vremenu. Dodatno, u [36, 37] predložen je FOPID regulator sa dodatim dvostrukim diferencijalnim dejstvom, odnosno FOPIDD<sup>2</sup> regulator. Razmatrajući moguće kombinacije prethodno pomenutih regulatora, autori u [38] predlažu PI<sup>1</sup>DND<sup>2</sup>N<sup>2</sup> regulator. U [39 – 41] predložen je PI regulator sa dva stepena slobode, odnosno 2-DOF PI regulator. U savremenoj automatici, izuzetno je popularna ADRC (*Active Disturbance Rejection Control*) tehnika, koja se koristi za dizajniranje

regulatora za sisteme sa nepoznatom dinamikom i spoljnim poremećajima. Primjena pomenute tehnika za dizajniranje regulatora pobude prikazana je u [42 – 43]. Takođe, jedan od najsavremenijih trendova u automatici i vještačkoj inteligenciji predstavlja tehnika pojačanog učenja, tzv. RL (*Reinforcement Learning*). Regulacija napona sinhronog generatora bazirana na tehnikama pojačanog učenja i dubokog pojačanog učenja (DRL – *Deep Reinforcement Learning*) prikazana je u [44] i [45], respektivno. Nastavak primjene tehnika vještačke inteligencije za regulaciju napona sinhronog generatora pokazan je u [46, 47], gdje je predložena primjena *fuzzy* PID regulatora. U svim navedenim radovima, osim same primjene odgovarajućeg regulatora, demonstrirano je i određivanje optimalnih vrijednosti parametara regulatora. Za većinu radova iz dostupne literature zajedničko je da se za određivanje optimalnih vrijednosti parametara regulatora koriste metaheuristički algoritmi. Ovi algoritmi, bazirani na prirodnim pojavama, predstavljaju veoma moderan i često korišćen alat za rješavanje različitih optimizacionih problema. Takođe, u svim navedenim radovima, optimizacija parametara regulatora sprovedena je na bazi određene kriterijumske funkcije. U najvećem broju dostupnih naučnih radova, kriterijumska funkcija je formulisana sa ciljem da se postigne što kvalitetniji prelazni proces – postizanje najmanjeg vremena uspona, vremena smirenja i preskoka. Veliki broj radova vezan za ovu tematiku ukazuje na to da i dalje nije predloženo najbolje moguće rješenje u vidu tipa regulatora, algoritma za optimizaciju njegovih parametara i kriterijumske funkcije korišćene u procesu optimizacije.

U ovoj disertaciji biće ponuđeni novi hibridni i adaptivni metaheuristički algoritmi za optimizaciju parametara različitih tipova regulatora kod sistema za regulaciju napona sinhronog generatora. Takođe, u cilju optimizacije parametara regulatora, biće predstavljene nove kriterijumske funkcije, koje će biti formulisane tako da obezbijede željeno dinamičko ponašanje sistema za regulaciju napona. Dodatno, u disertaciji će biti predložena nova struktura regulatora, koja je implementirana za potpunu šemu sistema za regulaciju pobude sinhronog generatora. Rezultati istraživanja ovog segmenta doktorske disertacije publikovani su u [48 – 52].

Sinhroni generatori su najvažniji i najveći proizvođači električne energije u elektroenergetskim sistemima. Studije stabilnosti elektroenergetskog sistema zahtijevaju poznavanje preciznih modela svih komponenti sistema, a samim tim i generatora. Takođe, studije koje se bave planiranjem i radom elektroenergetskog sistema bazirane su na računarskim modelima koji su sačinjeni od pojedinačnih modela svih elemenata

elektroenergetskog sistema (generatora, transformatora, dalekovoda, potrošača, itd.). Precizno poznavanje modela generatora je važno i za analizu prelaznih procesa u elektroenergetskom sistemu. Zbog svih prethodno nabrojanih razloga, jasno je da je poznavanje što preciznijeg i tačnijeg modela sinhronog generatora od ogromne važnosti, o čemu svjedoči i postojanje standardizovanih procedura za određivanje parametara sinhronog generatora – IEEE standard [53] i IEC standarda [54]. Osim toga, brojni naučni radovi su posvećeni problematici modelovanja, odnosno estimacije parametara sinhronog generatora. U radovima [55] i [56] unaprijeđen je testni metod koji se pominje u standardima i koji je baziran na naglom uklanjanju opterećenja generatora, tzv. *load rejection* metod. Korišćenjem sinhrofazorskih jedinica, odnosno tzv. PMU-a (*Phasor Measurement Unit*), mogu se dobiti podaci o amplitudi i faznom stavu napona u određenom dijelu elektroenergetskog sistema. Koristeći ove podatke, zajedno sa podacima o aktivnoj snazi i struji generatora, razvijene su brojne metode za estimaciju parametara sinhronog generatora [57 – 64]. U [65] predložena je praktična testna procedura koja se zasniva na mjerenju napona i struje armature i pobude generatora. Takođe, interesantno je spomenuti i tzv. *standstill* metode, koje su specifične po tome što se rotor generatora ne okreće, već je namotaj pobude kratkospojen, a na stator se dovode specifični signali: *chirp* signali u [66], odnosno *sine cardinal* signali u [67]. Još jedan unaprijeđeni standardizovani ogled, test trofaznog kratkog spoja neopterećenog generatora, predložen je u [68] i [69]. Estimacija parametara generatora korišćenjem mjerenih podataka tokom nesimetričnih radnih uslova predložena je u [70], dok je u [71] demonstriran numerički metod za estimaciju parametara generatora na osnovu talasnog oblika pobudne struje snimljene tokom trofaznog kratkog spoja. Na osnovu podataka dobijenih pomoću prikazanih metoda, primjenom raznih algoritama vrši se estimacija parametara generatora. Najčešće korišćen estimator baziran je na Kalmanovim filtrima i različitim modifikacijama ovih filtara, kao što se može vidjeti u [57 – 59], [64], [65] i [70]. Osim ovoga, metod najmanjih kvadrata (*Least Squares* – LS), uključujući i njegove modifikacije, primijenjen je u cilju estimacije parametara generatora na osnovu dobijenih podataka [55], [60]. U [56] i [69] pokazana je primjena tradicionalnog grafičkog metoda za dobijanje parametara generatora. Nakon toga, genetički algoritam je iskorišćen u [61], a *adaptive importance sampling* i *primal-dual interior point* su upotrijebljeni u [62] i [63], respektivno. Razvoj hibridnog genetičkog algoritma sa *Quasi Newton* i *Gauss Newton* algoritmom je demonstriran u [66] i [67]. Takođe, u [69] je pokazan način estimacije parametara generatora pomoću *Knitro* optimizacionog solvera.



Predlaganje velikog broja novih eksperimentalnih procedura i algoritama za određivanje parametara generatora dokazuje da u ovoj oblasti ima značajnog prostora za dalja istraživanja. Naime, primjetno je da određeni broj prethodno pomenutih testnih metoda zahtijeva injektiranje različitih signala, što znači da je za izvođenje takvog eksperimenta potrebna dodatna oprema. Na taj način, eksperimentalna postavka postaje značajno skuplja. Sa druge strane, neke metode zahtijevaju poznavanje vrijednosti ugla opterećenja, koja se u praksi ne može izmjeriti [72]. Standardizovani testovi kratkog spoja i izbacivanja opterećenja se uvijek moraju sprovesti prilikom ugrađivanja novog generatora, kao i prilikom revitalizacije ili remonta postojećeg generatora, što predstavlja njihovu značajnu prednost. Dodatno, ovi testovi su standardni i ne zahtijevaju nikakvu dodatnu opremu osim one koja već postoji u elektrani. Međutim, u IEEE i IEC standardima, ogled kratkog spoja se izvodi pri nominalnom naponu na krajevima generatora. Takođe, nakon dobijenog oscilograma struje kratkog spoja, IEEE standard predlaže grafički metod određivanja parametara baziran na konstrukciji i ekstrapolaciji anvelope talasnog oblika struje, koji je vrlo lako podložan greški.

U ovoj disertaciji biće predložene modifikovane testne procedure za estimaciju parametara generatora, koje su bazirane na standardizovanom ogledu trifaznog kratkog spoja. Međutim, za razliku od procedure predložene u IEEE standardu, ogled kratkog spoja će biti izveden pri sniženom naponu na krajevima generatora, u cilju izbjegavanja potencijalnih oštećenja namotaja armature. Na osnovu talasnih oblika struje pobude i struje armature tokom kratkog spoja, parametri generatora biće estimirani primjenom metaheurističkih algoritama, kako bi se prevazišli nedostaci grafičke metode koja je opisana u standardima. Na kraju, u ovoj disertaciji će biti korišćeni potpuni izrazi za struju pobude i struju armature, čime će biti omogućena estimacija većeg broja parametara generatora. U radovima [73 – 75] su prikazani rezultati istraživanja sprovedenih u okviru ovog segmenta doktorske disertacije.

Kod svih prethodno pomenutih radova koji se bave optimalnim dizajnom regulatora zajedničko je to da se koristi uprošćena šema sistema za regulaciju napona. Prema osnovnoj, uprošćenoj šemi, sistem za automatsku regulaciju napona sastoji se od regulatora, pojačavača, pobudnice, generatora i senzora [3 – 44, 46, 47]. U najvećem broju dostupnih radova, sve komponente, osim regulatora, modelovane su prenosnom funkcijom prvog reda [3 – 27, 29 – 44, 46, 47]. Prenosna funkcija komponenti sastoji se od pojačanja  $K$  i vremenske konstante

$T$ , pri čemu indeks precizira o kojoj se komponenti radi ( $A$  – pojačavač,  $E$  – pobudnica,  $G$  – generator i  $S$  – senzor). U najvećem broju radova autori predlažu jedan set vrijednosti parametara komponenti [3 – 27, 29 – 44, 46]. Za razliku od prethodno citiranih naučnih radova, autori u [15] razmatraju strukturu sistema za automatsku regulaciju napona uzimajući drugu vrijednost parametra  $K_G$ . Potpuno novi set parametara komponenti sistema za regulaciju pobude korišćen je u [16]. Takođe, u radu [28] sinhroni generator je predstavljen modelom trećeg reda, tzv. *Heffron-Phillips*-ovim modelom. U ovoj doktorskoj disertaciji biće izvršena estimacija parametara komponenti sistema za automatsku regulaciju napona, i to za dva slučaja – kada je generator predstavljen prenosnom funkcijom prvog reda, kao i prenosnom funkcijom trećeg reda. Dodatno, nakon estimacije parametara *Heffron-Phillips*-ovog modela generatora, određeni su i pojedini stvarni parametri sinhronog generatora. Estimacija parametara izvršena je primjenom metaheurističkih algoritama. Predložena testna procedura na osnovu koje se vrši estimacija parametara je veoma jednostavna za sprovođenje. Bazira se na snimanju referentne vrijednosti napona i izlaznog napona generatora kada se na referentnu vrijednost doda step smetnja male amplitude. Predloženi pristup će biti verifikovan koristeći eksperimentalno snimljene rezultate na realnom sinhronom generatoru snage od 120 MVA iz HE „Piva“, kao i primjenom simulacionog modela sistema za regulaciju pobude generatora snage od 40 MVA iz HE „Perućica“.

Najpoznatiji i najčešće korišćeni model sinhronog generatora je Parkov model, baziran na Parkovim transformacijama iz trofaznog u dvofazni koordinatni sistem. Shodno Parkovom modelu, sinhroni generator je modelovan pomoću dva električna kola, koja sadrže otpornosti i reaktanse. Sa druge strane, u [53 – 72] opisane su metode za određivanje parametara generatora koje zahtijevaju sprovođenje komplikovanih i zahtjevnih testnih procedura na samom generatoru. Suština regulacije napona sinhronog generatora bazira se na poznavanju veze između napona pobude i napona na krajevima generatora. Naime, određivanje pomenute matematičke relacije zahtjeva rješavanje sistema komplikovanih diferencijalnih jednačina.

U ovoj disertaciji predložen je novi pristup za određivanje relacije između napona pobude i napona na izlazu generatora, koji se bazira na tzv. modelu crne kutije, odnosno *black-box* modelu. Pomenuti modeli pokazuju niz prednosti, među kojima je najznačajnije pomenuti visok stepen preciznosti, lakoća optimizacije i velika brzina izvršavanja. Takođe, *black-box* modeli ne zahtijevaju veliku računsku moć. Ovakav tip modela ima za cilj da

obezbijedi mapiranje između ulaza (napona pobude) i izlaza (napona generatora), pri čemu ne poznaje „ponašanje“ samog generatora niti njegove fizičke karakteristike i parametre. Preciznije, u ovoj disertaciji će biti primijenjene vještačke neuralne mreže u cilju modelovanja veze između napona pobude i izlaznog napona generatora. Dodatno, u ovoj disertaciji biće primijenjena nova testna procedura, koja ne zahtijeva isključivanje generatora sa mreže, za razliku od brojnih postojećih testnih procedura koje služe za određivanje parametara generatora. Isključivanje generatora sa mreže je izuzetno nepoželjno iz više razloga – uzrokuje značajne ekonomske gubitke i dovodi do problema sa stabilnošću, pouzdanošću i radom kompletnog elektroenergetskog sistema. Predložena testna procedura se zasniva na uvođenju step smetnje na referentnu vrijednost napona i snimanju odziva napona pobude i izlaznog napona generatora u toku prelaznog procesa. Ovakva procedura je izuzetno jednostavna za sprovođenje, ne zahtijeva dodatnu opremu i ne utiče na tokove aktivnih snaga u sistemu. Predloženi pristup biće testiran koristeći eksperimentalne rezultate koji su snimljeni na 120 MVA sinhronom generatoru u HE „Piva“. Rezultati istraživanja iz ove oblasti disertacije objavljeni su u [76].

Osim poznavanja veze između napona pobude i izlaznog napona generatora, sa stanovišta EES-a važno je poznavati i vezu između referentnog napona i napona na krajevima generatora, čime je obuhvaćen kompletni sistem za automatsku regulaciju napona. U dostupnoj literaturi mogu se naći različiti pristupi koji se bave modelovanjem kompletnog sistema za automatsku regulaciju napona [77 – 81]. Naime, u [77] autori su predstavili uprošćeni model sistema za automatsku regulaciju napona, koji je dobijen korišćenjem tehnika redukcije sistema. Simultana identifikacija parametara pobudnog sistema i različitih modela sinhronog generatora korišćenjem genetičkog algoritma demonstrirana je u [78, 61]. U [78] identifikovani su parametri tri različita modela pobudnih sistema iz IEEE standarda: DC1 A, ST1 A i EXE, dok su u [61] korišćena mjerenja dobijena u toku rada generatora na mreži za identifikaciju parametara pobudnog sistema i generatora. U prethodno pomenutom radu, sinhroni generator je modelovan sistemom sedmog reda, dok je pobudni sistem predstavljen standardizovanim modelom IEEE Tip 1, koji pripada grupi statičkih sistema pobude. U [79] demonstrirana je identifikacija parametara komponenti sistema za regulaciju pobude, kod kojeg je korišćen idealni PID regulator, a pojačavač, pobudnica i senzor su predstavljeni prenosnim funkcijama prvog reda. U pomenutom radu razmatrani su modeli generatora prvog i trećeg reda. Međutim, autori nisu pokazali eksperimentalnu verifikaciju predloženog pristupa na realnom sinhronom generatoru. Takođe, veoma je važno pomenuti

pristupe za modelovanje sistema za regulaciju napona koji se baziraju na tehnikama vještačke inteligencije [80, 81]. Vještačke neuralne mreže, kao jedna od najpoznatijih tehnika vještačke inteligenciji, primijenjene su u [80] radi modelovanja kompletnog sistema za regulaciju napona, tj. određivanja prenosne funkcije između referentne vrijednosti napona i aktivne snage generatora. U pomenutom radu nisu prikazani nikakvih rezultati iz vremenskog domena, već samo grafička poređenja frekventnog odziva. *Takagi-Sugeno fuzzy* model sistema za automatsku regulaciju napona predložen je u [81], pri čemu je fuzzy model razvijen na osnovu ulazno-izlaznih podataka dobijenih pomoću simulacija. Prethodno pomenuti pristup ima dva nedostatka – nedostatak eksperimentalne validacije i primjenjivost samo za turbogeneratore, tj. generatore sa cilindričnim rotorom.

U okviru ove doktorske disertacije biće predložen pristup za modelovanje relacije između referentnog napona i napona na izlazu generatora pomoću neuralnih mreža. Ulazno-izlazni setovi podataka za obučavanje i validaciju neuralne mreže dobijaju se primjenom već opisane eksperimentalne testne procedure. Predloženi pristup će biti eksperimentalno verifikovan koristeći eksperimentalno snimljene naponske odzive generatora snage od 120 MVA koji se nalazi u HE „Piva“. Štaviše, rezultati dobijeni primjenom razvijenog modela koji je baziran na neuralnim mrežama će biti poređeni sa rezultatima koji su dobijeni primjenom drugih poznatih modela iz literature. U radu [82] publikovani su rezultati koji su dobijeni iz ovog segmenta doktorske disertacije.

U cilju adekvatnog prikaza dobijenih rezultata, ova doktorske disertacija je organizovana na sljedeći način:

**Prvo poglavlje** obuhvata elementarne informacije o sistemima za regulaciju pobude sinhronog generatora, kao što su: konfiguracija samog sistema, regulatori pobude i ostali funkcionalni blokovi, podjela i matematičko modelovanje pobudnica, konstrukcija, princip rada i modelovanje sinhronog generatora, zatim podjele, detaljni opisi i strukture različitih tipova pobudnih sistema, kao i prikaz uprošćenih struktura sistema za regulaciju napona.

**Drugo poglavlje** sadrži osnovne napomene o uopštenim problemima optimizacije i metaheurističkim algoritmima, kao i detaljne opise, matematičke formulacije, pseudokodove i dijagrame tokova svih metaheurističkih algoritama koji će biti korišćeni u disertaciji. Takođe, date su i osnovne informacije o vještačkim neuralnim mrežama.

U **trećem poglavlju** prikazani su rezultati optimizacije parametara različitih tipova regulatora za uprošćenu šemu sistema za automatsku regulaciju napona. U cilju optimalnog dizajna regulatora predloženi su novi hibridni i adaptivni metaheuristički algoritmi, kao i nove kriterijumske funkcije. Takođe, predložen je novi tip regulatora, koji je testiran za potpunu šemu sistema za regulaciju pobude, koja uključuje brojne dodatne funkcionalne blokove koje postoje kod realnih pobudnih sistema.

U **četvrtom poglavlju** su prikazani rezultati estimacije parametara sinhronog generatora pomoću novih predloženih pristupa u ovoj disertaciji. Naime, predloženi pristupi baziraju se na standardizovanom ogledu trofaznog kratkog spoja i ekstrakciji parametara primjenom metaheurističkih algoritama. Predloženi pristupi su verifikovani poređenjem sa ostalim pristupima iz literature, kao i korišćenjem eksperimentalno snimljenih rezultata.

U **petom poglavlju** ove disertacije predložen je novi pristup za određivanje parametara komponenti sistema za automatsku regulaciju napona, pri čemu se koriste uprošćene šeme opisane u prvom poglavlju. Novi pristup je baziran na izuzetno jednostavnoj i praktičnoj eksperimentalnoj testnoj proceduri, dok je proces estimacije izvršen primjenom metaheurističkih algoritama. Štaviše, pokazano je da se primjenom predloženog pristupa mogu odrediti neki od realnih parametara sinhronog generatora. Validacija predloženog pristupa sprovedena je korišćenjem kako simulacionih, tako i eksperimentalnih rezultata.

U **šestom poglavlju** su pokazani primjeri *black-box* modela kod sistema za regulaciju pobude sinhronog generatora. Preciznije, neuralne mreže su korišćene za modelovanje veze između napona pobude i izlaznog napona sinhronog generatora, kao i veze između referentnog napona i izlaznog napona generatora, čime su obuhvaćene sve komponente sistema za regulaciju pobude. Podaci za obučavanje i validaciju neuralnih mreža dobijeni su primjenom već opisane eksperimentalne testne procedure. Takođe, u ovom poglavlju je dato poređenje sa eksperimentalno snimljenim odzivima, kao i odzivima koji su dobijeni primjenom drugih literaturno poznatih modela.

Na kraju, u **zaključku** su istaknuti doprinosi ove disertacije i nabrojani su mogući pravci budućih istraživanja.

# Poglavlje 1

## Sistemi za regulaciju pobude sinhronih mašina

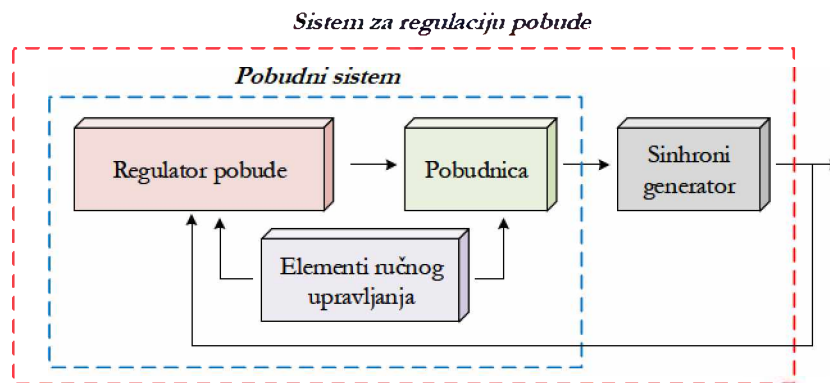
U ovom poglavlju date su osnovne informacije o sistemima za regulaciju pobude sinhronih mašina. Najprije je analiziran strukturni blok dijagram opšte konfiguracije sistema za regulaciju pobude, data je podjela pobudnih sistema, kao i osnovne karakteristike svakog tipa. Osim toga, opisani su i prikazani matematički modeli glavnih komponenti sistema za regulaciju pobude – regulator pobude, uz sve prateće funkcionalne blokove, pobudnica i sinhroni generator.

### 1.1 Opšta konfiguracija sistema za regulaciju pobude

Shodno definiciji različitih pojmova iz oblasti regulacije pobude sinhronih mašina koju je predložio Institut inženjera elektrotehnike i elektronike (*IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers*) [2, 83], sistem za regulaciju pobude sinhronne mašine obuhvata pobudni sistem i sinhronu mašinu, kao objekat regulacije. Takođe, prema definiciji datoj u [2, 83], pobudni sistem predstavlja izvor struje pobude koja je potrebna kako bi se napon na krajevima mašine održao na željenoj vrijednosti. Ovaj sistem obuhvata sljedeće elemente:

- regulator pobude (ili regulator napona),
- elemente ručnog upravljanja, mjerenja, zaštite i automatike,
- mašinu ili aparat za proizvodnju struje pobude (pobudnicu).

Na slici 1.1.1 prikazana je šema povezivanja osnovnih komponenti sistema za regulaciju pobude, sa ciljem grafičkog prikaza razlike između pobudnog sistema i sistema za regulaciju pobude.



Slika 1.1.1 Grafički prikaz razlike između pobudnog sistema i sistema za regulaciju pobude.

Regulacija napona na izlazu sinhronog generatora se vrši direktnim putem, pomoću regulacije indukovane elektromotorne sile (EMS) statora, tako što se reguliše struja pobude. Stoga, termini regulacija napona i regulacija pobude kod sinhronog generatora su potpuno ravnopravni. Za sinhroni generator kao objekat regulacije se može reći da ima složeni i multivarijabilni karakter jer regulacija napona ne utiče samo na izlazni napon, već i na struju, reaktivnu snagu i faktor snage na krajevima mašine.

Osnovni element pobudnog sistema je pobudnica, koja predstavlja izvor struje pobude. Pobudnica može biti realizovana kao:

- generator jednosmjerne struje sa sopstvenom ili nezavisnom pobudom,
- nezavisni sinhroni generator s ispravljačem ili
- ispravljač napajan sa krajeva sinhronog generatora.

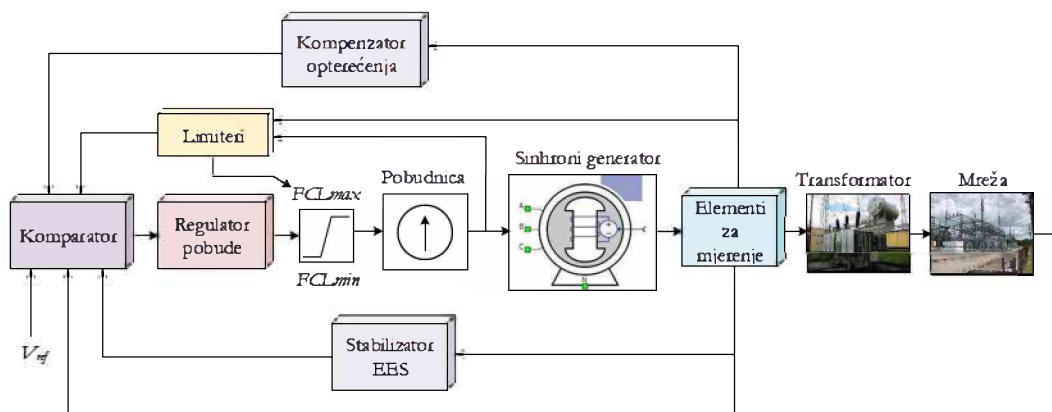
Glavna pobudnica predstavlja izvor jednosmjerne struje za pobudu sinhronne mašine, i njena snaga se u opštem slučaju kreće u opsegu od 0.5 % do 3 % nominalne snage odgovarajuće sinhronne mašine. Izvor struje za glavnu pobudnicu se naziva pomoćna pobudnica, i njena snaga je od 1.5 % do 5 % nominalne snage glavne pobudnice.

**Regulator napona ili regulator pobude** je standardni industrijski regulator, sa elementima stabilizacije, mjernim elementom, pomoćnim ulazima, pomoćnim blokovima za formiranje referentnog signala i različitim limiterima. Industrijski regulator može biti realizovan kao PID (proporcionalno-integralno-diferencijalni), PI (proporcionalno-integralni) ili kao *lead-ag* kompenzator [2].

**Uređaj za ručno upravljanje** predstavlja alternativni način upravljanje za slučaj kvara na automatskom regulatoru. Pomoću ručnog upravljanja, odgovarajući signal za promjenu pobude sinhronog generatora se najčešće dovodi kao ulaz direktno na pobudnicu.

**Sinhroni generator**, kao objekat upravljanja, posljednji je element sistema za regulaciju napona. Pobudni namotaj sinhronog generatora smješten je na rotoru, tj. u žljebovima rotora ako se radi o turbogeneratoru, odnosno na polovima ako je u pitanju hidrogenerator. U slučajevima kada je izvor struje pobude generator jednosmjerne struje, krajevi pobudnog namotaja su povezani sa pobudnicom preko kliznih prstenova i četkica. Nasuprot tome, direktna veza, koja ne uključuje prstenove i četkice, se ostvaruje kod obrtne ispravljačke pobudnice, koja je smještena na osovini rotora generatora.

Detaljan prikaz strukture sistema za regulaciju pobude sinhronog generatora dat je na slici 1.1.2. Sve komponente sistema za regulaciju pobude će detaljno biti opisane u narednim potpoglavljima.



Slika 1.1.2 Detaljan prikaz strukture sistema za regulaciju pobude

Tokom normalnog radnog režima elektroenergetskog sistema, regulacija pobude ima ulogu da promjenom pobudne struje sinhronog generatora omogući:

- 1) održavanje napona i/ili reaktivne snage na izlazu generatora na željenoj vrijednosti ili da omogući promjenu ovih veličina po unaprijed zadatom zakonu,
- 2) realizaciju željene raspodjele reaktivnog opterećenja između više sinhronih generatora koji rade u paralelnom radu.

Takođe, regulacija pobude sinhronog generatora ima veoma važnu ulogu u abnormalnim režimima rada. Zadatak regulacije pobude je tada da odži stabilnost elektroenergetskog



sistema. Zavisno od konkretne vrste kvara, pobudni sistem viši forsiranje pobude (tj. brzo povećanje vrijednosti pobudne struje, znatno iznad nominalne vrijednosti) ili brzu demagnetizaciju sinhronog generatora.

## **1.2 Regulatori pobude i dodatni funkcionalni blokovi**

Savremena izvedba regulatora pobude je veoma složen sistem koji prvenstveno omogućava regulaciju napona na krajevima sinhronog generatora. Osim toga, regulatorom pobude je obuhvaćen široki opseg upravljačkih, ograničavajućih i zaštitnih funkcija koje su neophodne da bi se zadovoljili zahtjevi performansi pri radu sinhronog generatora. Upravljački elementi imaju ulogu pri regulaciji pojedinih promjenljivih, ograničavajući elementi spriječavaju prekoračenje prethodno podešenih ograničenja tih promjenljivih. Na kraju, zadatak zaštitnih funkcija je da isključe pojedine komponente, ili pak sami generator, pri nastanku opasnih kvarova po mašinu [2].

### **1.2.1 Podjela i realizacija regulatora pobude**

Elementarna podjela regulatora pobude izvršena je prema načinu dejstva. Naime, prema vrsti dejstva regulatori pobude se dijele na ručne i automatske regulatore [2].

Ručni regulator pobude se najčešće koristi za stavljanje u pogon generatora, za razna ispitivanja, kao i u slučajevima kada je automatski regulator u kvaru. Ovi regulatori rade u otvorenoj sprezi ili u zatvorenoj povratnoj sprezi po struji/naponu pobude generatora.

Osnovna uloga automatskog regulatora pobude (napona) je održavanje napona i/ili reaktivne snage na krajevima sinhronog generatora unutar propisanih granica. Regulator najprije detektuje promjene napona i struje na krajevima generatora u odnosu na referentne (zadate) vrijednosti. Nakon toga, regulator diktira promjenu pobudne struje, koja predstavlja korekciono dejstvo koje ima za cilj anuliranje prethodno nastalih promjena napona na krajevima generatora.

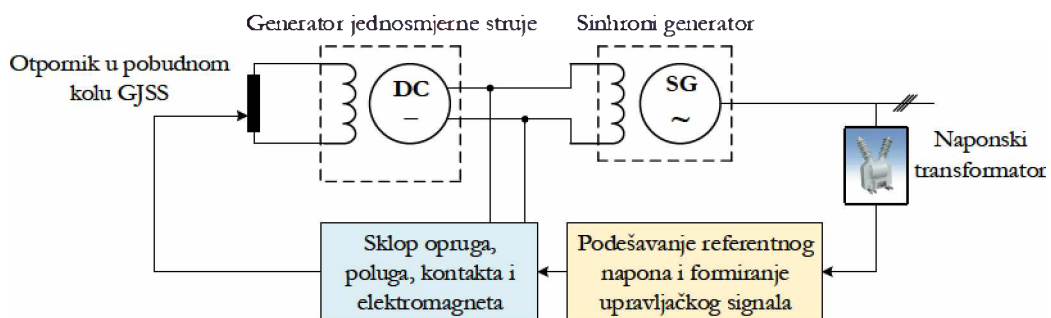
Prema konstrukciji i prema istorijskom razvoju, regulatori pobude se dijele na:

- elektromehaničke regulatore,
- regulatore na principu obrtnih pojačavača,
- regulatora na principu magnetnih pojačavača,
- elektronske regulatore i
- mikroprocesorske regulatore.

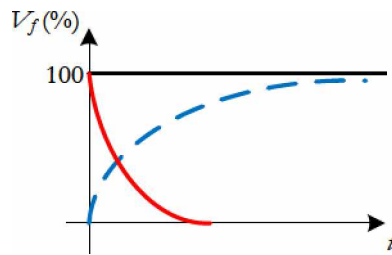
### 1.2.1.1 Elektromehanički regulatori

Sa istorijskog aspekta, elektromehanički regulatori pobude su prvi automatski regulatori pobude, koji su se primijenjivali do 60-ih godina 20. vijeka. Sa konstrukcionog aspekta, ovi regulatori obuhvataju releje, mehaničke elemente (opruge i poluge) i električne elemente (potenciometre, solenoide, motore, itd.). Razlikuju se elektromehanički regulatori direktnog i indirektnog dejstva.

Za elektromehaničke regulatore direktnog dejstva, u koje spada *Tirill*-ov regulator, karakteristično je direktno djelovanje na pobudni otpornik, kao što se može vidjeti na slici 1.2.1 [2]. Ovaj regulator funkcioniše tako što se, preko posebnih kontakata, u pobudno kolo pobudnice (generator jednosmjerne struje – GJSS), uvodi ili premošćava dodatni otpornik. Preciznije, zatvaranjem kontakata, otpornik u pobudnom kolu pobudnice se premošćava, a napon pobude ( $V_f$ ) raste prema krivoj koja je prikazana isprekidanom linijom na slici 1.2.2. Ukoliko se odgovarajući kontakti otvore, otpornik se uvodi u pobudno kolo pobudnice, a napon pobude opada shodno krivoj koja je na slici 1.2.2 prikazana punom linijom. Prethodno opisani mehanizam ostvaruje se sistemom opruga, kontakata i elektromagneta. Na ovaj način se, djelovanjem na pobudno kolo pobudnice, najprije podešava izlazni napon pobudnice, tj. generatora jednosmjerne struje, koji ujedno predstavlja i pobudni napon sinhronog generatora. Djelovanjem na pobudni napon sinhronog generatora postiže se i željena vrijednost napona na njegovim krajevima.

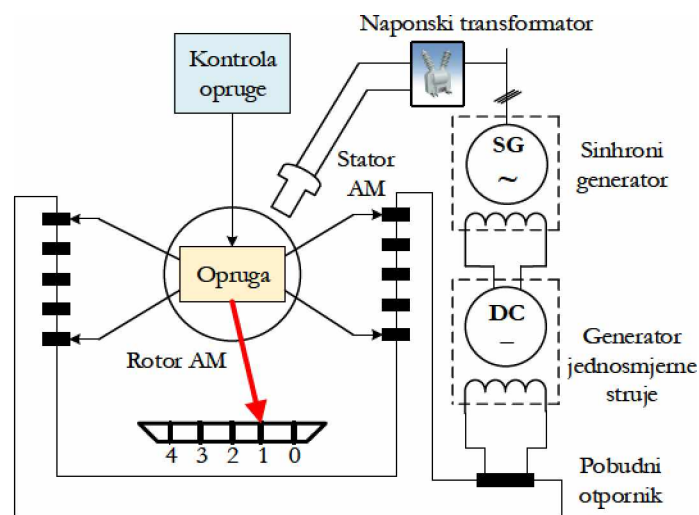


Slika 1.2.1 Principijelna šema *Tirill*-ovog regulatora.



Slika 1.2.2 Grafici vremenske promjene pobudnog napona sinhronog generatora prilikom uključivanja i isključivanja otpornika (puna linija – uključivanje otpornika, isprekidana linija – isključivanje otpornika).

**Brzi sektorski otpornik**, prikazan na slici 1.2.3, spada u elektromehaničke regulatore indirektnog dejstva [2]. Za ovakav tip regulatora je karakteristično da posredstvom električnih servomotora djeluju na pobudni otpornik i na taj način regulišu pobudnu struju glavne ili pomoćne pobudnice. Brzi sektorski otpornik se sastoji od malog monofaznog asinhronog motora (AM) koji se, pomoću naponskog transformatora, napaja sa krajeva sinhronog generatora. Kratkospojeni rotor asinhronog motora izrađen je u obliku valjka i povezan je sa oprugom koja ima ulogu pri kočenju rotora. Sa oprugom je povezana kazaljka, koja zavisno od pozicije rotora, na skali pokazuje napon generatora. Osovina rotora je, preko opruga, povezana sa dva aluminijska kontaktna sektora, koji ostvaruju kontakt sa regulacionim otpornicima. Prilikom obitanja rotora asinhronog motora, ovi kontaktni sektori zauzimaju različite položaje, i pri tome uključuju manji ili veći dodatni otpor u pobudno kolo pobudnice, tj. GJSS. Na taj način se reguliše pobudni napon pobudnice, a samim tim i pobudni napon sinhronog generatora, što dalje utiče na to da napon na krajevima sinhronog generatora dostiže željenu vrijednost.



Slika 1.2.3 Prinsipijelna šema brzog sektorskog otpornika.

Pri nominalnom opterećenju, položaj rotora je takav da kazaljka na skali pokazuje na vrijednost 1, što znači da je veći dio otpora premošćen. Ukoliko napon na krajevima generatora poraste, tada moment asinhronog motora prevlada otpor opruge, rotor teži da se obrće u smjeru kazaljke na satu i kazaljka pokazuje maksimalnu vrijednost podiona na skali, tj. vrijednost 4. Tada dolazi do povećanja dodatnog otpora u kolu pobude GJSS. Povećanje otpora dovodi do smanjenja struje pobude, a to dalje vodi do smanjenja napona na krajevima sinhronog generatora. Tada dolazi do smanjenje obrtnog momenta rotora asinhronog motora, pa sistem opruga vraća kazaljku na početak skale. Tada opruga popušta, kazaljka zauzima položaj 2 i dolazi do uspostavljanja ravnotežnog stanja između momenta asinhronog motora i momenta opruge. Moment kočice opruge definisan je blokom koji je na prethodnoj slici označen kao „Kontrola opruge“. Na taj način se indirektno podešava referentna vrijednost napona sinhronog generatora.

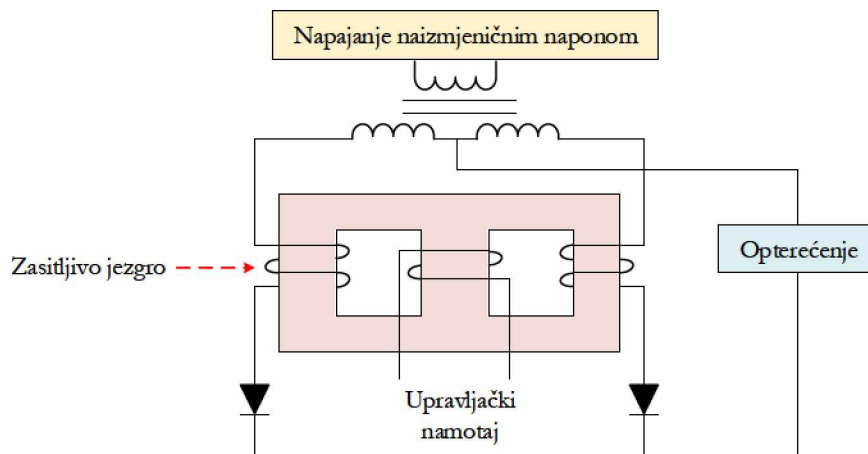
#### ***1.2.1.2 Regulatori na principu obrtnih pojačavača***

Kod sistema za regulaciju pobude, obrtni pojačavači se koriste za promjenu pobudne struje glavne ili pomoćne pobudnice. Stoga, otvoreno je pitanje da li su oni dio regulatora pobude ili neka vrsta pomoćne pobudnice. Ukoliko se obrtni pojačavač posmatra kao dio regulatora pobude, onda on predstavlja njegov izvršni organ [2].

Najčešći tipovi obrtnih pojačavača su „Rototrol“, „Amplidin“ i „Regulex“. Oni se vezuju u pobudni sistem tako da na njihov ulaz, tj. namotaj pobude, djeluje detektor greške ili izlaz iz regulatora. Izlazni napon iz obrtnog pojačavača se superponira (dodaje ili oduzima) naponu osnovnog pobudnog namotaja. Za obrtne pojačavače je karakteristično da imaju umjerene vrijednosti brzine odziva. Takođe, ovi pojačavači imaju dobre karakteristike pri forsiranju pobude, s obzirom na to da je nominalni napon obrtnog pojačavača često istog reda veličine kao i nominalni napon pobudnice.

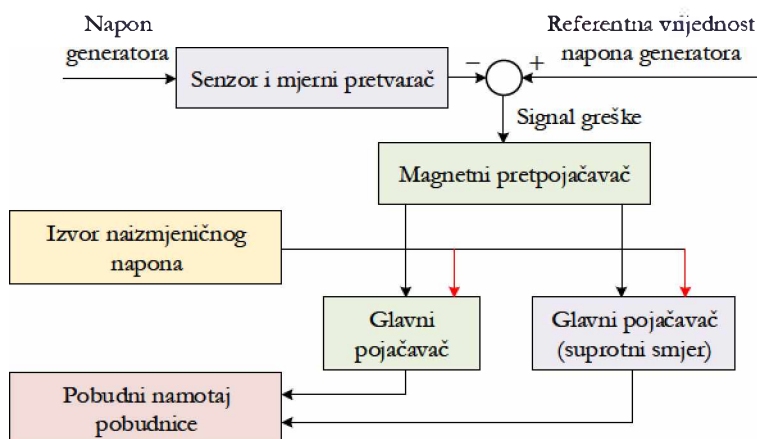
#### ***1.2.1.3 Regulatori na principu magnetnih pojačavača***

Regulatori na principu magnetnih pojačavača sastoje se od zasitljivog magnetnog jezgra, glavnog i upravljačkog namotaja, kao i ispravljača, kao što je prikazano na slici 1.2.4 [2].



Slika 1.2.4 Struktura magnetnog pojačavača.

Struja opterećenja je ograničena vrlo velikom induktivnošću glavnog namotaja. Zasićenje magnetnog jezgra kontroliše se pomoću upravljačkog namotaja. Kada dođe do zasićenja magnetnog jezgra, smanjuje se induktivnost glavnog namotaja, što dalje znači da struja opterećenja dostiže vrijednost koja je ograničena otpornošću potrošača. Naizmjenična struja dobijena u glavnom namotaju se ispravlja pomoću dioda i služi kao struja pobude za pobudnicu. Kao što se može vidjeti na slici 1.2.5, najčešće se koriste dva magnetna pojačavača u paru, pri čemu jedan služi za pobuđivanje, a drugi za razbuđivanje pobudnice. Napajanje samih magnetnih pojačavača naizmjeničnim naponom vrši se iz nezavisnog izvora.



Slika 1.2.5 Blok dijagram regulatora na principu magnetnih pojačavača.

#### 1.2.1.4 Elektronski regulatori

Prvi elektronski regulatori su se pojavili 30-ih godina 20. vijeka i karakteristala ih je mala pouzdanost i skupo održavanje, pa stoga nikada nisu bili široko prihvaćeni [2, 84].

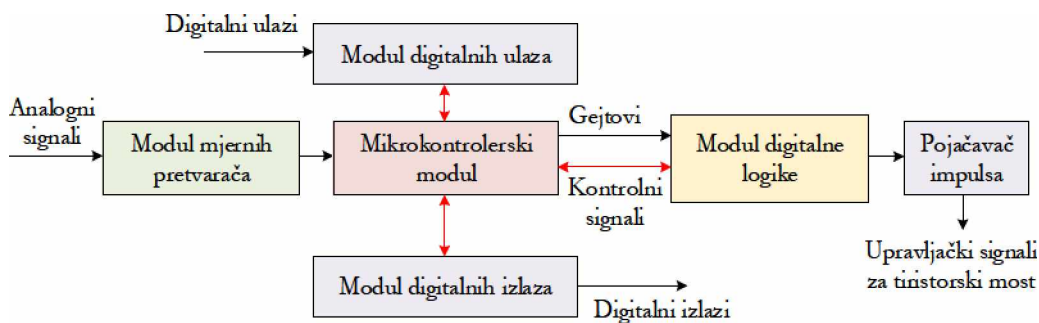
Savremeni elektronski regulatori pobude grade se kao poluprovodnički ili sa integrisanim kolima. Glavne karakteristike modernih elektronskih regulatora pobude su izuzetno brzo dejstvo, velika pouzdanost, niska cijena i lako održavanje.

Elektronski regulator za mašine snage veće od 5 MVA je najčešće modularne konstrukcije, sa sljedećim funkcionalnim jedinicama:

- Osnovna jedinica obezbjeđuje elementarne funkcije regulatora: održavanje konstantnog napona na krajevima sinhronog generatora, raspodjela reaktivnog opterećenja između sinhronih generatora koji rade u paralelnom radu i obezbjeđivanje rezervi stabilnosti u sistemu.
- Limiteri ili ograničavači su elementi koji obezbjeđuju siguran rad sinhronog generatora i sprečavaju ulazak u nedopuštene zone rada. Ograničenja su najčešće vezana za minimalno/maksimalno ograničenje pobudne struje, ograničenje maksimalne struje statora generatora, itd. Limiteri će biti detaljnije opisani u potpoglavlju 1.2.3.
- Nadređeni regulatori imaju ulogu u regulaciji drugih promjenljivih – reaktivne snage, faktora snage, napona na sabirnicama elektrane, i slično. Ovi regulatori su superponirani regulatori čije se dejstvo ogleda preko referentnog ulaza automatskog regulatora pobude.
- Dodatne regulacione jedinice formiraju dodatne upravljačke signale na ulazu referentnog napona regulatora, sa ciljem da poboljšaju njegove dinamičke performanse. Primjer dodatne regulacione jedinice je stabilizator elektroenergetskog sistema.

#### ***1.2.1.5 Mikroprocesorski regulatori pobude***

Razvoj energetske elektronike je u ogromnoj mjeri uticao na razvoj savremenih sistema za regulaciju pobude [84]. Takođe, taj razvoj je omogućio i primjenu složenih strategija upravljanja kod regulacije pobude sinhronog generatora, a tom trendu pripada i uvođenje digitalne i mikroprocesorske tehnologije. Blok šema mikroprocesorskog regulatora pobude data je na slici 1.2.6 [84].



Slika 1.2.6 Blok dijagram mikroprocesorskog regulatora pobude.

Kao što je prikazano na prethodnoj slici, mikroprocesorski regulator pobude sastoji se od više modula:

- Modul digitalnih ulaza – služi za očitavanje stanja kontakata releja i tastera.
- Modul mjernih pretvarača – služi sa adaptaciju mjernih nivoa analognih signala karakteristikama A/D konvertora.
- Mikrokontrolerski modul – zadužen je za realizaciju upravljačkih funkcija generatora, tj. za softversku implementaciju upravljačkog zakona. Ovaj modul generiše upravljačke signale za gejtove tiristora ispravljačkog mosta.
- Modul digitalne logike – zadužen je da, na osnovu prethodno generisanih signala za uključivanje tiristora, generiše kontrolne signale za definisanje ugla uključivanja tiristora. Takođe, ovaj modul generiše kontrolne signale pomoću kojih se kontroliše rad mikrokontrolera.
- Modul pojačavač impulsa – služi za direktno dovođenje prethodno definisanih kontrolnih signala na gejtove tiristora ispravljačkog mosta.
- Modul digitalnih izlaza – služi za pobuđivanje namotaja izvršnih releja i uključivanje dioda za signalizaciju.

### 1.2.2 Matematički modeli regulatora

Regulatori pobude kod sistema za automatsku regulaciju napone sinhronne mašine, kao i svaki regulator u bilo kom sistemu automatskog upravljanja, na osnovu signala greške  $e(t)$  i odgovarajućeg upravljačkog zakona definiše upravljački signal  $u(t)$ . U nastavku će biti prikazani matematički modeli regulatora pobude, i to najprije onih tipova regulatora koji se najčešće koriste u praksi, a zatim i određenih naprednih regulatora, koji primjenu za sada nalaze samo u računarskim simulacijama.

### 1.2.2.1 Praktični regulatori pobude

Najčešće korišćeni regulatori u realnim sistemima za regulaciju pobude sinhronog generatora su proporcionalno-integralni (PI) i proporcionalno-integralno-diferencijalni (PID) regulator. Upravljački zakon PI regulatora dat je sljedećom relacijom [85]:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \cdot \int e(t) \cdot dt = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t) \cdot dt, \quad (1.1)$$

gdje  $e(t)$  predstavlja signal greške,  $u(t)$  je upravljački signal,  $K_p$  je proporcionalno pojačanje,  $T_i$  je integralna vremenska konstantna, dok  $K_i$  predstavlja integralno pojačanje. Za PID regulator, upravljački zakon dat je sljedećim izrazom [86]:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \cdot \int e(t) \cdot dt + K_p \cdot T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t) \cdot dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt}, \quad (1.2)$$

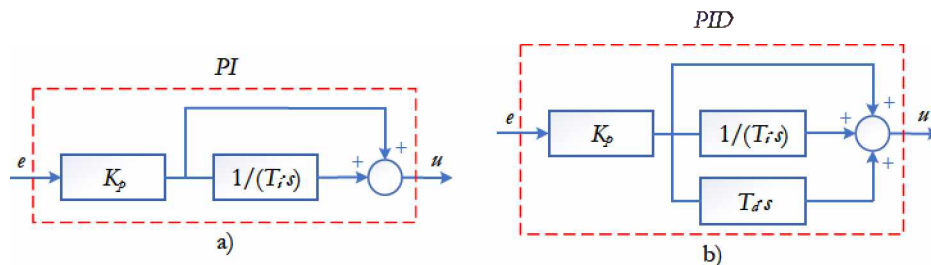
gdje  $T_d$  predstavlja diferencijalnu vremensku konstantnu, dok  $K_d$  predstavlja diferencijalno pojačanje.

Prenosne funkcije PI i PID regulatora date su sljedećim relacijama, respektivno [85, 86]:

$$G_{PI}(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s}, \quad (1.3)$$

$$G_{PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \cdot s. \quad (1.4)$$

Blok dijagrami PI i PID regulatora dati na slici 1.2.7.



Slika 1.2.7 Blok dijagram a) PI i b) PID regulatora.

Proporcionalno dejstvo određuje veličinu statičke greške sistema – njegovim povećanjem greška se smanjuje. Međutim, zavisno od tipa sistema kojim se upravlja, povećanje pojačanja  $K_p$  može dovesti do nestabilnosti sistema. Najznačajnija osobina integralnog člana je da se na

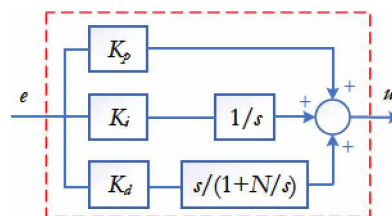


izlazu dobija konstantan signal pri nultom ulazu, što ima poseban značaj pri veoma malim signalima greške. Ova osobina integratora je veoma korisna za sisteme čiji aktuatori imaju odgovarajuću mrtvu zonu unutar koje prestaju da reaguju na pobudu. Greška koja se tada akumulira kroz integrator ustvari održava pobudu aktuatora izvan mrtve zone, sve dok se ne postigne nulta vrijednost greške. Primjena integralnog dejstva u početku dovodi do usporavanja odziva, ali nakon izvjesnog vremena izlaz integratora se značajno povećava, a to dovodi do oscilatornosti odziva. U cilju smanjenja preskoka nastalog zbog integralnog člana, uvodi se diferencijalni član regulatora koji vodi računa o brzini promjene signala greške. Preciznije, ako se želi izbjeći preskok, neophodno je da se usporava promjena odziva kada signal greške opada. Intenzitet usporavanja promjene odzive je direktno srazmjeran brzini opadanja greške, a informaciju o tome daje upravo izvod greške u vremenu.

U praksi, diferencijalno dejstvo pokazuje nedostatke u prisustvu mjernog šuma. Teorijski, mjerni šum je u domenu visokih učestanosti, a kako diferencijalni član ima neograničen propusni opseg, to znači da će upravo diferencijalni član značajno povećati amplitudu šuma. Ovakav nedostatak se otklanja tako što se diferencijalno dejstvo modifikuje dodavanjem jednog realnog pola, koji se nalazi izvan opsega učestanosti unutar kojeg se želi ostvariti efekat diferenciranja. Na taj način, počevši od učestanosti koja odgovaraja umetnutom polu, prestaje diferenciranje signala. Prenosna funkcija PID regulatora sa modifikovanim D-dejstvom, ili realnog PID regulatora, ima sljedeći oblik [86]:

$$G_{PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \cdot \frac{s}{1 + \frac{s}{N}}, \quad (1.5)$$

gdje  $N$  predstavlja koeficijent koji definiše položaj umetnutog pola ( $s = -N$ ). Blok dijagram realnog PID regulatora dat je na slici 1.2.8.



Slika 1.2.8 Blok dijagram realnog PID regulatora.

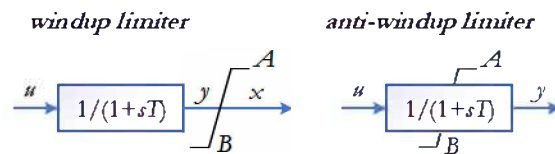
Generalno, kod sistema za regulaciju pobude, amplituda neke promjenljive može se ograničiti na dva načina:

- Prvi tip ograničavača, *windup* limiter, ilustrovan je na slici 1.2.9. Ovaj tip ograničavača opisan je sljedećom relacijom (1.6):

$$x = \begin{cases} y, B \leq y \leq A \\ A, y > A \\ B, y < B \end{cases} \quad (1.6)$$

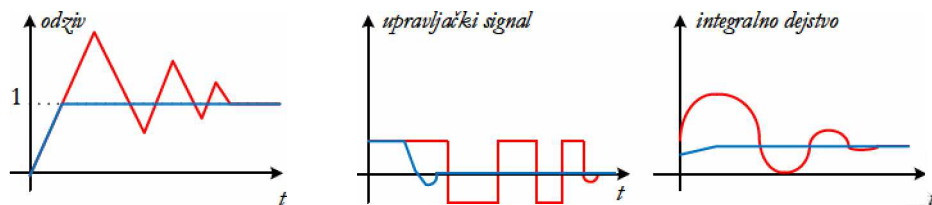
- Drugi tip ograničavača, *anti-windup* limiter, specifičan je po tome što utiče na ograničenje izlaza  $y$  u zavisnosti od znaka njegove brzine promjene. Ovaj tip ograničavača takođe je prikazan na slici 1.2.9, a matematički je opisan narednom relacijom:

$$f = \frac{1}{T}(u - y) \Rightarrow \frac{dy}{dt} = \begin{cases} f, B \leq y \leq A \\ 0, y = A \wedge f > 0 \\ 0, y = B \wedge f < 0 \end{cases} \quad (1.7)$$



Slika 1.2.9 Osnovni tipovi ograničavača.

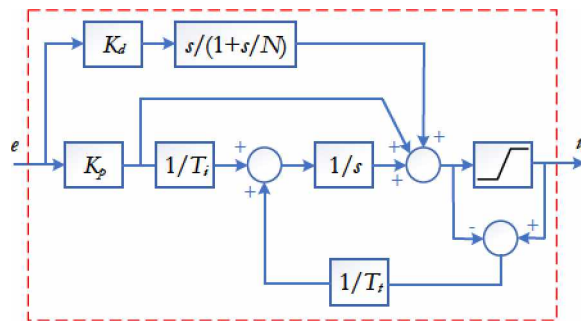
Prethodno opisani ograničavači usko su vezani za određene probleme koji se javljaju kod integralnog člana PI i PID regulatora. U radu [87] detaljno je opisan pojam zasićenja integratora, odnosno tzv. *integrator windup*. Ukratko, pojam zasićenja integratora ilustrovan je na slici 1.2.10.



Slika 1.2.10 Ilustracija efekta zasićenja regulatora.

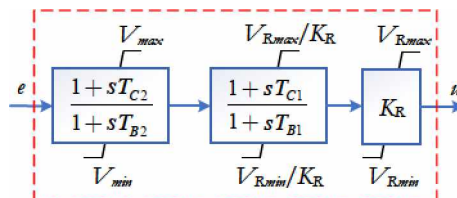
Na prvom dijelu slike 1.2.10 prikazan je odziv nekog sistema kada je referentna vrijednost jedinična step funkcija (crvenom bojom – zasićenje integratora, plavom bojom – primjena *anti-windup* mehanizma). S obzirom na naglu promjenu referentne vrijednosti u trenutnu  $t=0$ , dolazi do početnog zasićenja upravljačkog signala, dok integralno dejstvo raste sve dok je

greška pozitivna. Integralno dejstvo dostiže svoj maksimum kada greška prolazi kroz 0. Zbog velike vrijednosti integralnog dejstva, upravljački signal ostaje zasićen sve dok ne prođe određeni vremenski interval u kome je greška negativna. Tada integralno dejstvo značajno opada, a upravljački signal drastično mijenja svoju vrijednost. Sumarno, rezultat zasićenja regulatora jesu nagle promjene u vrijednostima upravljačkog signala, kao i velike oscilacije i velika vrijednost preskoka odziva. U cilju rješavanja ovog problema predložen je *anti-windup* mehanizam, čijom primjenom se dobijaju grafici prikazani plavom bojom. Osnovna ideja je sljedeća: kada dođe do zasićenja upravljačkog signala integrator se resetuje, odnosno ponovo se proračunava integralno dejstvo. Vremenska konstantna resetovanja integratora označena je sa  $T_r$ . Blok dijagram realnog PID regulatora sa *anti-windup*-om prikazan je na slici 1.2.11. Kao što se može vidjeti sa slike, razlika između izlaza iz regulatora i zasićenog izlaza iz regulatora se množi sa pojačanjem  $1/T_r$  i dovodi preko sumatora na ulaz integratora. Kada nema zasićenja integratora, jasno je da će pomenuta razlika biti jednaka 0 i ona neće uticati na normalan rad regulatora.



Slika 1.2.11 Blok šema realnog PID regulatora sa *anti-windup*-om.

Još jedan tip regulatora koji se vrlo često može sresti u realnim hidroelektranama je tzv. *lead-lag* kompenzator, čiji blok dijagram je dat na slici 1.2.12:



Slika 1.2.12 Blok dijagram *lead-lag* kompenzatora.

Shodno prethodno prikazanoj slici,  $K_R$  predstavlja pojačanje regulatora,  $T_{C1}$  i  $T_{C2}$  su odgovarajuće vremenske konstante diferencijalnih članova kompenzatora, a  $T_{B1}$  i  $T_{B2}$  su

vremenska konstante integralnih članova kompenzatora. Gornja i donja granica  $V_{Rmin}$  i  $V_{Rmax}$  su definisane u odgovarajućim katalozima pobudnih sistema, dok se  $V_{max}$  i  $V_{min}$  računaju na sljedeći način:

$$V_{max} = -V_{min} = \frac{(V_{Rmax} - V_{Rmin}) \cdot T_{BI}}{K_R \cdot T_{CI}} \quad (1.8)$$

### 1.2.2.2 Napredne strukture regulatora pobude

Osim prethodno prikazanih regulatora, koji su najčešće u upotrebi kod pobudnih sistema u realnim hidroelektranama, u dostupnoj literaturi se može naći veliki broj naprednih i složenih struktura regulatora pobude. Primjena ovakvih regulatora se dominantno testira kroz računarske simulacije.

Jedan od najčešće korišćenih modifikovanih struktura PID regulatora je PID regulator sa diferencijalnim dejstvom drugog reda, skraćeno označen sa PIDD<sup>2</sup> regulator [30 – 33]. Njegova prenosna funkcija data je sljedećim izrazom, pri čemu  $K_d$  predstavlja pojačanje diferencijalnog člana drugog reda:

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \cdot s + K_{d2} \cdot s^2. \quad (1.9)$$

Filtriranjem diferencijalnog člana prvog i drugog reda dobija se PIDA (*PID-Acceleration*) regulator, kao što je pokazano u [6]:

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d \cdot s}{s+d} + \frac{K_{d2} \cdot s^2}{(s+d) \cdot (s+e)}, \quad (1.10)$$

gdje  $d$  i  $e$  predstavljaju odgovarajuće filterske koeficijente.

Četvoroparametarski PID regulator, kod kojeg je filtrirano kako proporcionalno, tako i integralno i diferencijalno dejstvo, predstavljen je sljedećom prenosnom funkcijom [34]:

$$C(s) = \frac{K_p \cdot s + K_i + K_d \cdot s^2}{s \cdot (T_f \cdot s + 1)}, \quad (1.11)$$

gdje je sa  $T_f$  označena vremenska konstanta filtra prvog reda.

Jedan od najčešće korišćenih naprednih varijanti regulatora jeste FOPID (*Fractional-Order PID*) regulator. Glavna karakteristika ovog tipa regulatora je ta što su redovi integralnog

dejstva ( $\lambda$ ) i diferencijalnog dejstva ( $\mu$ ) realni brojevi, a ne cijeli brojevi kao u prethodno prikazanim varijantama regulatora. FOPID regulator se takođe može naći u idealnoj [21 – 28] i u realnoj varijanti [29] – prenosna funkcija idealnog FOPID regulatora data je sljedećom relacijom:

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} + K_d \cdot s^\mu, \quad (1.12)$$

dok je funkcija prenosa realnog FOPID regulatora (sa filtriranim diferencijalnim članom) predstavljena narednom relacijom:

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} + \frac{K_d \cdot s^\mu}{1 + T_f \cdot s^\mu}. \quad (1.13)$$

Slično kao i kod klasičnog PID regulatora, dvostruko diferencijalno dejstvo se može dodati i FOPID regulatoru, čime se dobija FOPIDD<sup>2</sup> regulator predstavljen u [36, 37]:

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} + K_d \cdot s^\mu + K_{d2} \cdot s^2. \quad (1.14)$$

Kombinacijom prethodno opisanih tipova regulatora može se izvesti i prenosna funkcija PI<sup>1</sup>DND<sup>2</sup>N<sup>2</sup> regulatora [38]:

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} + K_d \cdot s \cdot \frac{N_1}{s + N_1} + K_{d2} \cdot s^2 \cdot \frac{N_2^2}{(s + N_2)^2}. \quad (1.15)$$

Digitalna implementacija FOPID regulatora, kod kojeg se red izvoda i red integrala mijenjaju u vremenu, naziva se FVOPID (*fractional-variable-order* PID) regulator [35]. Na osnovu signala greške  $e$ , upravljački signal  $u$  kod digitalnog FVOPID regulatora računa se na sljedeći način:

$$u(kb) = K_p \cdot e(kb) + K_i \cdot \Delta_b^{v_i(k)} e(kb) + K_d \cdot \Delta_b^{v_d(k)} e(kb), \quad (1.16)$$

gdje  $\Delta_b^{v_i(k)}$  i  $\Delta_b^{v_d(k)}$  predstavljaju operatore integralnog i diferencijalnog dejstva, respektivno. S obzirom na to da se radi o digitalnoj implementaciji, integralno dejstvo je predstavljeno sumom umjesto integrala, dok je diferencijalno dejstvo predstavljeno razlikom umjesto prvim izvodom, kao što je detaljno opisano u [35]. Takođe,  $k$  predstavlja redni broj odbirka,  $b$  je perioda odabiranja, a  $v_i(k)$  i  $v_d(k)$  predstavljaju promjenljive redove integralnog i diferencijalnog člana, respektivno.

Za razliku od prethodno opisanih regulatora koji imaju jedan stepen slobode, PI regulator sa dva stepena slobode (2-DOF PI) opisan je sljedećom relacijom:

$$U(s) = K_p \cdot \left( \beta + \frac{1}{s \cdot T_i} \right) \cdot \Delta V_{ref}(s) + K_p \cdot \left( 1 + \frac{1}{s \cdot T_i} \right) \cdot \Delta V_g(s), \quad (1.17)$$

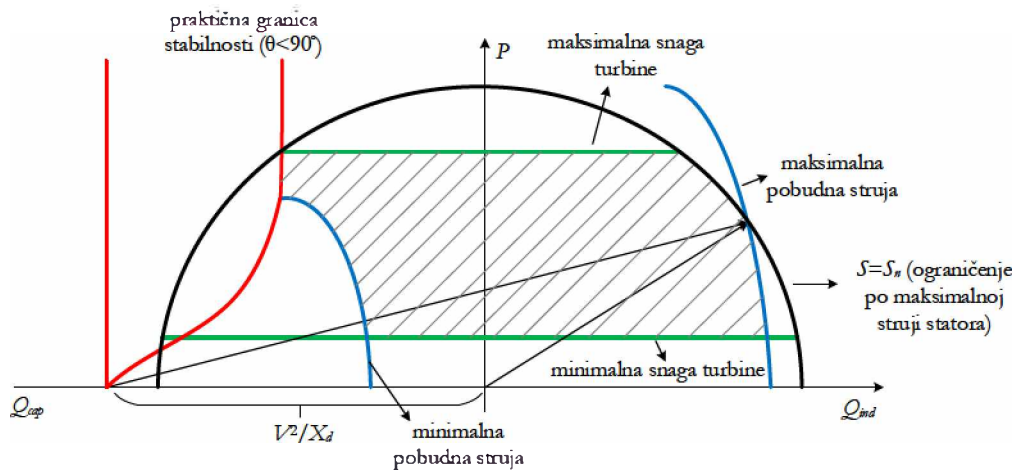
pri čemu  $\Delta V_{ref}$  predstavlja promjenu referentnog napona,  $\Delta V_g$  promjenu napona na izlazu iz generatora, a  $\beta$  je težinski faktor koji se koristi za skaliranje referentnog napona.

Osim pomenutih regulatora, u dostupnoj literaturi je u računarskim simulacijama pokazana i primjena *fuzzy* PID regulatora [46, 47].

### 1.2.3 Limiteri i dodatni signali kod sistema za regulaciju pobude

Regulatori pobude se, prema broju ulaznih signala, mogu podijeliti na monovarijabilne i multivarijabilne regulatore. Za monovarijabilne je karakteristično da imaju jedan ulaz (najčešće izmjereni napon sa krajeva generatora) i jedan izlaz. Za razliku od njih, multivarijabilni regulatori pobude, osim napona i struje sa krajeva generatora, koriste veliki broj dodatnih signala kako bi se obezbijedile što bolje dinamičke performanse elektroenergetskog sistema na koji je priključen posmatrani generator. Pomenuti dodatni signali su ustvari izlazni signali iz stabilizatora i ograničavača, tj. limitera sistema za regulaciju pobude [2].

Uloga limitera sistema za regulaciju pobude je da osiguraju da generator radi u stabilnom režimu rada, odnosno unutar svog pogonskog dijagrama. Naime, pogonski ili radni dijagram generatora definiše radne režime u kojima generator može bezbjedno da radi, bez ikakvih ograničenja ili oštećenja. Granice stabilnog rada sinhronog generatora propisane su nominalnom snagom, minimalnom i maksimalnom snagom turbine, termičkom granicom (maksimalnom strujom) statorskog namotaja, minimalnom i maksimalnom pobudnom strujom, kao i ograničenjem po pitanju granice stabilnosti, tj. uglom snage  $\theta$ . Primjer pogonskog dijagrama hidrogeneratora prikazan je na slici 1.2.13, na kojem je šrafiranom sivom bojom predstavljena zona stabilnog rada generatora.

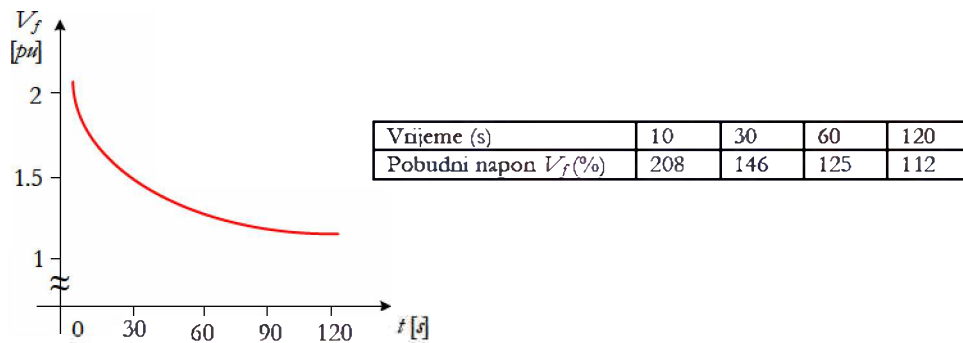


Slika 1.2.13 Pogonski dijagram hidrogeneratora.

Kod pobudnih sistema sinhronog generatora mogu se sresti neki od sljedećih vrsta limitera:

1. Limiter minimalne pobude ili limiter potpobude (*Underexcitation limiter – UExc*) ima uloge u spriječavanju višestrukih negativnih efekata kod sinhronog generatora – gubitak sinhronizma, zagrijavanje čeonih djelova magnetnog kola statora i smanjenje pobude ispod nivoa kojim se ugrožava stabilnost sistema. Za određene tipove limitera potpobude je karakteristično da granica limitera, tj. iznos reaktivne snage koju generator uzima iz mreže, zavisi od vrijednosti aktivne snage. Nasuprot njima, drugi tip limitera, nezavisno od vrijednosti aktivne snage, reaguje kada reaktivna snaga opadne ispod određene predefinisane vrijednosti. Ulazak generatora u režim potpobude nastaje kao posljedica priključenja pretežno kapacitivnog opterećenja na krajeve generatora, kao i prilikom određenih kvarova na pobudnom namotaju (kratki spoj ili prekid namotaja). Ulazni signali u limiter potpobude su napon sa krajeva generatora, aktivna i reaktivna snaga generatora, dok se izlazni signal iz ovog limitera sumira sa referentnim naponom. Izlazni signal iz limitera potpobude je uvijek pozitivan, tako da je njegov efekat povećanje referentne vrijednosti napona, što dalje ima uticaj na povećanje pobudnog napona/struje, tj. forsiranje pobude.
2. Limiter maksimalne pobude (*Overexcitation limiter – OExc*) predstavlja zaštitu pobudnog namotaja sinhronog generatora od pretjeranog zagrijavanja usljed dugotrajnog proticanja povišene struje pobude. Limiter maksimalne pobude djeluje tako što najprije detektuje stanje prekomjerne pobudne struje. Nakon određenog vremenskog kašnjenja, posredstvom automatskog regulatora napona smanjuje se

pobudna struja na prethodno definisanu vrijednost (100 – 110 % nominalne pobudne struje). Ukoliko automatski regulator nije u stanju da ispuni navedeni zadatak, vrši se prebacivanje na ručni regulator. Ako je i taj način neuspješan, limiter isključuje pobudu i inicira isključenje samog generatora. Ovakav tip zaštite može djelovati sa vremenskim kašnjenjem koje je konstantno i nezavisno od vrijednosti prekomjernog pobudnog napona (ili pobudne struje) ili sa zakašnjenjem koje je inverzno proporcionalno preopterećenju, shodno krivoj sa slike 1.2.14.



Slika 1.2.14 Tipična kriva maksimalno dozvoljene pobude.

3. Limiter odnosa napon/učestanost (V/Hz limiter) ima ulogu u zaštiti generatora i blok transformatora od oštećenja koja mogu nastati usljed prevelike vrijednosti fluksa pri niskoj učestanosti. Trajan rad generatora pri značajno povišenoj vrijednosti fluksa može izazvati pretjerano zagrijavanje magnetnih kola generatora i blok transformatora. Magnetni fluks je proporcionalan odnosu V/Hz, tj. količniku relativnih vrijednosti radnog napona i učestanosti mašine, koji se lako može izmjeriti. Ovaj limiter utiče na regulator pobude tako da se pri prekoračenju granice dozvoljenog odnosa V/Hz smanjuje napon na krajevima generatora.
4. Brzi limiter pobudne struje (*Fast current limiter – FCL*), za razliku od limitera minimalne i maksimalne pobude, nema vremensko kašnjenje i omogućava vrlo brzo reagovanje i limitiranje struje pobude. Ovaj limiter je sastavljen od dva limitera, pri čemu jedan služi za ograničavanje minimalne struje pobude (*FCL<sub>min</sub>*), a drugi za ograničavanje maksimalne struje pobude (*FCL<sub>max</sub>*). Tipična dozvoljena vrijednost za minimalnu struju pobude je oko 30% nominalne vrijednosti, dok je za maksimalnu struju pobude dozvoljena vrijednost od 140% do čak 200% nominalne pobudne struje.

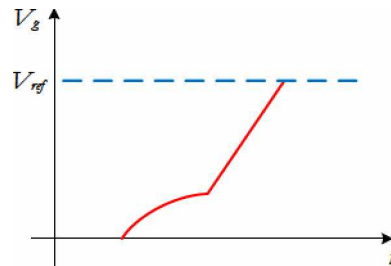


5. Limiter struje statora (*Stator current limiter – SCL*) ne dozvoljava ulazak generatora u radni režim koji bi mogao da uzrokuje prekoračenje termalnog limita namotaja statora. Ovaj limiter pokriva i natpobuđeni i potpobuđeni režim, tj. režime kada je struja statora induktivna i kapacitivna. Vrijednost maksimalno dozvoljene struje generatora je najčešće jednaka nominalnoj, ali se u pojedinim slučajevima dopušta da maksimalna dozvoljena vrijednost struje statora bude 5 – 10% iznad nominalne. Zavisno od tipa pobudnog sistema, limiter struje statora može u potpobuđenom režimu može sadržati i dva tipa ograničenja – ograničenje po trenutnoj struji generatora i termalno ograničenje, tj. ograničenje po struji generatora koja kontinualno može proticati.
6. Limiter referentne vrijednosti napona generatora skuži za ograničavanje maksimalne i minimalne vrijednosti referentnog napona. Najčešće postavljene granice su  $\pm 10\%$  nominalnog napona.

Osim prethodno nabrojanih limitera, sistem za regulaciju pobude sinhronog generatora može sadržati i dodatne funkcionalne blokove, koji dodatno poboljšavaju performanse samog sistema. Neki od najčešće korišćenih dodatnih funkcionalnih blokova su:

1. Stabilizator elektroenergetskog sistema (*Power system stabilizer – PSS*) ima ulogu u poboljšanju prigušenja oscilacija rotora, koje se mogu desiti u slučaju iznenadnih poremećaja u elektroenergetskom sistemu ili u samoj mašini. Drugim riječima, cilj stabilizatora elektroenergetskog sistema je da dovede promjenu brzine obitanja rotora na vrijednost koja je jednaka ili približno jednaka nuli.
2. Kompenzatori aktivne snage (*P-static*) i reaktivne snage (*Q-static*) služe za prepodešavanje referentne vrijednosti napona generatora kako bi se izvršila kompenzacija gubitaka aktivne i reaktivne snage u samom sinhronom generatoru, ali i u blok transformatoru i prienosnom vodu. Nivo reaktivne snage je takođe veoma bitan i kod paralelnog rada dva ili više generatora koji su priključeni na istu sabirnicu.
3. Funkcionalni blok pod nazivom *Softstart* ima važnu ulogu prilikom startovanja generatora, odnosno uspostavljanja pobude (tzv. *excitation building* ili *field flashing*). Konkretno, ovaj blok spriječava nagli porast napona na izlazu generatora prilikom njegovog startovanja. Tek nakon što se završi proces uspostavljanja pobude, odnosno nakon što napon na izlazu generatora dostigne približno 10% nominalne vrijednosti, ovaj blok omogućava linearni rast napona generatora. Dejstvo *softstart*

bloka je ilustrovano na slici 1.2.15, na kojoj je prikazana dinamika rasta napona na izlazu generatora.



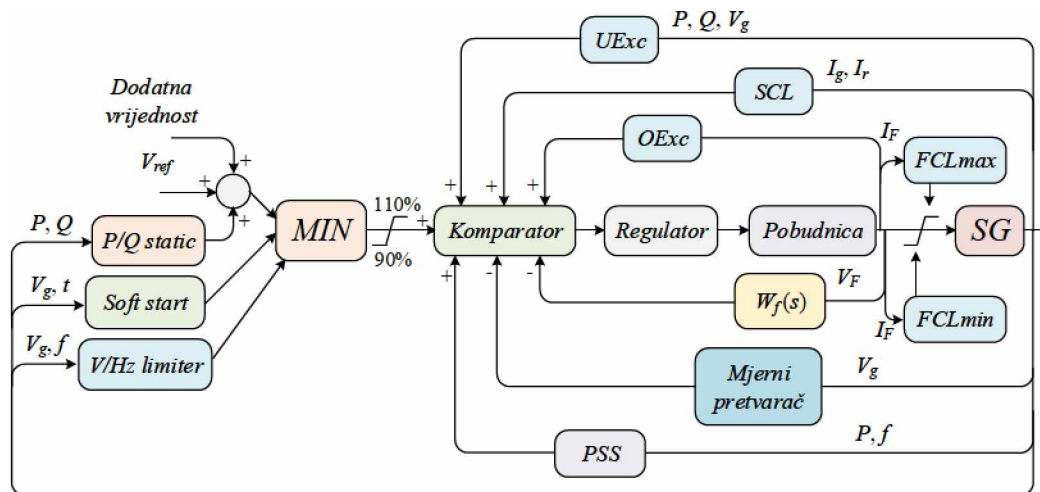
Slika 1.2.15 Ilustracija dejstva *softstart* bloka.

4. Stabilizator pobudnog sistema je pojam koji se koristi kako bi se opisala osnovna stabilizaciona povratna sprega pobudnog sistema, tj. regulatora pobude i pobudnice. Stabilizatori pobudnog sistema imaju ulogu da poboljšaju dinamičke performanse sistema za regulaciju pobude, a najčešće su realizovani kao diferencijalni elementi. Tipična funkcija prenosa stabilizatora pobudnog sistema  $W_f(s)$  data je sljedećom relacijom:

$$W_f(s) = \frac{T_f \cdot k_f \cdot s}{1 + T_f \cdot s}, \quad (1.18)$$

gdje  $k_f$  i  $T_f$  predstavljaju pojačanje i vremensku konstantu stabilizacionog elementa, respektivno.

Pozicije pomenutih limitera i dodatnih funkcionalnih blokova u sistemu za regulaciju pobude sinhronog generatora detaljno su ilustrovane na slici 1.2.16.



Slika 1.2.16 Ilustracija pozicije limitera i dodatnih funkcionalnih blokova kod sistema za regulaciju pobude.

Oznake veličina sa prethodne slike su:  $V_g$  – napon na izlazu iz generatora,  $I_g$  – struja generatora,  $I_r$  – reaktivna struja generatora,  $P$  i  $Q$  – aktivna i reaktivna snaga generatora,  $V_{ref}$  – referentna vrijednost napona generatora,  $t$  – vrijeme,  $f$  – frekvencija,  $V_F$  i  $I_F$  – napon i struja pobude generatora.

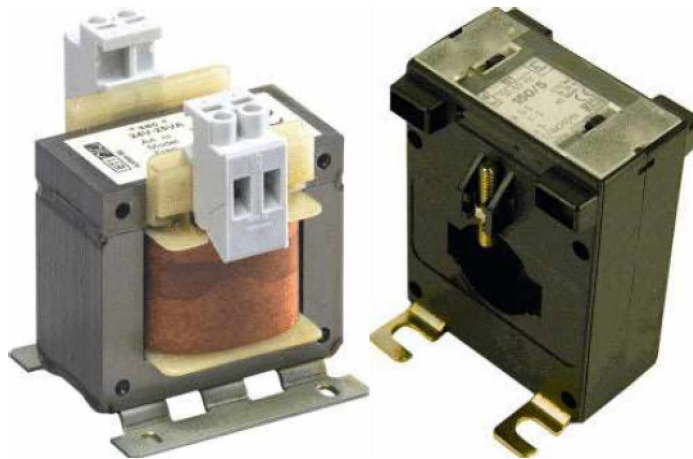
#### 1.2.4 Uređaji za mjerenje kod sistema za regulaciju pobude

Kod sistema za regulaciju pobude, napon i struja na izlazu iz generatora mjere se pomoću mjernih transformatora – naponskih i strujnih [2]. Naponski mjerni transformator je najčešće standardizovan za sekundarni napon  $V_n''=100$  V, dok je sekundarna struja strujnog transformatora najčešće  $I_n''=5$  A ili 1 A. Ukoliko se sa  $V_n'$  označi nominalni napon primara naponskog transformatora, a sa  $I_n'$  nominalna struja primara strujnog transformatora, onda se naponski i strujni transformator mogu modelovati odgovarajućim prenosnim odnosima:

$$m_{NT} = \frac{V_n'}{V_n''}, \quad (1.19)$$

$$m_{ST} = \frac{I_n'}{I_n''},$$

pri čemu  $m_{NT}$  predstavlja prenosni odnos naponskog transformatora, a  $m_{ST}$  prenosni odnos strujnog transformatora. Primjeri naponskog i strujnog transformatora dati su na slici 1.2.17.



Slika 1.2.17 Naponski transformator (lijevo) i strujni transformator (desno) [[www.tameson.com](http://www.tameson.com)].

Izmjereni naponski signal sa krajeva sinhronog generatora se dalje dovodi na mjerni pretvarač. Uloga mjernog pretvarača je da izmjereni naponski signal pretvori u pogodan jednosmjerni signal, koji dalje dolazi na komparator u kome se vrši sumiranje sa referentnim signalom i signalima sa limitera. Mjerni pretvarač je realizovan kao ispravljački most ili neki drugi mjerni pretvarač napona. Prenosna funkcija kojom se opisuje mjerni pretvarač  $W_{MP}(s)$  je prenosna funkcija prvog reda:

$$W_{MP}(s) = \frac{k_m}{1 + T_m \cdot s}, \quad (1.20)$$

pri čemu  $k_m$  predstavlja pojačanje, a  $T_m$  vremensku konstantu mjernog pretvarača.

### 1.3 Pobudnica kod sistema za regulaciju pobude

Pobudnica je jedna od glavnih komponenti pobudnog sistema sinhronog generatora. Kod pobudnih sistema razlikuju se dvije vrste pobudnice:

- glavna pobudnica predstavlja izvor jednosmjerne struje pobude kojom se napaja pobudni namotaj sinhronog generatora,
- pomoćna pobudnica predstavlja izvor struje pobude glavne pobudnice.

#### 1.3.1 Opšte napomene

S obzirom na to da pobudnica predstavlja izvor jednosmjerne struje, ona može biti realizovana na različite načine, i to kao:

- generator jednosmjerne struje (GJSS) sa nezavisnom ili otočnom pobudom,

- naizmjenični sinhroni generator, u kombinaciji sa diodnim ili tiristorskim ispravljačem,
- pobudni transformator, koji uzima energiju sa krajeva samog generatora ili sopstvene potrošnje elektrane, takođe u kombinaciji sa diodnim ili tiristorskim ispravljačem (koji se jednim imenom zovu pobudni ispravljači).

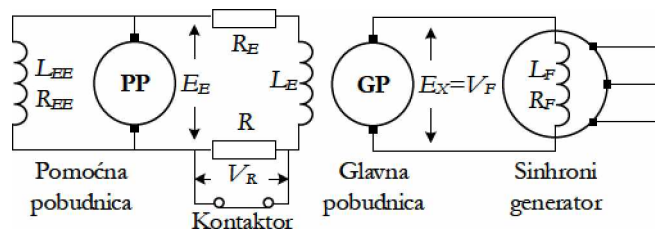
Zavisno od tipa pobudnice, razlikuju se i različiti tipovi pobudnih sistema, o čemu će detaljnije biti riječi u nekom od narednih potpoglavlja [2].

### 1.3.2 Matematički modeli pobudnica

Matematički model pobudnice, kao i šema i način povezivanja pobudnice sa glavnim sinhronim generatorom, zavise od konkretnog tipa realizacije pobudnice. U skladu s tim, u nastavku će biti prikazani matematički modeli i šeme vezivanja svakog prethodno pomenutog tipa pobudnice [2].

A) Ukoliko je pobudnica realizovana kao generator jednosmjerne struje, tada je moguće razlikovati dva slučaja:

A1) Ako se primijenjuje generator jednosmjerne struje sa nezavisnom pobudom, tada je neophodno prisustvo pomoćne pobudnice (generator jednosmjerne struje sa otočnom pobudom), čija je uloga da obezbijedi pobudni napon za glavnu pobudnicu. Ovakva realizacija pobuđivanja sinhronog generatora prikazana je na slici 1.3.1.



Slika 1.3.1 Šema vezivanja pobudnice realizovane kao generator jednosmjerne struje sa nezavisnom pobudom.

Ukoliko se sa  $E_E$  označi napon na krajevima pobudnog kola glavne pobudnice (GP), a sa  $E_X$  izlazni napon, tj. napon armature glavne pobudnice, koji je ujedno jednak pobudnom naponu sinhronog generatora ( $E_X = V_F$ ), može se izvesti sljedeća relacija:

$$E_E = R_E \cdot I_E + L_E \cdot \frac{dI_E}{dt}, \quad (1.21)$$

gdje  $R_E$ ,  $L_E$  i  $I_E$  predstavljaju otpornosti, induktivnost i struju pobudnog namotaja glavne pobudnice, respektivno, izražene u apsolutnim (SI) jedinicama. Kao posljedica efekta zasićenja, napon na krajevima glavne pobudnice  $E_X$  je nelinearne funkcija struje  $I_E$ . Efekat zasićenja se uzima u obzir na osnovu karakteristike opterećenja i karakteristike međugvožđa:

$$I_E = I_{E0} + \Delta I_E = \frac{E_{X0}}{R_g} + S_E(E_X) \cdot E_X, \quad (1.22)$$

pri čemu je  $E_{X0}$  vrijednost napona  $E_X$  u datoj radnoj tački,  $R_g$  je nagib karakteristike međugvožđa, a  $\Delta I_E$  predstavlja komponentu pobudne struje koja se za određenu vrijednost napona  $E_X$  zahtijeva usljed efekta zasićenja i računa se pomoću funkcije zasićenja  $S_E(E_X)$ , koja je najčešće eksponencijalna funkcija. Ukoliko se uvede sistem relativnih jedinica, tada se funkcija prenosa pobudnice sa nezavisnom pobudom  $W_E(s)$  računa na sljedeći način:

$$W_E(s) = \frac{e_X(s)}{e_E(s)} = \frac{1}{[k_E + s_E(e_X)] + T_E \cdot s}, \quad (1.23)$$

gdje je  $k_E$  pojačanje,  $T_E$  vremenska konstanta, a  $s_E(e_X)$  relativna vrijednost funkcije zasićenja:

$$k_E = \frac{R_E}{R_g}, T_E = \frac{L_E}{R_g}, s_E(e_X) = R_E \cdot S_E(E_X). \quad (1.24)$$

Za tačno određenu radnu tačku  $e_X = e_{FD0}$ , funkcija prenosa se može preformulisati u standardnu prenosnu funkciju za male signale:

$$W_e(s) = \frac{\Delta e_X(s)}{\Delta e_E(s)} = \frac{k_e}{1 + T_e \cdot s}, \quad (1.25)$$

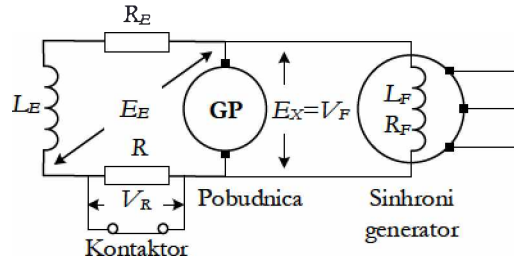
gdje  $k_e$  i  $T_e$  predstavljaju efektivno pojačanje i efektivnu vremensku konstantu koji zavise od vrijednosti funkcije zasićenja u datoj radnoj tački  $e_{FD0}$ :

$$k_e = \frac{1}{k_E + s_E(e_{FD0})}, \quad (1.26)$$

$$T_e = \frac{T_E}{k_E + s_E(e_{FD0})}.$$

A2) Ukoliko je pobudnica realizovana kao generator jednosmjerne struje sa sopstvenom otopnom pobudom, tada prisustvo pomoćne pobudnice nije potrebno. Blok šema

povezivanja generatora jednosmjerne struje sa otočnom pobudom i sinhronog generatora data je na slici 1.3.2.



Slika 1.3.2 Šema vezivanja pobudnice realizovane kao generator jednosmjerne struje sa otočnom pobudom.

U ovom slučaju, izlaz iz regulatora  $V_R$  se sabira sa naponom otočne pobude  $E_X$ , tako da je u relativnim jedinicama  $e_E = v_R + e_X$ . Matematičko modelovanje ovog tipa pobudnice je veoma slično kao i kod pobudnice koja je realizovana kao GJSS sa nezavisnom pobudom – izrazi za vremensku konstantu  $T_E$  i relativnu vrijednost funkcije zasićenja  $s_E(e_X)$  ostaju isti, dok izraz za pojačanje ima oblik:

$$\kappa_E' = \frac{R_E}{R_g} - 1 = \kappa_E - 1. \quad (1.27)$$

Funkcija prenosa pobudnice sa otočnom pobudom je slična izrazu za prenosu funkciju pobudnice za nezavisnom pobudom (1.23):

$$W_E(s) = \frac{e_X(s)}{v_R(s)} = \frac{1}{[\kappa_E' + s_E(e_X)] + T_E \cdot s}, \quad (1.28)$$

dok je funkcija prenosa za male signale pobudnice sa nezavisnom pobudom data sljedećim izrazom:

$$W_e(s) = \frac{\Delta e_X(s)}{\Delta v_R(s)} = \frac{\kappa_e}{1 + T_e \cdot s}, \quad (1.29)$$

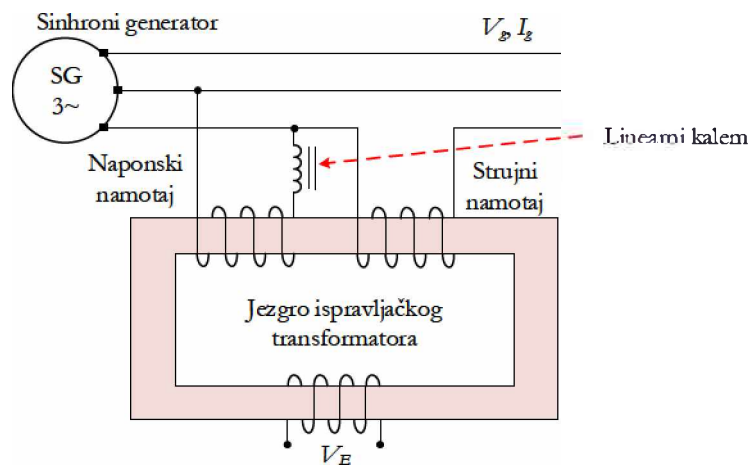
pri čemu su izrazi za efektivno pojačanje  $\kappa_e$  i vremensku konstantu  $T_e$  analogni izrazima za pobudnicu sa nezavisnom pobudom:

$$k_e = \frac{1}{k_E' + s_E (\ell_{FD0})},$$

$$T_e = \frac{T_E}{k_E' + s_E (\ell_{FD0})}. \quad (1.30)$$

B) U sistemima pobude sinhronog generatora veoma često se kao pobudnica može primijeniti posebni sinhroni generator u kombinaciji sa diodnim ili tiristorskim ispravljačima. Matematičko modelovanje takvih pobudnih generatora je podjednako komplikovano kao i modelovanje osnovnog sinhronog generatora. U narednom potpoglavlju detaljno će biti opisan i izveden matematički model sinhronog generatora.

C) Savremeni pobudni sistemi sastoje se od pobudnog transformatora koji se priključuje na krajeve sinhronog generatora ili na mrežu sopstvene potrošnje elektrane. Pobudni transformator može biti realizovan kao prosti energetski transformator ili kao transformator sa faznom (strujnom) kompaundacijom, za koji je karakteristično da napon na sekundaru zavisi od napona i struje na krajevima sinhronog generatora. Pobudni transformator na svom sekundaru napaja diodni ili tiristorski ispravljač. Šema priključivanja pobudnog transformatora sa faznom (strujnom) kompaundacijom data je na slici 1.3.3.



Slika 1.3.3 Šema priključivanja pobudnog transformatora sa faznom (strujnom) kompaundacijom.

Napon na sekundaru transformatora  $v_E$ , izražen u relativnim jedinicama, proporcionalan je struji generatora i naponu generatora (pod pretpostavkom da nema zasićenja):

$$v_E \approx k_V \cdot v_g + j \cdot k_I \cdot \dot{i}_g, \quad (1.31)$$

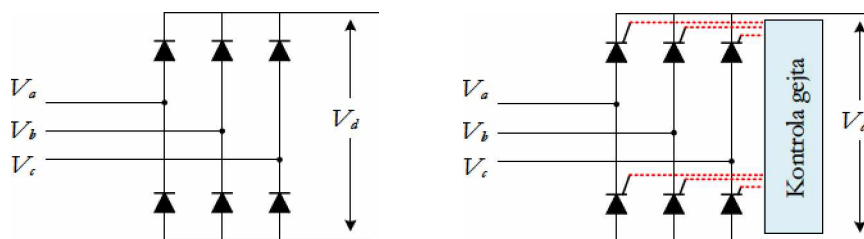


gdje su  $k_V$  i  $k_I$  faktori udjela napona i struje generatora i karakterišu odnose transformacije, koji zavise od broja navojaka na strujnom i naponskom namotaju primara, broja navojaka sekundara i impedanse linearnog reaktora. Uloga linearnog reaktora sa prethodne slike je ograničavanje struje naponskog namotaja primara zbog podešavanja da magnetopobudne sile strujnog i naponskog namotaja primara budu fazno pomjerene za  $90^\circ$ . Konkretno, za opterećeni sinhroni generator, pobudni napon  $v_F$  koji on zahtijeva se računa na sljedeći način:

$$\begin{aligned} v_E &= \left| v_g + j \cdot x_g \cdot i_g \right|, \\ v_F &= F_{EX} \cdot v_E, \end{aligned} \quad (1.32)$$

gdje  $x_g$  predstavlja poprečnu sinhronu reaktansu sinhronog generatora (detaljnije u narednom potpoglavlju), a  $F_{EX}$  predstavlja faktor opterećenja ispravljača, koji će takođe biti detaljno opisan u nastavku. Drugim riječima, ako se usvoji da je  $k_V=1$  i  $k_I=x_g$ , izlaz iz pobudnog transformatora približno je jednak pobudnom naponu opterećenog sinhronog generatora. U cilju kompenzacije efekta zasićenja generatora vrijednost faktor  $k_V$  je obično nešto iznad 1.

D) Pobudni ispravljač, koji je direktno povezan na izlaz naizmjenične pobudnice ili pobudnog transformatora, ima ulogu da obezbijedi jednosmjernu struju za pobudu glavnog sinhronog generatora. Pobudni ispravljač je realizovan kao trofazni punoispravljivi most, koji može biti regulisan (tiristorski most) ili neregulisan (diodni most), kao što je prikazano na slici 1.3.4.



Slika 1.3.4 Trofazni punoispravljivi most sa diodama (lijevo) i tiristorima (desno).

Svi izvori naizmjeničnog napona koji služe za napajanje pobudnog ispravljača imaju unutrašnju impedansu koja je pretežno induktivnog karaktera. Uticaj ove impedanse ogleda se u kašnjenju procesa komutacije struje između poluprovodničkih ventila (dioda ili tiristora) pobudnog ispravljača, a to dalje utiče na sniženje srednje vrijednosti izlaznog jednosmjernog napona iz ispravljača pri porastu njegove struje opterećenja. Struja opterećenja ispravljača je ujedno i pobudna struja glavnog sinhronog generatora. Reaktansa koja se suprostavlja

proticanju struje između poluprovodničkih ventila zove se komutaciona reaktansa i označava se sa  $X_p$ . Srednja vrijednost jednosmjernog napona na izlazu iz trofaznog punoispravljivog mosta  $V_d$  definisana je sljedećom relacijom:

$$V_d = 1.35 \cdot V_l \cdot \cos \alpha - \frac{3 \cdot X_p}{\pi} I_d, \quad (1.33)$$

gdje je  $I_d$  vrijednost jednosmjerne struje na izlazu iz ispravljačkog mosta,  $V_l$  je linijska vrijednost naizmjeničnog napona na ulazu mosta, a  $\alpha$  je ugao kašnjenja uključivanja tiristora (kod diodnog mosta je  $\alpha=0$ ). Drugi član u prethodnoj relaciji, koji se naziva komutacioni pad napona, predstavlja prethodno pomenuto snižavanje jednosmjernog napona usljed efekta komutacije. Ovaj pad napona je srazmjeran proizvodu komutacione reaktanse i struje opterećenja. Efekat komutacionog pada napona modeluje se pomoću ranije pomenutog faktora opterećenja, ili faktora komutacije ispravljača  $F_{EX}$ . Faktor opterećenja ispravljača je nelinearna funkcija struje opterećenja ispravljača (tj. struje pobude glavnog sinhronog generatora  $I_F$ ) i napona na izlazu iz naizmjenične pobudnice  $V_E$ , odnosno:

$$F_{EX} = f(i_N); \quad i_N = \frac{k_C \cdot i_F}{v_E}, \quad (1.34)$$

gdje je  $k_C$  faktor koji zavisi od komutacione reaktanse i predstavlja konstrukcionu karakteristiku samog ispravljača. Struja opterećenja ispravljača može se mijenjati od vrijednosti praznog hoda pa do vrijednosti kratkog spoja, pa se u skladu sa tim mogu definisati 3 regiona rada pobudnog ispravljača. Za svaki region faktor opterećenja  $F_{EX}$  se računa prema posebnim relacijama, pri čemu je opterećenje ispravljača opisano veličinom  $i_N$ :

$$\begin{aligned} F_{EX} &= 1 - 0.577 \cdot i_N; \quad \text{za } i_N \leq 0.433, \\ F_{EX} &= \sqrt{0.75 - i_N^2}; \quad \text{za } 0.433 < i_N < 0.75, \\ F_{EX} &= 1.732 \cdot (1 - i_N); \quad \text{za } i_N \geq 0.75. \end{aligned} \quad (1.35)$$

Nakon određivanja vrijednosti faktora opterećenja ispravljača, pobudni napon sinhronog generatora računa se shodno relaciji (1.36):

$$v_F = F_{EX}(i_N) \cdot v_E. \quad (1.36)$$

## 1.4 Sinhroni generator

Sinhrona mašina pripada konvencionalnim obrtnim električnim mašinama, i može raditi u tri radna režima. Motorni režim rada sinhronne mašine je rjeđe u primjeni, s obzirom na to da većinu potrošača u industriji čine asinhroni motori. Sinhroni kondenzator, koji ustvari predstavlja sinhroni motor u praznom hodu, često se koristi kao sredstvo za kompenzaciju reaktivne energije i poboljšanje naponskih prilika. Najčešća primjena sinhronne mašine je kao trofazni sinhroni generator, koji je glavni i najveći proizvođač električne energije u elektroenergetskim sistemima.

### 1.4.1 Konstrukcija, princip rada i vrste sinhronog generatora

Sinhrona mašina se, kao i sve ostale obrtne električne mašine, sastoji od statora (nepokretni dio) i rotora (obrtni dio). Između njih se nalazi vazdušni procijep, koji se drugačije naziva međugvožđe.

Stator sinhronog generatora sačinjen je od tankih dinamo limova, koji su posloženi tako da formiraju oblik šupljeg cilindra. Ovi limovi su međusobno izolovani i njihova površina je premazana izolacijom u cilju smanjivanja gubitaka usljed vrtložnih struja. Unutrašnjost statora je ožljebljena, a oblik žljebova zavisi od snage generatora – za generatore manje snage žljebovi su poluotvoreni trapeznog oblika, dok su kod generatora veće snage žljebovi skroz otvoreni (pravougaonog oblika). U žljebove statora postavljaju se bakarni provodnici, koji najčešće formiraju dvoslojni omčasti namotaj, osim u slučaju mašina većih snaga, kada su bakarni provodnici izrađeni kao štapovi i formiraju valoviti namotaj. Bakarni provodnici su okruglog poprečnog presjeka kod generatora manjih snaga, dok kod generatora većih snaga provodnici imaju pravougaoni poprečni presjek. Namotaj statora je uvijek trofazni, a njegovi krajevi su sprovedeni do priključne kutije, gdje se namotaj vezuje u zvijezdu i koja služi za priključivanje mjernih transformatora i zaštitnih uređaja. Ukoliko je sinhrona brzina generatora između 1500 i 3000 ob/min, unutrašnji prečnik statora iznosi oko 1 m, dok je za generatora manjih brzina prečnik značajno veći (može biti i do 15 m).

Oblik rotora sinhronog generatora zavisi od odgovarajuće sinhronne brzine samog generatora. Naime, u slučaju kada je brzina obrtanja rotora generatora velika, dolazi do pojave velikih centrifugalnih sila koje uzrokuju mehanička naprezanja provodnika. Iz tog razloga, raspodjela provodnika po obimu rotora tada mora biti ravnomjerna, pa je rotor cilindričnog oblika, a pobudni namotaj na rotoru je distribuirani. Prečnik cilindričnog rotora mora biti manji kako bi došlo do smanjenja centrifugalnih sila – okvirno prečnik cilindričnog

rotora je 5 do 6 puta manju od njegove aksijalne dužine. Zbog značajnih termičkih, mehaničkih i magnetnih naprezanja, ovakvi rotori su izrađeni od najkvalitetnijeg čelika. Generatori čija je nominalna snaga od 200 kVA do 200 MVA koriste cilindrične rotore. Dvije trećine cilindričnog rotora su ožljebljene, a jedna trećina ostaje neožljebljena (zove se veliki zubac). Sinhroni generatori sa cilindričnim rotorom koriste parne turbine kao pogonsku mašinu, pa se stoga nazivaju turbogeneratori. U drugom slučaju, tj. kada je brzina obrtanja manja od 1000 ob/min, rotor sinhronog generatora ima isturene polove. U tom slučaju, centrifugalne sile na rotor će biti značajno manje, pa ne postoji opasnost od prevelikog mehaničkog naprezanja isturenih polova. Sinhroni generatori koji imaju rotor sa isturenim polovima mogu imati nominalnu snagu od 200 kVA pa do 1000 MVA. Pobudni namotaj rotora je u tom slučaju koncentrični namotaj i namotava se oko isturenih polova. Kao pogonska mašina za ovakav generator se koriste hidraulične turbine (Frensisova, Kaplanova, Peltonova, itd.), pa se ovaj tip generatora naziva hidrogenerator. Kod hidrogeneratora rotor je značajno većeg prečnika u odnosu na turbogenerator, pa aksijalna dužina rotora iznosi okvirno od 14 do 16% prečnika rotora. Rotor hidrogeneratora može biti postavljen horizontalno ili vertikalno. Na slici 1.4.1 prikazani su turbogenerator i hidrogenerator.



Slika 1.4.1 Izgled turbogeneratora (lijevo) [[https://hwr.bhel.com/bhelweb/portfolio\\_details\\_tg.jsp](https://hwr.bhel.com/bhelweb/portfolio_details_tg.jsp)] i hidrogeneratora (desno) [[https://voith.com/corp\\_en/Voith\\_Small\\_Hydro\\_Generator.pdf](https://voith.com/corp_en/Voith_Small_Hydro_Generator.pdf)].

Osim prethodno pomenutih namotaja armature na statoru i pobudnog namotaja na rotoru, sinhroni generator posjeduje i prigušne namotaje koji se takođe nalaze na rotoru, a čija je glavna uloga prigušivanje oscilacija rotora. Modeluju se sa dva namotaja, pri čemu se osa jednog prigušnog namotaja poklapa sa osom pobudnog namotaja, dok je drugi prigušni namotaj postavljen ortogonalno u odnosu na pobudni namotaj. Prigušni namotaji sačinjeni su od bakarnih štapova koji su na svojim krajevima kratkospojeni pomoću dva prstena.

Ovakva konstrukcija odgovara kaveznom namotaju asinhronne mašine. Kod turbogeneratora, funkciju prigušnog namotaja može da obavlja i samo gvožđe rotora. U slučaju nastanka oscilacija rotora, tada obrtno polje sa strane statora presijeca provodnika prigušnog namotaja i u njima indukuje elektromotorne sile, a samim tim i struje (jer su provodnici prigušnog namotaja kratkospojeni), koje stvaraju moment koji teži da suzbije nastale oscilacije rotora. Osim toga, uloge prigušnih namotaja su eliminisanje viših harmonika u indukovanoj elektromotornoj sili, prigušivanje inverznih komponenti polja koje nastaju u slučaju nesimetričnog opterećenja generatora, kao i zalijetanje sinhronne mašine kada radi u motornom režimu (analogno principu rada kaveznih asinhronih motora).

Princip rada sinhronog generatora zasniva se na formiranju obrtnog magnetnog polja. Naime, pobudni namotaj koji se nalazi na rotoru napaja se jednosmjernim pobudnim naponom. Jednosmjerna struja koja tada protiče kroz pobudni namotaj stvara stalno magnetno polje. Međutim, kako je rotor spregnut sa turbinom (parnom, gasnom ili hidraučnom), dovođenje mehaničke snage na turbinu uzrokuje obrtanje rotora. Stoga, mehaničko obrtanje rotora dovodi do stvaranja obrtnog magnetnog polja koje presijeca provodnika trofaznog namotaja armature na statoru. S obzirom na to da su namotaji na statoru prostorno pomjereni za  $2\pi/3$ , u njima se indukuje trofazna elektromotorna sila, čije su fazne vrijednosti vremenski pomjerene takođe za  $2\pi/3$ . Ako su namotaji statora otvoreni, tj. ako nije prikačeno opterećenje, tada kroz njih ne protiče struja i generator radi u režimu praznog hoda. U slučaju priključivanja opterećenja na stator, kroz trofazni namotaj protiču struje koje su vremenski pomjerene za  $2\pi/3$ . Ovakve struje stvaraju svoje magnetno polje, koje se naziva Teslino obrtno polje i koje je u sinhronizmu sa poljem rotora. Magnetno polje statora djeluje na polje rotora, a ta pojava se naziva reakcija armature.

#### **1.4.2 Matematičko modelovanje sinhronog generatora**

Matematički model sinhronog generatora dobija se izvođenjem jednačina za svaki od namotaja statora i rotora, uzimajući u obzir fizičke zakone magnetski spregnutih kola. Prvi korak pri izvođenju matematičkog modela je zapisivanje naponskih jednačina za svaki od šest namotaja sinhronog generatora – tri fazna namotaja armature na statoru, kao i namotaj pobude i dva prigušna namotaja na rotoru. Matrična forma naponskih jednačina data je relacijom (1.37):

$$\begin{bmatrix} v_a(t) \\ v_b(t) \\ v_c(t) \\ -v_F(t) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_F & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_Q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \\ i_F(t) \\ i_D(t) \\ i_Q(t) \end{bmatrix} - \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_a(t) \\ \psi_b(t) \\ \psi_c(t) \\ \psi_F(t) \\ \psi_D(t) \\ \psi_Q(t) \end{bmatrix}, \quad (1.37)$$

gdje je  $t$  vrijeme,  $v$  predstavlja napon,  $i$  struju,  $R$  otpornost i  $\psi$  magnetno obuhvatanja pojedinog namotaja. Indeksi pojedinih veličina predstavljaju odgovarajući namotaj:  $a$ ,  $b$  i  $c$  – fazni namotaji statora,  $F$  – pobudni namotaj,  $D$  i  $Q$  – prigušni namotaji na rotoru i  $s$  predstavlja stator (podrazumijeva se trofazni simetrični namotaj na statoru, tj. otpornosti sva tri namotaja su jednake). Sve veličine iz prethodne relacije su date u SI jedinicama.

Prilikom izvođenja jednačina magnetnog obuhvatanja, neophodno je uzeti u obzir sopstveni fluks, ali i međusobni fluks pojedinih namotaja, s obzirom na to da magnetno obuhvatanje namotaja potiče od struje samog tog namotaja, ali i od struje drugih namotaja:

$$\begin{bmatrix} \psi_a(t) \\ \psi_b(t) \\ \psi_c(t) \\ \psi_F(t) \\ \psi_D(t) \\ \psi_Q(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{aF} & L_{aD} & L_{aQ} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bF} & L_{bD} & L_{bQ} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & L_{cF} & L_{cD} & L_{cQ} \\ L_{Fa} & L_{Fb} & L_{Fc} & L_{FF} & L_{FD} & L_{FQ} \\ L_{Da} & L_{Db} & L_{Dc} & L_{DF} & L_{DD} & L_{DQ} \\ L_{Qa} & L_{Qb} & L_{Qc} & L_{QF} & L_{QD} & L_{QQ} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \\ i_F(t) \\ i_D(t) \\ i_Q(t) \end{bmatrix} \quad (1.38)$$

U prethodnoj relaciji figurišu sopstvene induktivnosti, ali i međusobne induktivnosti pojedinih namotaja. Neke od ovih induktivnosti zavise od ugla  $\theta$ , koji predstavlja poziciju rotora u odnosu na referentnu osu, tj. osu faze  $a$ . Induktivnosti koje se pojavljuju u relaciji (1.38) se mogu podijeliti na sljedeći način:

- 1) Sopstvene induktivnosti namotaja na statoru računaju se na sljedeći način:

$$\begin{aligned} L_{aa} &= L_s + L_m \cdot \cos 2\theta, \\ L_{bb} &= L_s + L_m \cdot \cos [2(\theta - 2\pi/3)], \\ L_{cc} &= L_s + L_m \cdot \cos [2(\theta + 2\pi/3)], \end{aligned} \quad (1.39)$$

gdje su  $L_s$  i  $L_m$  konstante induktivnosti i važi  $L_s > L_m$ .

- 2) Sopstvene induktivnosti namotaja na rotoru su konstantne, pa se može koristiti i jedan indeks umjesto dva, tj.  $L_{FF}=L_F$ ,  $L_{DD}=L_D$  i  $L_{QQ}=L_Q$ .
- 3) Međusobne induktivnosti između namotaja na statoru zavise od ugla  $\theta$ , ali su simetrične i računaju se na sljedeći način:

$$\begin{aligned} L_{ab} &= L_{ba} = -M_s - L_m \cos[2(\theta + \pi/6)], \\ L_{bc} &= L_{cb} = -M_s - L_m \cos[2(\theta - \pi/2)], \\ L_{ca} &= L_{ac} = -M_s - L_m \cos[2(\theta + 5\pi/6)], \end{aligned} \quad (1.40)$$

pri čemu je  $|M_s| > L_m$ .

- 4) Kod definisanja međusobnih induktivnosti namotaja na rotoru važno je napomenuti da su pobudni namotaj i  $D$  – prigušni namotaj postavljeni po istoj osi, dok je  $Q$  – prigušni namotaj postavljen pod uglom od  $90^\circ$  u odnosu na njih. Stoga, međusobna induktivnost između pobudnog namotaja i  $D$  – prigušnog namotaja  $L_{FD}$  je konstantna ( $L_{FD}=L_{DF}=M_R$ ), dok su ostale međusobne induktivnosti  $L_{FQ}$  i  $L_{DQ}$  jednake nuli.
- 5) Međusobne induktivnosti namotaja na statoru i namotaja na rotoru su zavisne od pozicije rotora i računaju se na sljedeći način:

$$\begin{aligned} L_{aF} &= L_{Fa} = M_F \cdot \cos \theta, \\ L_{bF} &= L_{Fb} = M_F \cdot \cos(\theta - 2\pi/3), \\ L_{cF} &= L_{Fc} = M_F \cdot \cos(\theta + 2\pi/3), \end{aligned} \quad (1.41)$$

$$\begin{aligned} L_{aD} &= L_{Da} = M_D \cdot \cos \theta, \\ L_{bD} &= L_{Db} = M_D \cdot \cos(\theta - 2\pi/3), \\ L_{cD} &= L_{Dc} = M_D \cdot \cos(\theta + 2\pi/3), \end{aligned} \quad (1.42)$$

$$\begin{aligned} L_{aQ} &= L_{Qa} = M_Q \cdot \sin \theta, \\ L_{bQ} &= L_{Qb} = M_Q \cdot \sin(\theta - 2\pi/3), \\ L_{cQ} &= L_{Qc} = M_Q \cdot \sin(\theta + 2\pi/3), \end{aligned} \quad (1.43)$$

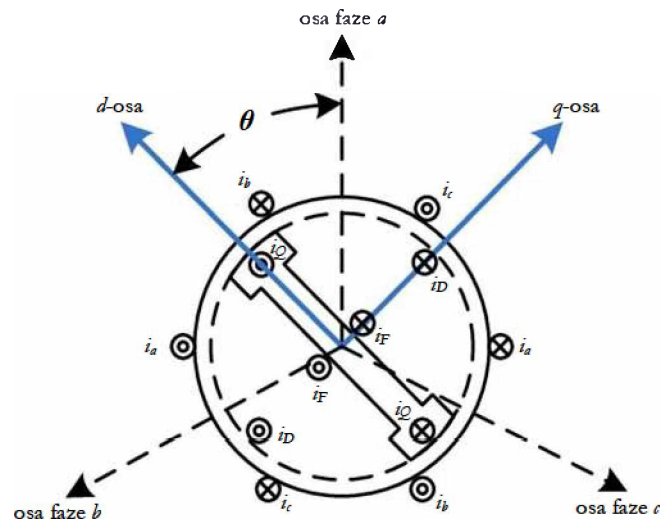
gdje su  $M_F$ ,  $M_D$  i  $M_Q$  konstantne induktivnosti.

Matematičko modelovanje sinhronog generatora se značajno uprošćava ukoliko se izvrši transformacija fizičkih promjenljivih statora, vodeći pri tome računa o osnoj simetriji mašine. Najpoznatija transformacija ovog tipa je Parkova transformacija [1, 2, 88]. Ova transformacija definiše novi skup promjenljivih, koje se dobijaju projekcijom stvarnih

promjenljivih pojedinih faza statora ( $a$ ,  $b$  i  $c$ ) na sljedeće tri ose: podužnu ( $d$ ) osu koja se poklapa sa osom pobudnog namotaja, poprečnu ( $q$ ) osu koja je normalna na  $d$  osu, i stacionarnu ( $0$ ) osu. Ukoliko se osa faze  $a$  usvoji za referentnu osu, i ako je  $\theta$  položaj  $d$  ose u odnosu na referentnu osu, tada se struje po stacionarnoj,  $d$  i  $q$  osi dobijaju prema relaciji u nastavku:

$$\begin{aligned} i_d &= \frac{2}{3} \cdot [i_a \cdot \cos \theta + i_b \cdot \cos(\theta - 2\pi/3) + i_c \cdot \cos(\theta + 2\pi/3)], \\ i_q &= \frac{2}{3} \cdot [i_a \cdot \sin \theta + i_b \cdot \sin(\theta - 2\pi/3) + i_c \cdot \sin(\theta + 2\pi/3)], \\ i_0 &= \frac{1}{\sqrt{3}} (i_a + i_b + i_c). \end{aligned} \quad (1.44)$$

Prethodna relacija pokazuje da je efekat Parkove transformacije ustvari transformacija statorskih veličina iz  $a$ - $b$ - $c$  koordinatnog sistema u novi  $0$ - $d$ - $q$  koordinatni sistem koji se obrće sinhronom brzinom sa rotorom. Pozicija osa oba koordinatna sistema u odnosu na geometriju sinhronog generatora prikazana je na slici 1.4.2.



Slika 1.4.2 Ilustracija položaja namotaja i osa sinhronog generatora.

Kao što je već pomenuto, većina induktivnosti iz relacije (1.38) su vremenski promjenljivi, zato što zavise od pozicije rotora  $\theta$  koja je funkcija vremena, tj.  $\theta=f(t)$ . Zavisnost induktivnosti od vremena može se eliminisati primjenom Parkove transformacije, tj. prebacivanjem magnetnog obuhvatanja namotaja na statoru ( $a$ ,  $b$  i  $c$ ) u  $0$ - $d$ - $q$  koordinatni sistem.



Modifikovane jednačine magnetnog obuhvatanja svih namotaja sinhronog generatora mogu se u matricnoj formi zapisati na sljedeći način:

$$\begin{bmatrix} \psi_0(t) \\ \psi_d(t) \\ \psi_q(t) \\ \psi_F(t) \\ \psi_D(t) \\ \psi_Q(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_d & 0 & kM_F & kM_D & 0 \\ 0 & 0 & L_q & 0 & 0 & kM_Q \\ 0 & kM_F & 0 & L_F & M_R & 0 \\ 0 & kM_D & 0 & M_R & L_D & 0 \\ 0 & 0 & kM_Q & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_0(t) \\ i_d(t) \\ i_q(t) \\ i_F(t) \\ i_D(t) \\ i_Q(t) \end{bmatrix}, \quad (1.45)$$

gdje su uvedene nove induktivnosti koje su definisane kao što slijedi:

$$\begin{aligned} L_d &= L_s + M_s + \frac{3}{2}L_m, \\ L_q &= L_s + M_s - \frac{3}{2}L_m, \\ L_0 &= L_s - 2M_s, \\ k &= \sqrt{\frac{3}{2}}. \end{aligned} \quad (1.46)$$

U relaciji (1.45)  $\psi_d$  označava magnetno obuhvatanje u ekvivalentnom  $d$ -namotaju statora koji se poklapa sa  $d$  osom i koji se kreće zajedno sa rotorom, a  $\psi_q$  označava magnetno obuhvatanje u ekvivalentnom  $q$ -namotaju statora koji se poklapa sa  $q$  osom. Bitno je pomenuti da je fluks stacionarnog namotaja  $\psi_0$  potpuno raspregnut od flukseva ostalih namotaja. Takođe, veoma je važno naglasiti da je matrica induktivnosti u formuli (1.45) konstantna, tj. da induktivnosti ne zavise od vremena, što umnogome olakšava modelovanje sinhronog generatora.

Primjenom Parkove transformacije na statorske veličine iz relacije (1.37) mogu se izvesti naponske jednačine za namotaje u  $0dq$  sistemu. Uzimajući u obzir da su sve induktivnosti konstantne, tj. da važi  $\frac{d\psi(t)}{dt} = L \cdot \frac{di(t)}{dt}$  dobijaju se sljedeće naponske jednačine zapisane u matricnom obliku:

$$\begin{bmatrix} v_0(t) \\ v_d(t) \\ v_q(t) \\ -v_F(t) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & \omega L_q & 0 & 0 & \omega kM_\varrho \\ 0 & -\omega L_d & R_r & -\omega kM_F & -\omega kM_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_F & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_\varrho \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_0(t) \\ i_d(t) \\ i_q(t) \\ i_F(t) \\ i_D(t) \\ i_\varrho(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_d & 0 & kM_F & kM_D & 0 \\ 0 & 0 & L_q & 0 & 0 & kM_\varrho \\ 0 & kM_F & 0 & L_F & M_R & 0 \\ 0 & kM_D & 0 & M_R & L_D & 0 \\ 0 & 0 & kM_\varrho & 0 & 0 & L_\varrho \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_0(t) \\ i_d(t) \\ i_q(t) \\ i_F(t) \\ i_D(t) \\ i_\varrho(t) \end{bmatrix}. \quad (1.47)$$

Kao što je već pomenuto kod analize magnetnog obuhvatanja pojedinih namotaja, napon nultog redosljeda je raspregnut od ostalog dijela sistema, pa se ta jednačina može rješavati nezavisno. Preostale jednačine su međusobno zavisne, čime se ogleda magnetna sprega između preostalih pet namotaja. Takođe, u prethodnom setu jednačina karakteristično je prisustvo članova koji zavise od brzine ( $\omega L_q$ ,  $\omega L_d$ ,  $\omega kM_\varrho$ ,  $\omega kM_F$ ,  $\omega kM_D$ ). Uzimajući u obzir da oni članovi koji sadrže brzinu i neku od induktivnosti po  $q$ -osi figurišu u naponskoj jednačini za napon po  $d$ -osi i obratno – u jednačini za napon po  $q$ -osi figurišu članovi koji su proizvod brzine obrtanja i neke od induktivnosti po  $d$ -osi, jasno je da i ovi članovi odražavaju spregu između namotaja koji su postavljeni po  $d$ -osi i  $q$ -osi.

U cilju prilagođavanja naponskih jednačina kako bi se došlo do ekvivalentnih zamjenskih šema sinhronog generatora, induktivnost kalema  $L_x$  se dijeli na dva dijela: induktivnost rasipanja označenu sa  $l_x$  i induktivnost magnećenja označenu sa  $L_{mox}$ , gdje se slovo  $x$  u indeksu zamjenjuje sa odgovarajućim namotajem: ( $L_x = l_x + L_{mox}$ ). U cilju prelaska sa apsolutnog na relativni sistem jedinica (r.j.), potrebno je odabrati odgovarajuće bazne veličine statora i rotora, kao što je detaljno prikazano u [2]. Pri tome se koristi koncept jednakih međusobnih obuhvata fluksa, kao što je predloženo od strane *Anderson-a* i *Fouad-a* [2]. Prema ovom konceptu, postavlja se uslov da bazna pobudna struja ili bazna struja prigušnog namotaja po  $d$ -osi proizvodi istu vrijednost fluksa u međugvožđu koji proizvodi i bazna struja statora djelujući kroz fiktivni namotaj po  $d$ -osi. Drugim riječima, zajednički fluks u  $d$ -osi je jednak, što ima za posljedicu da su fluksevi  $L_{md} \cdot i_d$ ,  $\psi_F$  i  $\psi_D$  jednaki (u r.j.). To dalje slijedi da je induktivnost magnećenja namotaja statora po  $d$ -osi ( $L_{md}$ ) jednaka međusobnim

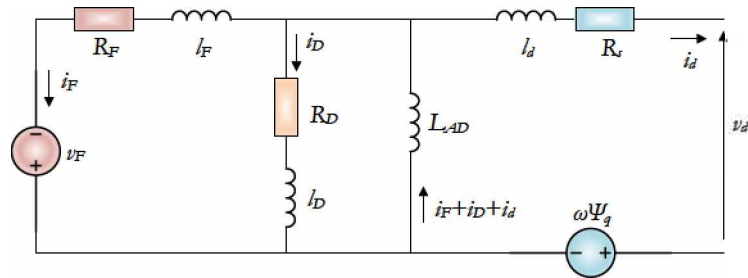
induktivnostima  $kM_F$  (između namotaja statora po  $d$ -osi i pobudnog namotaja),  $kM_D$  (između namotaja statora po  $d$ -osi i prigušnog namotaja po  $d$ -osi) i  $M_R$  (između pobudnog namotaja i prigušnog namotaja po  $d$ -osi). Ova induktivnost, izražena u r.j., označava se sa  $L_{AD}$ :

$$L_{AD} = L_{md} = kM_F = kM_D = M_R \quad [\text{r.j.}] \quad (1.48)$$

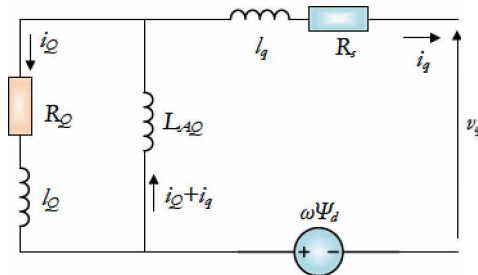
Analogno tome, za  $q$ -osu se definiše zajednička idnuktivnost  $L_{AQ}$ :

$$L_{AQ} = L_{mq} = kM_Q \quad [\text{r.j.}] \quad (1.49)$$

Usvajajući prethodno opisane jednakosti, naponske jednačine date relacijom (1.47) mogu se predstaviti ekvivalentnim kolima sinhronog generatora po  $d$ -osi (slika 1.4.3) i po  $q$ -osi (slika 1.4.4).



Slika 1.4.3 Ekvivalentno kolo sinhronog generatora po  $d$ -osi.



Slika 1.4.4 Ekvivalentno kolo sinhronog generatora po  $q$ -osi.

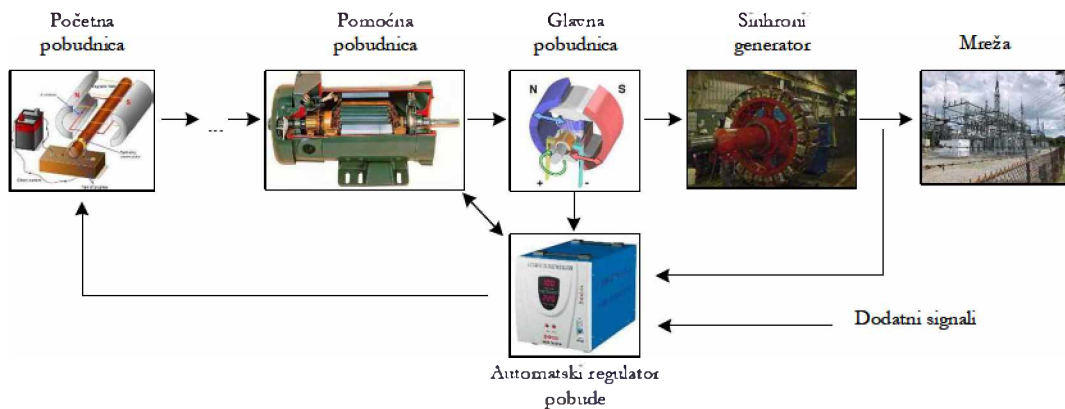
## 1.5 Tipovi pobudnih sistema

S obzirom na vrstu izvora jednosmjerne struje pobude sinhronog generatora, postoje tri osnovna tipa sistema pobude [2]:

- 1) jednosmjerni (DC) sistemi pobude, kod kojih je generator jednosmjerne struje izvor struje pobude za sinhroni generator;
- 2) nezavisni naizmjenični (AC) sistemi pobude, gdje je izvor pobudne struje pomoćni generator naizmjenične struje sa obrtnim ili stacionarnim ispravljačem, koji pretvara naizmjeničnu u jednosmjernu pobudnu struju;
- 3) statički naizmjenični (ST) sistemi samopobude, za koje je specifično to što se naizmjenična struja dobija sa krajeva samog sinhronog generatora, i pomoću ispravljača pretvara u jednosmjernu pobudnu struju.

### 1.5.1 Jednosmjerni (DC) sistemi pobude

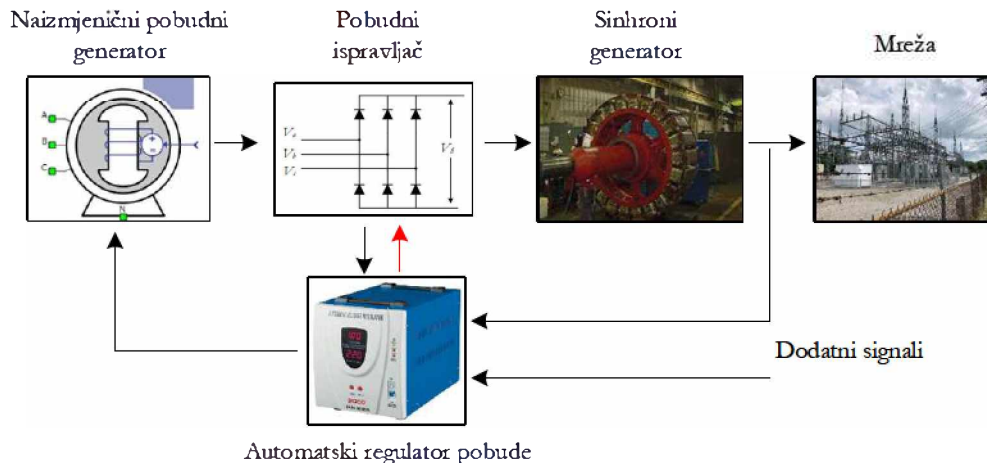
Kod jednosmjernih sistema pobude, pobudnu struju proizvodi generator jednosmjerne struje sa komutatorom. Ovaj generator može biti spregnut na istoj osovinu sa glavnim sinhronim generatorom, a može biti pokrenut pomoću nekog nezavisnog motora koji se napaja iz mreže sopstvene potrošnje elektrane. Generator jednosmjerne struje može biti sa sopstvenom otočnom pobudom, sa nezavisnom pobudom ili sa složenom (kombinovanom) pobudom. Ako je u pitanju generator jednosmjerne struje sa nezavisnom pobudom, tada je njegova pobuda obezbjeđena korišćenjem pomoćne pobudnice. Ovakvi sistemi se više skoro ne proizvode, već postoje jedino i starijim elektranama. Većina ovako realizovanih pobudnih sistema nema mogućnost forsiranja pobude. Takođe, ovakvi sistemi često koriste specijalne obrtne pojačavače za pobuđivanje pomoćne pobudnice ili prve u nizu kaskadno vezanih pomoćnih pobudnica. Stoga, na šemi koja je data u nastavku, takav obrtni pojačavač označen je kao početna pobudnica. Regulatori koji se koriste kod ovakvih pobudnih sistema su obično elektromehaničkog tipa sa reostatom, a noviji jednosmjerni pobudni sistemi koriste i regulatore na principu magnetnih i obrtnih pojačavača. Opšta šema sistema za regulaciju pobude sa jednosmjernim pobudnim sistemom data je na slici 1.5.1.



Slika 1.5.1 Opšta šema sistema za regulaciju pobude sa jednosmjernim pobudnim sistemom.

### 1.5.2 Nezavisni naizmjenični (AC) pobudni sistemi

Nezavisni naizmjenični pobudni sistemi karakterišu se prisustvom pobudnog sinhronog generatora i pobudnog ispravljača, pomoću kojih se dobija jednosmjerna struja pobude. Regulatori koji se koriste kod ovih pobudnih sistema mogu biti elektronski regulatori ili kombinacija obitnih i magnetnih pojačavača. Opšta blok šema sistema za regulaciju pobude sa nezavisnom naizmjeničnom pobudom data je na slici 1.5.2.

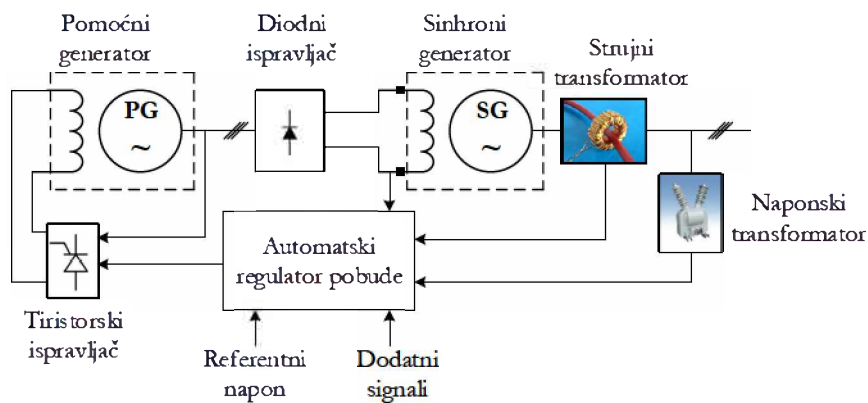


Slika 1.5.2 Opšta šema sistema za regulaciju pobude sa nezavisnim naizmjeničnim pobudnim sistemom.

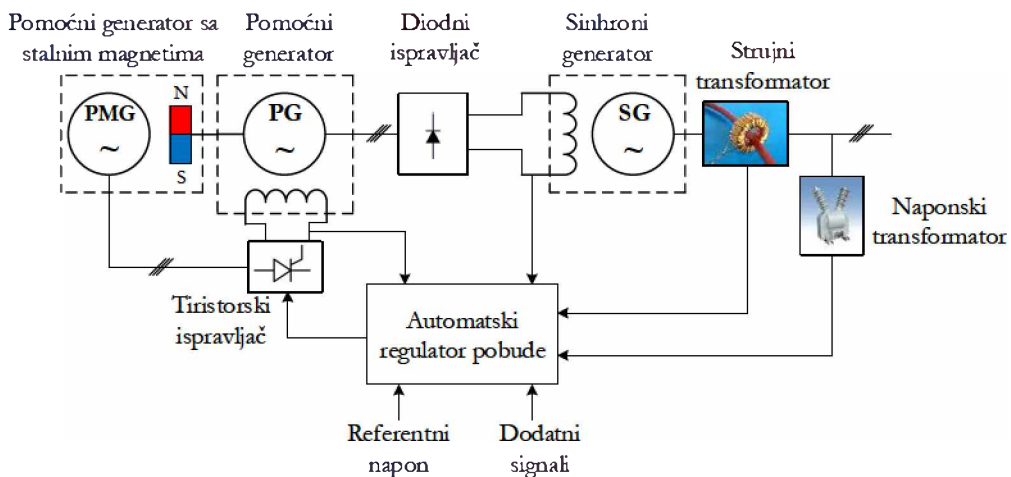
Sa konstrukcionog aspekta, postoji veliki broj različitih formi realizacije nezavisnih naizmjeničnih pobudnih sistema. Pobudni ispravljači mogu biti neupravljivi (diodni) ili upravljivi (tiristorski), a takođe mogu biti stacionarni ili obitni.

U slučaju kada se koriste neupravljivi ispravljači, pobuda glavnog sinhronog generatora reguliše se promjenom napona pobude naizmjeničnog pobudnog (pomoćnog) generatora.

Ako je veza između pobudnog ispravljača i pobudnog namotaja glavnog sinhronog generatora ostvarena preko kliznih prstenova na rotoru, tada je riječ o stacionarnom nekontrolisanom pobudnom ispravljaču. Blok šema sistema za regulaciju pobude sa ovim ispravljačem data je na slici 1.5.3. Sa druge strane, kada se primijenjuje rotirajući ispravljač, diodni ispravljač se nalazi na istoj osovini zajedno sa glavnim sinhronim generatorom i naizmjeničnom pobudnicom. Na taj način, dobija se beskontaktni naizmjenični pobudni sistem, za koji je karakteristično da nema prstenova i četkica na rotoru glavnog sinhronog generatora. U tom slučaju, neophodno je prisustvo sinhronog generatora sa stalnim magnetima, koji obezbjeđuje pobudu za naizmjeničnu pobudnicu. Na slici 1.5.4 prikazan je sistem za regulaciju pobude sa obrtnim neupravljivim pobudnim ispravljačem.

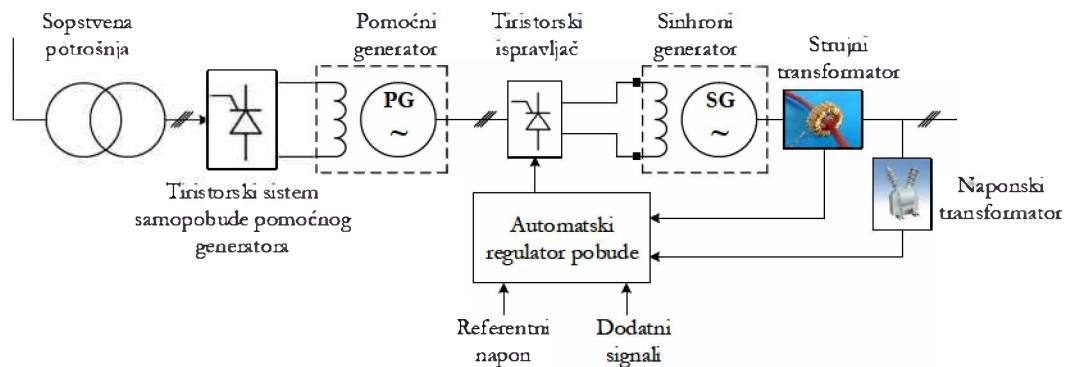


Slika 1.5.3 Šema sistema za regulaciju pobude sa stacionarnim neupravljivim ispravljačem.

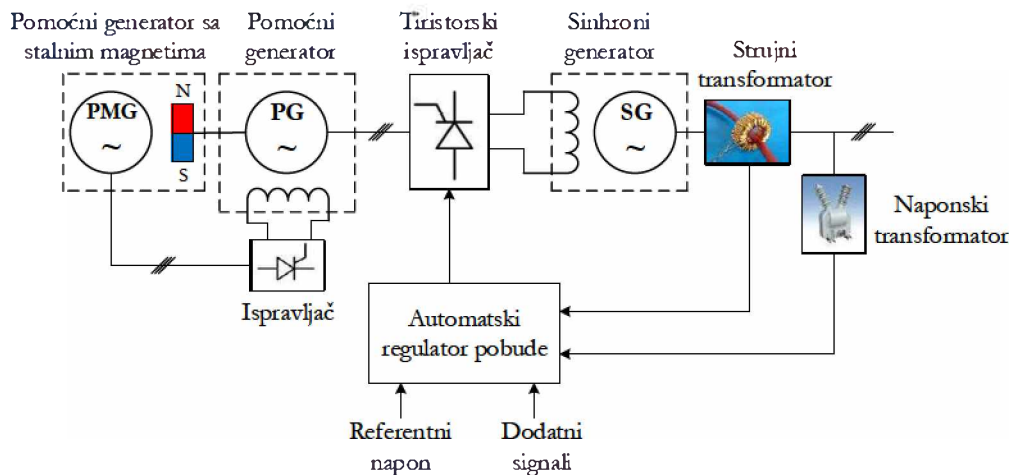


Slika 1.5.4 Šema sistema za regulaciju pobude sa rotirajućim neupravljivim ispravljačem.

Kod novijih realizacija nezavisnih naizmjeničnih pobudnih sistema, diodni ispravljači su zamijenjeni tiristorskim ispravljačima. Analogno diodnim, tiristorski ispravljači takođe mogu biti stacionarni i obitni. Regulacija pobude naizmjenične pobudnice nije potrebna, jer se onda upravljački signali sa izlaza regulatora vode direktno na tiristorski most. U tom slučaju, pobuda glavnog sinhronog generatora reguliše se pomoću ugla paljenja tiristora samog pobudnog ispravljača, pa stoga pobuda naizmjenične pobudnice nije regulisana. Odziv ovih pobudnih sistema je izuzetno brz, skoro bez kašnjenja. Na slikama 1.5.5 i 1.5.6 prikazane su šeme sistema za regulaciju pobude sa stacionarnim i obitnim upravljivim ispravljačem, respektivno.



Slika 1.5.5 Šema sistema za regulaciju pobude sa stacionarnim upravljivim ispravljačem.

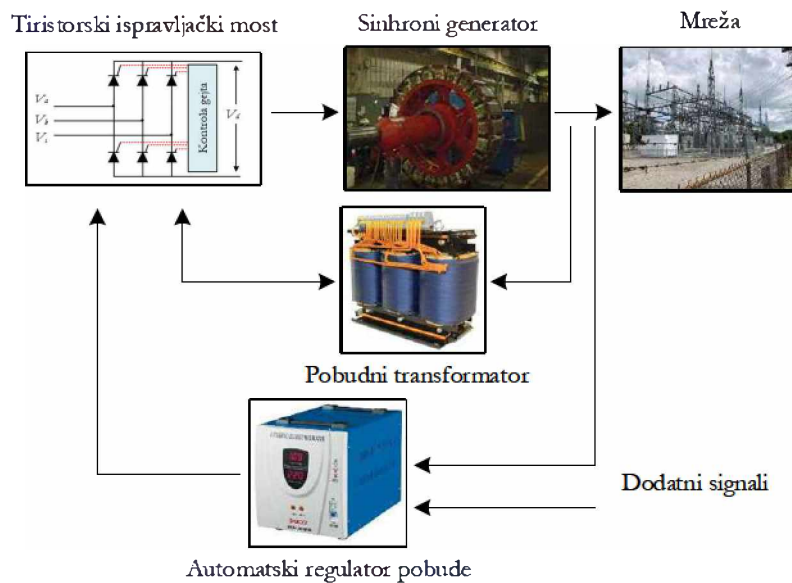


Slika 1.5.6 Šema sistema za regulaciju pobude sa rotirajućim upravljivim ispravljačem.

### 1.5.3 Statički naizmjenični (ST) sistemi samopobude

Statički pobudni sistemi se baziraju na tome što uzimaju energiju sa krajeva samog generatora kojeg pobuđuju ili sa sabirnica sopstvene potrošnje elektrane, pa se stoga nazivaju

i samopobudni sistemi. Ovi sistemi sastoje se od pobudnog transformatora i ispravljača, koji predstavljaju stacionarne komponente. S obzirom na to da je izvor snage za ove pobudne sisteme generator koji se pobuđuje, jasno je da se ovi sistemi moraju imati neki izvor početne pobude kako bi generator mogao započeti indukovanje napona na svojim krajevima. Kao izbor početne pobude najčešće se koristi akumulatorska baterija sopstvene potrošnje elektrane. Regulator kod statičkih sistema samopobude je izveden kao elektronski. Ispravljači kod statičkih sistema pobude mogu biti neupravljivi (diode) i upravljivi (tiristori). U slučaju kada se koriste neupravljivi ispravljači, regulacija struje pobude vrši se podešavanjem zasićenja pobudnog transformatora. Sa druge strane, kada se koriste tiristorski ispravljači, pobudna struja se reguliše direktnom kontrolom ugla okidanja tiristora na ispravljačkom mostu. Na slici 1.5.7 prikazana je opšta šema sistema za regulaciju pobude sa statičkim sistemom samopobude, koji koristi tiristorski ispravljački most.



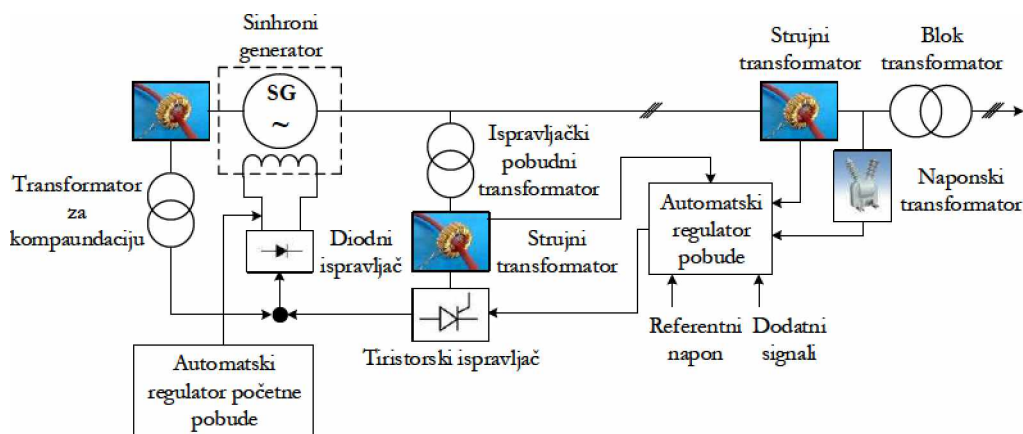
Slika 1.5.7 Opšta šema sistema za regulaciju pobude sa statičkim pobudnim sistemom (sa tiristorskim ispravljačem).

Ovako strukturirani statički pobudni sistemi nazivaju se još i sistemi bez kompaundacije. Veliki nedostatak ovih sistema je taj što se, pri određenim kvarovima u elektroenergetskoj mreži, na krajevima generatora može javiti niska vrijednost napona. S obzirom na to da se pobudni sistem napaja sa krajeva samog generatora, pojava niske vrijednosti napona na krajevima generatora se preko pobudnog transformatora i ispravljačkog mosta preslikava u nisku vrijednost pobudnog napona, a samim tim i pobudne struje generatora. Međutim, u

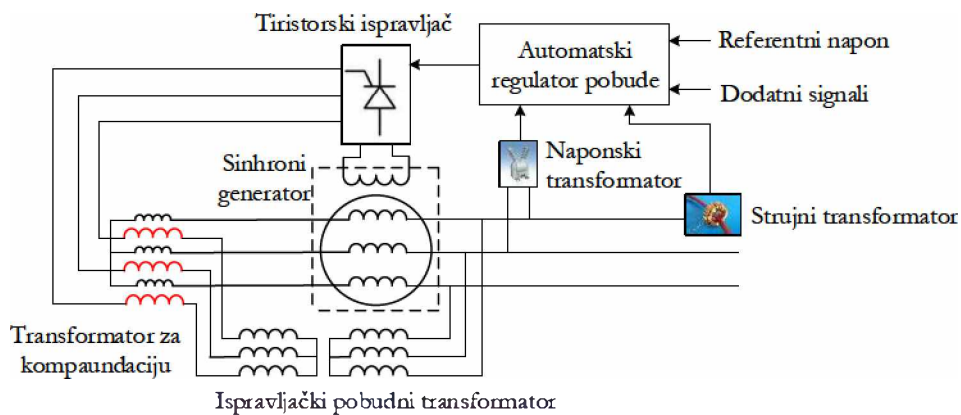


cilju ponovnog uspostavljanja željene vrijednosti napona na krajevima generatora, ovakva pogonska situacija zahtijeva visoke vrijednosti pobudne struje. Ovakav nedostatak se prevazilazi tako što se pobudni transformator izvodi kao kompaundna jedinica. Drugim riječima, sekundarni napon pobudnog transformatora zavisi od napona i struje primara. Na taj način omogućava se stabilizacija pobudnog sistema u slučajevima kvara, zbog toga što se pad napona na primaru pobudnog transformatora kompenzuje velikim strujama kvara. Kod statičkih sistema samopobude moguće su tri vrste kompaundacije:

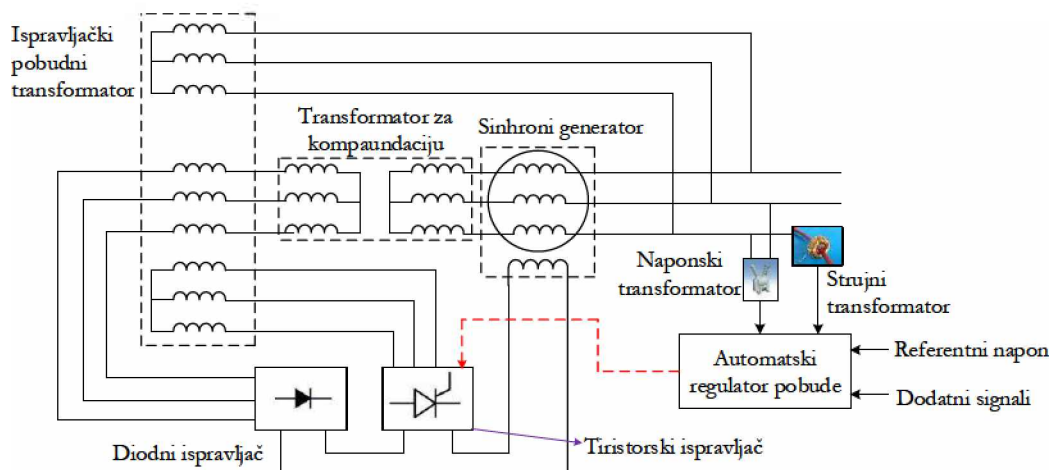
1. strujna kompaundacija, prikazana na slici 1.5.8, karakteriše se time što se uticaj struje opterećenja dodaje jednosmjernom pobudnom naponu na izlazu iz ispravljača;
2. fazna kompaundacija, koja je prikazana na slici 1.5.9, specifična je po tome što se uticaj struje opterećenja dodaje naizmjeničnom pobudnom naponu prije ispravljača;
3. kombinovana struja i fazna kompaundacija, kao što je prikazano na slici 1.5.10.



Slika 1.5.8 Šema sistema za regulaciju pobude sa statičkim pobudnim sistemom sa strujnom kompaundacijom.



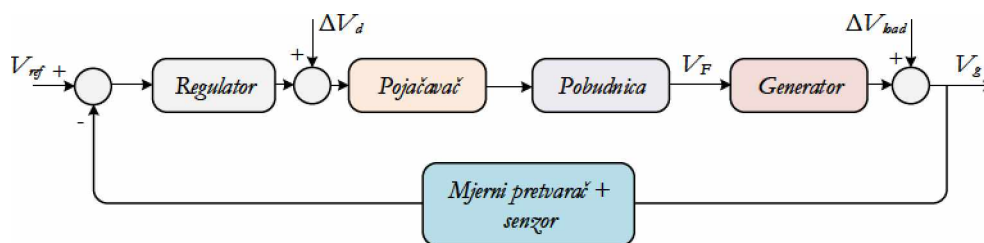
Slika 1.5.9 Šema sistema za regulaciju pobude sa statičkim pobudnim sistemom sa faznom kompaundacijom.



Slika 1.5.10 Šema sistema za regulaciju pobude sa statičkim pobudnim sistemom sa kombinovanom strujnom i faznom kompaundacijom.

## 1.6 Uprošćena struktura sistema za regulaciju pobude

Jedna od najaktuelnijih naučnih tema koja je vezana za sisteme za regulaciju pobude sinhronog generatora je optimalno podešavanje parametara regulatora. Veliki broj naučnih radova posvećen je problematici analize performansi i podešavanja parametara različitih vrsta regulatora kod sistema za regulaciju pobude [3 – 47]. Parametri regulatora se podešavaju sa ciljem postizanja određenih željenih performansi sistema za regulaciju pobude, koje su najčešće vezane za vremenski ili frekventni odziv napona na izlazu iz generatora  $V_g$ . Prilikom rješavanja ovakvog optimizacionog problema, u svim pomenutim radovima se koristi značajno pojednostavljena šema sistema za regulaciju pobude, koja je prikazana na slici 1.6.1.



Slika 1.6.1 Uprošćena šema sistema za regulaciju pobude sinhronog generatora.

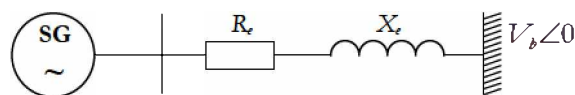
Kod ovakve reprezentacije sistema za regulaciju pobude, kao što se vidi sa prethodne slike, zanemaren je uticaj svih prethodno opisanih limitera i dodatnih funkcionalnih blokova, kao i dodatnih povratnih sprega. Shodno ovakvoj šemi, signal greške predstavlja razliku između referentne vrijednosti napona i izmjerene vrijednosti napona na krajevima generatora. Takođe, na slici se mogu uočiti i signali poremećaja na upravljački signal  $\Delta V_d$  i poremećaja

opterećenja generatora  $\Delta V_{load}$ . U normalnom, stacionarnom radnom režimu ovi signali su jednaki 0. Ovako uprošćena struktura se sastoji iz regulatora, pojačavača signala, pobudnice, sinhronog generatora i mjernog pretvarača i senzora koji su objedinjena u jedan funkcionalni blok. Dodatno pojednostavljenje se odnosi na modelovanje samih komponenti ovako predstavljenog sistema za regulaciju pobude. Naime, u dostupnoj literaturi, svaka komponenta ovog sistema je modelovana sistemom prvog reda, tj. prenosnom funkcijom  $W(s)$  koja sadrži pojačanje  $K$  i vremensku konstantu  $T$ . Ukoliko se za pojačavač usvoji indeks  $A$  (*amplifier*), za pobudnicu  $E$  (*exciter*), za generator  $G$  i za senzorski blok  $S$ , tada se pojedine funkcije prenosa za svaku komponentu definišu na sljedeći način:

$$\begin{aligned} W_A(s) &= \frac{K_A}{1 + T_A \cdot s}, & W_E(s) &= \frac{K_E}{1 + T_E \cdot s}, \\ W_G(s) &= \frac{K_G}{1 + T_G \cdot s}, & W_S(s) &= \frac{K_S}{1 + T_S \cdot s}. \end{aligned} \quad (1.50)$$

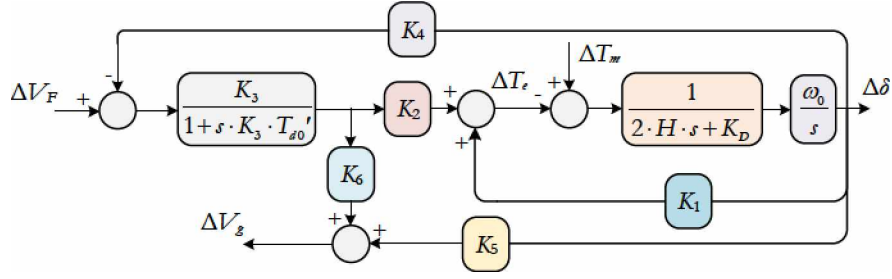
U pomenutim radovima u kojima se koristi ovako predstavljena šema sistema za regulaciju pobude, date su i tipične vrijednosti za pojačanja i vremenske konstante:  $K_A=10$ ,  $T_A=0.1$ ,  $K_E=1$ ,  $T_E=0.4$ ,  $K_G=1$ ,  $T_G=1$ ,  $K_S=1$  i  $T_S=0.01$  [3 – 27, 29 – 44, 46].

Takođe, u [28] je demonstrirana optimizacija parametara regulatora pobude korišćenjem strukture sa slike 1.6.1, pri čemu je generator predstavljen modelom trećeg reda (umjesto modelom prvog reda kao u relaciji (1.50)). Prenosne funkcije pojačavača i pobudnice su objedinjene u jednu prenosnu prvog reda funkciju, označenu sa  $W_A(s)$ , koja je identična kao u relaciji (1.50). Prenosna funkcija senzora je takođe ista kao u relaciji (1.50). Model trećeg reda generatora, koji se naziva *Heffron-Phillips-ov* model [28], izveden je uz pretpostavku da je generator priključen na mrežu čiji je moduo napona  $V_b$ , shodno slici 1.6.2. Takođe,  $R_e$  i  $X_e$  označavaju ekvivalentnu otpornost i reaktansu svih vodova i transformatora koji se nalaze između generatora i mreže.



Slika 1.6.2 Blok dijagram sinhronog generatora priključenog na mrežu.

Blok dijagram modela generatora trećeg reda ilustrovan je na sljedećoj slici.



Slika 1.6.3 Blok dijagram *Heffron-Phillips*-ovog modela sinhronog generatora.

S obzirom na to da je *Heffron-Phillips*-ov model generatora izveden linearizacijom u okolini neke radne tačke, primjećuje se da na dijagramu figurišu promjene, tj. priraštaji određenih veličina, ispred kojih stoji znak  $\Delta$ . Takođe, prikazani model generatora ima dva ulaza,  $\Delta V_F$  (priraštaj napona pobude) i  $\Delta T_m$  (priraštaj mehaničkog momenta). Kao što je sugerisano u [28], pretpostavlja se da nema promjene mehaničkog momenta generatora, tj. da  $\Delta T_m$  iznosi 0. Navedena pretpostavka je u potpunosti opravdana uzimajući u obzir činjenicu da se dvije regulacione konture kod sinhronog generatora (aktivna snaga-frekvencija i reaktivna snaga-napon) mogu posmatrati odvojeno. Drugim riječima, promjena momenta na turbini, tj. promjene aktivne snage, imaju zanemarljivo mali uticaj na napon generatora. Na prethodno prikazanom dijagramu,  $T_{d0}'$  predstavlja tranzijentnu vremensku konstantu otvorenog kola generatora po  $d$ -osi,  $K_D$  je faktor prigušenja,  $H$  je inerciona konstanta,  $\omega_0$  je sinhrona brzina,  $\Delta T_e$  je priraštaj elektromagnetnog momenta,  $\Delta \delta$  je priraštaj ugla rotora, dok su  $K_1 - K_6$  konstante *Heffron-Phillips* modela. Pomenute konstante mogu se izračunati na osnovu poznatih radnih uslova i pojedinih parametara generatora, shodno sljedećim relacijama:

$$K_1 = C_3 \cdot E_{g0} - C_1 \cdot I_{g0} \cdot (X_q - X_d'), \quad (1.51)$$

$$K_2 = C_4 \cdot E_{g0} - C_2 \cdot I_{g0} \cdot (X_q - X_d'), \quad (1.52)$$

$$K_3 = \frac{1}{1 - C_2 \cdot (X_d - X_d')}, \quad (1.53)$$

$$K_4 = -C_1 \cdot (X_d - X_d'), \quad (1.54)$$

$$K_5 = -C_3 \cdot X_q \cdot \frac{V_{d0}}{V_{g0}} + C_1 \cdot X_d' \cdot \frac{V_{q0}}{V_{g0}}, \quad (1.55)$$

$$K_6 = -C_4 \cdot X_q \cdot \frac{V_{d0}}{V_{g0}} + (1 + C_2 \cdot X_d') \cdot \frac{V_{q0}}{V_{g0}}. \quad (1.56)$$

U prethodnim relacijama, indeks 0 označava početnu vrijednost odgovarajuće veličine, pa su stoga  $I_{d0}$  i  $I_{q0}$  početne vrijednosti struje, a  $V_{d0}$  i  $V_{q0}$  su početne vrijednosti napona po  $d$ -osi i  $q$ -osi,  $V_{g0}$  je početna vrijednost napona generatora,  $X_d$  i  $X_q$  su sinhronne reaktanse namotaja statora po  $d$ -osi i  $q$ -osi,  $X_d'$  je tranzijenta reaktansa namotaja statora po  $d$ -osi, dok je  $E_{q0}$  početna vrijednost napona  $E_q$  koji definiše položaj  $q$ -ose i koji se računa prema sljedećoj relaciji:

$$E_q \angle \delta = \underline{V}_g + (\underline{R}_s + jX_q) \cdot \underline{I}_g. \quad (1.57)$$

Konstante  $C_1 - C_4$  se računaju na sljedeći način:

$$C_1 = \frac{R_s \cdot V_b \cdot \cos \delta_0 - (X_q + X_e) \cdot V_b \cdot \sin \delta_0}{R_s^2 + (X_d' + X_e) \cdot (X_q + X_e)}, \quad (1.58)$$

$$C_2 = \frac{-(X_q + X_e)}{R_s^2 + (X_d' + X_e) \cdot (X_q + X_e)}, \quad (1.59)$$

$$C_3 = \frac{(X_d' + X_e) \cdot V_b \cdot \cos \delta_0 + R_s \cdot V_b \cdot \sin \delta_0}{R_s^2 + (X_d' + X_e) \cdot (X_q + X_e)}, \quad (1.60)$$

$$C_4 = \frac{R_s}{R_s^2 + (X_d' + X_e) \cdot (X_q + X_e)}. \quad (1.61)$$

# Poglavlje 2

## Metaheuristički algoritmi i vještačke neuralne mreže

Drugo poglavlje ove disertacije podijeljeno je na dva dijela. Prvi dio je posvećen metaheurističkim algoritima, kao jednim od najsavremenijih i najčešće korišćenih metoda optimizacije. U tom cilju, najprije je pažnja usmjerena ka definiciji samog optimizacionog problema i metoda optimizacije. Nakon toga, izloženi su osnovni koncepti metaheurističkih algoritama, kao i neki od brojnih kriterijuma podjele ovih algoritama. Na kraju ovog dijela, prikazani su metaheuristički algoritmi korišćeni u ovom radu, kao i predložene hibridne i modifikovane verzije istih algoritama. Drugi dio ovog poglavlja analiziraće vještačke neuralne mreže, koje predstavljaju jednu od najpopularnijih tehnika vještačke inteligencije.

### 2.1 Metaheuristički algoritmi

Metaheuristički algoritmi predstavljaju jedan od najsavremenijih i najčešće korišćenih metoda za rješavanje različitih tipova optimizacionih problema. Konkretno, pokazuju se izuzetno pogodnim za rješavanje brojnih klasičnih matematičkih optimizacionih problema, ali i za rješavanje velikog broja različitih inženjerskih problema optimizacije.

#### 2.1.1 Optimizacioni problem i metode optimizacije

S matematičkog aspekta, optimizacioni problem se definiše kao uređeni par  $(S, f)$ , pri čemu  $S$  predstavlja skup svih mogućih rješenja, a  $f: S \rightarrow \mathbb{R}$  predstavlja kriterijumsku funkciju ili funkciju cilja. Zavisno od postavke optimizacionog problema, cilj optimizacije je da se postigne minimalna ili maksimalna vrijednost kriterijumske funkcije. Svakom rješenju  $s$  iz skupa mogućih rješenja  $S$  pridružuje se odgovarajuća vrijednost kriterijumske funkcije  $f(s)$ , koja ukazuje na „kvalitet“ rješenja [89, 90]. Za konkretno rješenje  $s^* \in S$  važi da je globalno optimalno rješenje optimizacionog problema ukoliko za to rješenje važi da njegova kriterijumska funkcija ima manju vrijednost od kriterijumske funkcije bilo kog drugog rješenja iz skupa  $S$ . Pri tome se podrazumijeva da je cilj minimizovati kriterijumsku funkciju. Prethodna definicija se matematički može zapisati na sljedeći način:

$$\forall s \in S, f(s^*) \leq f(s). \quad (2.1)$$

Ukoliko se rješenje optimizacionog problema predstavi vektorom optimizacionih varijabli  $\mathbf{x}=[x_1, x_2, \dots, x_n]$ , ograničenja tipa nejednakosti i jednakosti označe sa  $g$  i  $b$ , respektivno, tada se optimizacioni problem može zapisati na sljedeći način:

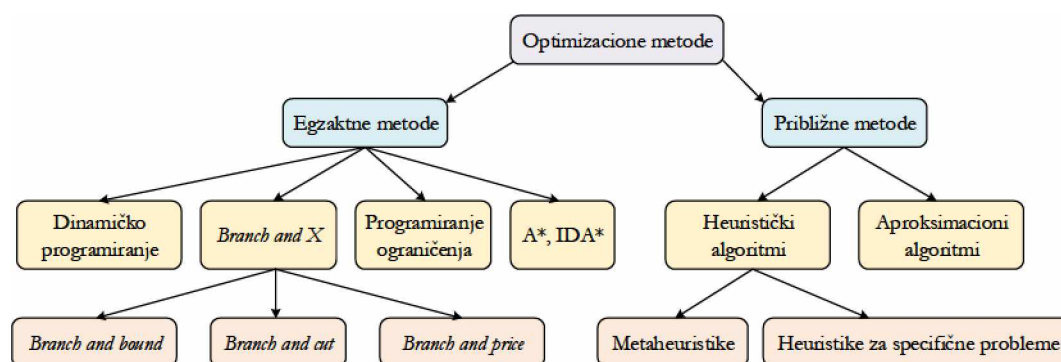
$$\min/\max[f(\mathbf{x})], g(\mathbf{x}) \leq 0, b(\mathbf{x}) = 0, x_i^L \leq x_i \leq x_i^U, \quad (2.2)$$

gdje  $x_i^L$  i  $x_i^U$  predstavljaju donju i gornju granicu za  $i$ -tu optimizacionu varijablu, respektivno.

Alati koji služe za rješavanje optimizacionih problema, tj. za nalaženje optimalnog rješenja, zovu se metode optimizacije. Uopšteno, sve metode optimizacije mogu se podijeliti na egzaktne i približne.

Egzaktne metode su one optimizacione metode koje garantuju pronalaženje globalnog optimalnog rješenja. U ovu grupu metoda spadaju dinamičko programiranje, programiranje ograničenja, *Branch and bound/cut/price* algoritmi, kao i A\* i IDA\* algoritmi.

Nasuprot njima, približne metode ne garantuju da će pronaći globalno optimalno rješenje, već neko rješenje u neposrednoj blizini globalnog optimuma. U približne metode ubrajaju se heuristički algoritmi i aproksimacioni algoritmi, dok se heuristički algoritmi dalje mogu podijeliti na heuristike za specifične probleme i metaheurističke algoritme, koji će biti primijenjeni u ovoj disertaciji. Podjela optimizacionih metoda je grafički ilustrovana na slici 2.1.1.



Slika 2.1.1 Podjela optimizacionih metoda

## 2.1.2 Osnovni koncepti i podjele metaheurističkih algoritama

Pored činjenice da metaheuristički algoritmi pripadaju grupi približnih metoda, ovi algoritmi doživljavaju veliku ekspanziju zadnjih 20 godina. Glavni razlog za to je činjenica da u praktičnoj primjeni metaheuristički algoritmi postižu izuzetno dobre rezultate, uspijevajući

da pronađu rješenje koje je veoma blizu globalnog optimuma. Vrijeme izvišavanja ovih algoritama je znatno kraće u poređenju sa drugim metodama, što predstavlja njihovu dodatnu prednost. Sumarno, metaheuristički algoritmi nalaze primjenu [89, 90]:

- 1) Prilikom rješavanja optimizacionih problema manjih dimenzija (manje dimenzije=manji broj optimizacionih varijabli), koji imaju veliki broj ulaznih podataka.
- 2) Za rješavanje jednostavnijih problema kod kojih su ograničenja data u realnom vremenu. Zadavanje ograničenja u realnom vremenu iziskuje određivanje optimalnog rješenja u najkraćem mogućem intervalu, što posebno čini metaheurističke algoritme pogodnim za primjenu.
- 3) Za rješavanja optimizacionih problema velikih dimenzija, za koje je karakteristično da imaju veliki broj optimizacionih varijabli.
- 4) Za rješavanje optimizacionih problema kod kojih je veoma zahtjevno sa računskog aspekta formulisati kriterijumsku funkciju ili funkciju ograničenja.

Osnovni koncepti o kojima treba voditi računa prilikom dizajniranja metaheurističkih algoritama su sljedeći:

- 1) Način predstavljanja rješenja je jedna od osnovnih stvari o kojima treba voditi računa prilikom dizajniranja metaheurističkih algoritama. Neki od načina na koji se rješenja mogu predstaviti su: binarna reprezentacija (optimalno rješenje je vektor sastavljen od 0 ili 1), reprezentacija u vidu vektora diskretnih vrijednosti ili vektora realnih brojeva, itd.
- 2) Izbor kriterijumske funkcije je drugi koncept o kojem pažljivo treba voditi računa prilikom primjene metaheurističkih algoritama. Kriterijumska funkcija služi za usmjeravanje i rukovođenje procesom pretrage skupa svih mogućih rješenja, a njen pravilan izbor usmjerava pretragu ka optimalnom rješenju.
- 3) Rukovanje ograničenjima (*constraint handling*) je treći koncept koji u velikoj mjeri utiče na rad i performanse metaheurističkih algoritama. S obzirom na to da je većina optimizacionih problema ograničena, pravilno postavljanje ograničenja i odabir strategije za upravljanje ograničenjima su izuzetno izazovni zadaci. Kod optimizacionih problema ograničenja mogu biti linearna ili nelinearna, kao i ograničenja tipa jednakosti ili nejednakosti. Cilj strategije ograničenja je da djeluje na kriterijumsku funkciju ili na samo rješenje. Najpoznatije strategije za upravljanje



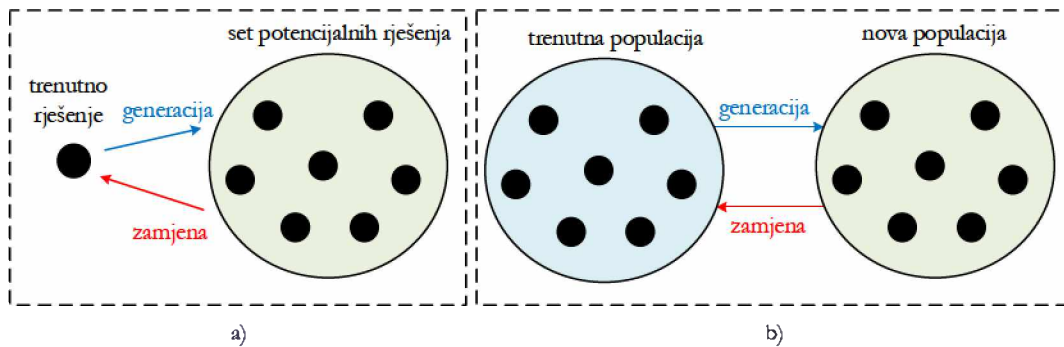
ograničenjima su: strategija kažnjavanja, strategija odbijanja, strategija popravljanja, strategija dekodiranja, itd.

Podjela metaheurističkih algoritama nije jedinstvena, već se može izvršiti prema većem broju kriterijuma:

- Prema procesu na kojem su bazirani metaheuristički algoritmi, mogu se razlikovati algoritmi koji su inspirisani prirodnim pojavama (evolucionarni algoritmi koji su bazirani na biološkim procesima i algoritam simuliranog kaljenja (koji je baziran na fizičkom procesu kaljenja čelika) i algoritmi koji su nastali na osnovu društvenih procesa, prvenstveno imitiranjem socijalnog ponašanja određenih grupa životinja (ptica, mrava, vukova, pčela, itd.).
- Prema kriterijumu zastupljenosti memorije, razlikuju se algoritmi kojima je potrebna memorija zbog toga što koriste određene informacije ili podatke iz prethodnih iteracija i algoritmi kojima nije potrebna memorija za čuvanje nekih prethodnih podataka. Većina metaheurističkih algoritama pripada grupi algoritama kojima je potrebna memorija, dok drugoj grupi pripadaju algoritam lokalne pretrage (*local search*) i GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) algoritam.
- Još jedan vid podjele metaheurističkih algoritama je na determinističke i stohastičke algoritme. Za determinističke algoritme je karakteristično da će, na osnovu istog početnog rješenja, uvijek doći do istog konačnog optimalnog rješenja. Ovoj grupi algoritama pripadaju algoritmi lokalne pretrage i tabu pretrage (*tabu search*). Nasuprot njima, u toku primjene stohastičkih algoritama, u pojedinim koracima dolazi do generisanja nasumičnih brojeva, čime ovi algoritmi dobijaju karakter stohastičnosti. Nadalje, to znači da se, primjenom stohastičkih algoritama, polazeći od istog početnog rješenja, svaki put dobija različito optimalno rješenje. Evolucionarni algoritmi, algoritam simuliranog kaljenja (*simulated annealing*), zatim algoritmi bazirani na društvenom ponašanju životinja, itd. pripadaju grupi stohastičkih algoritama. Ovi algoritmi su mnogo više zastupljeniji od determinističkih.
- Prema tipu početnog rješenja, razlikuju se iterativni i pohlepni algoritmi. Iterativni algoritmi, u početnoj iteraciji, startuju sa kompletnim rješenjem (tj. setom optimizacionih varijabli), koje je najčešće nasumično generisano. Tokom iteracija, shodno matematičkim relacijama koje su opisane u pojedinačnim koracima samog

algoritma, dolazi do unaprijeđivanja početnog rješenja ili početne populacije. Nasuprot njima, za pohlepne algoritme je karakteristično da startuju sa praznim rješenjem i da se u svakom koraku dodaje po jedna optimizaciona varijable dok se ne dobije kompletno optimalno rješenje. Većina metaheurističkih algoritama pripada grupi iterativnih algoritama.

- Prema broju rješenja u početnoj populaciji, metaheuristički algoritmi se mogu podijeliti na algoritme koji su bazirani na jednom rješenju (S-metaheuristike) i algoritme koji su zasnovani na populaciji rješenja (P-metaheuristike). Za S-metaheuristike je karakteristično da u početnoj populaciji imaju samo jedno rješenje, a tokom iteracija vrše transformaciju tog rješenja dok ne dođu do optimalnog rješenja na kraju iterativnog procesa. Detaljnije, iterativna procedura S-metaheuristika sadrži fazu generacije i fazu zamjene. U prvoj od ove dvije faze, na osnovu trenutnog rješenja formira se skup potencijalnih rješenja. Nakon toga u fazi zamjene, iz skupa generisanih potencijalnih rješenja vrši se selekcija, tj. odabir novog rješenja, čija je kriterijumska funkcija manja nego kod dosadašnjeg rješenja. Predstavnici ove grupe metaheurističkih algoritama su lokalna pretraga, tabu pretraga i simulirano kaljenje. Drugi tip algoritama, P-metaheuristike, startuju sa početnom populacijom, tj. skupom potencijalnih rješenja. Tokom iteracija, dolazi do ažuriranja članova populacije, tj. potencijalnih rješenja. Tokom faze generacije stvara se nova populacija rješenja, a u fazi zamjene vrši se selekcija, tj. rješenja iz nove populacije zamjenjuju odgovarajuća rješenja iz trenutne populacije ukoliko je njihova vrijednost kriterijumske funkcije manja. Nakon završetka posljednje iteracije, globalno optimalno rješenje se određuje kao rješenje iz populacije za koje je vrijednost kriterijumske funkcije najmanja. P-metaheuristikama pripadaju evolucionni algoritmi, kao i svi algoritmi koji su zasnovani na socijalnom ponašanju životinja. Šematski prikazi transformacije rješenja kod S-metaheuristika i P-metaheuristika dati su na slici 2.1.2.



Slika 2.1.2 Transformacija rješenja kod: a) S-metaheuristika b) P-metaheuristika

### 2.1.3 Osnovni metaheuristički algoritmi korišćeni u ovoj disertaciji

U ovoj doktorskoj disertaciji biće prikazane brojne modifikacije postojećih metaheurističkih algoritama u cilju poboljšanja performansi osnovnog algoritma, odnosno sa ciljem ubrzanja konvergencije i dobijanja rješenja boljeg kvaliteta. Konkretno, za rezultate istraživanja ove doktorske disertacije korišćeni su sljedeći algoritmi: optimizator ekvilibrijuma/ravnoteže (*equilibrium optimizer*), algoritam žute ribe (*yellow saddle goatfish algorithm*), algoritam morskih raža (*manta ray foraging optimizer*), algoritam crnih udovica (*black widow optimizer*), algoritam sivih vukova (*grey wolf optimizer*), algoritam optimizacije pomoću afričkih lešinara (*African vultures optimization algorithm*) i algoritam kruženja vode sa faktorom isparavanja (*evaporation rate-water cycle algorithm*).

#### 2.1.3.1 Optimizator ekvilibrijuma (*Equilibrium Optimizer – EO*)

Inspiraciju za algoritam optimizacije pomoću ekvilibrijuma predstavlja zakon održanja mase koji se često primjenjuje u fizici i hemiji [91]. Naime, shodno ovom zakonu, promjena mase u nekoj zapremini jednaka je razlici između ulazne i izlazne mase, pri čemu je ulazna masa zbir mase koja ulazi u sistem i mase koja se generiše unutar tog sistema, a izlazna masa je masa koja napušta sistem. Diferencijalna jednačina koja opisuje ovaj fizički zakon je data sljedećom relacijom:

$$V \frac{dC}{dt} = QC_{eq} - QC + G, \quad (2.3)$$

gdje  $V$  predstavlja zapreminu sistema,  $C$  je koncentracija u toj zapremini, član  $V(dC/dt)$  predstavlja stepen promjene mase unutar date zapremine,  $Q$  je zapreminski protok,  $G$  je brzina generisanja mase unutar date zapremine i  $C_{eq}$  predstavlja koncentraciju ekvilibrijuma (ravnotežnog stanja), odnosno onu koncentraciju pri kojoj nema generisanja mase unutar

zapremine  $V$ . Osnovna relacija na kojoj se bazira razvoj algoritma optimizatora ekvilibrijuma predstavljena je rješenjem prethodne diferencijalne jednačine:

$$\begin{aligned} C(t) &= C_{eq} + (C_0 - C_{eq})F + \frac{G}{\lambda V}(1-F), \\ F &= e^{-\lambda(t-t_0)}, \quad \lambda = \frac{Q}{V}, \end{aligned} \quad (2.4)$$

pri čemu  $C_0$  predstavlja početnu koncentraciju u trenutku  $t_0$ ,  $F$  je eksponencijalni član, dok je  $\lambda$  stopa preokreta.

Kod rješavanja problema optimizacije u ovoj disertaciji, rješenje je vektor koji se sastoji od  $m$  optimizacionih varijabli, pri čemu tada  $m$  predstavlja dimenziju optimizacionog problema. Prilikom primjene optimizatora ekvilibrijuma, potencijalno rješenje optimizacionog problema predstavljeno je svojom pozicijom, tj. koncentracijom  $C$ , koja u matematičkoj formulaciji algoritma predstavlja vektor. Takođe, ovaj algoritam pripada grupi P-metaheuristika, pa se stoga bazira na populaciji od  $n$  čestica pri čemu svaka ima svoju koncentraciju. Prvi korak kod svakog metaheurističkog algoritma jeste inicijalizacija početne populacije:

$$C_i^{(0)} = LB + rand_i \cdot (UB - LB), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (2.5)$$

gdje  $LB$  i  $UB$  predstavljaju vektore minimalnih i maksimalnih vrijednosti svake optimizacione varijable, respektivno, dok je  $rand$  vektor od  $m$  slučajnih brojeva između 0 i 1. Tokom iteracija, koncentracija svake čestice se ažurira prema relaciji koja se bazira na relaciji (2.4):

$$C_i(it) = C_{eq} + (C_i(it-1) - C_{eq}) \cdot F + \frac{G}{\lambda}(1-F), \quad (2.6)$$

pri čemu  $it$  predstavlja trenutnu iteraciju, a značenje pojedinih članova će biti opisano u nastavku:

- Prvi član  $C_{eq}$  je nasumična koncentracija izabrana iz skupa ekvilibrijuma, a skup ekvilibrijuma čine 4 najbolja rješenja (tj. 4 koncentracije sa najmanjom vrijednošću kriterijumske funkcije) i njihova aritmetička sredina,
- Drugi član predstavlja razliku između koncentracije iz prethodne iteracije i koncentracije ekvilibrijuma, a uloga ovog člana je da podstiče proces globalne

pretrage kompletnog skupa rješenja. Eksponencijalni član  $F$  definisan je na sljedeći način:

$$\begin{aligned}
 F &= e^{-\lambda(r-r_0)}, \\
 t &= \left(1 - \frac{it}{max\_it}\right)^{a_2 \frac{it}{max\_it}}, \\
 r_0 &= \frac{1}{\lambda} \ln \left[ -a_1 \cdot (1 - e^{-\lambda t}) \cdot \text{sign}(r - 0.5) \right] + t,
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

gdje su  $a_1$  i  $a_2$  konstante koje prave balans između globalne i lokalne pretrage, a  $r$  i  $\lambda$  su vektori slučajnih brojeva između 0 i 1, dok  $max\_it$  predstavlja predefinisani parametar koji označava maksimalni broj iteracija.

- Treći član označava mogućnost algoritma da vrši lokalnu pretragu, tj. dodatna poboljšanja rješenja koje je već vrlo blizu optimalnog. Stopa generisanja  $G$  je definisana shodno sljedećoj relaciji:

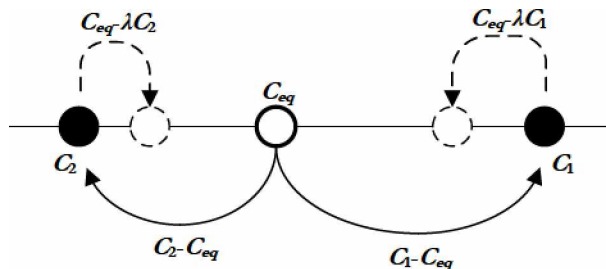
$$G = G_{CP} \cdot (C_{eq} - \lambda \cdot C(it-1)) \cdot F, \tag{2.8}$$

pri čemu  $G_{CP}$  predstavlja kontrolni parametar stope generisanja:

$$G_{CP} = \begin{cases} 0.5 \cdot r_1, & r_2 \geq 0.5 \\ 0, & r_2 < 0.5 \end{cases}, \tag{2.9}$$

gdje su  $r_1$  i  $r_2$  vektori nasumičnih brojeva iz opsega  $[0, 1]$ .

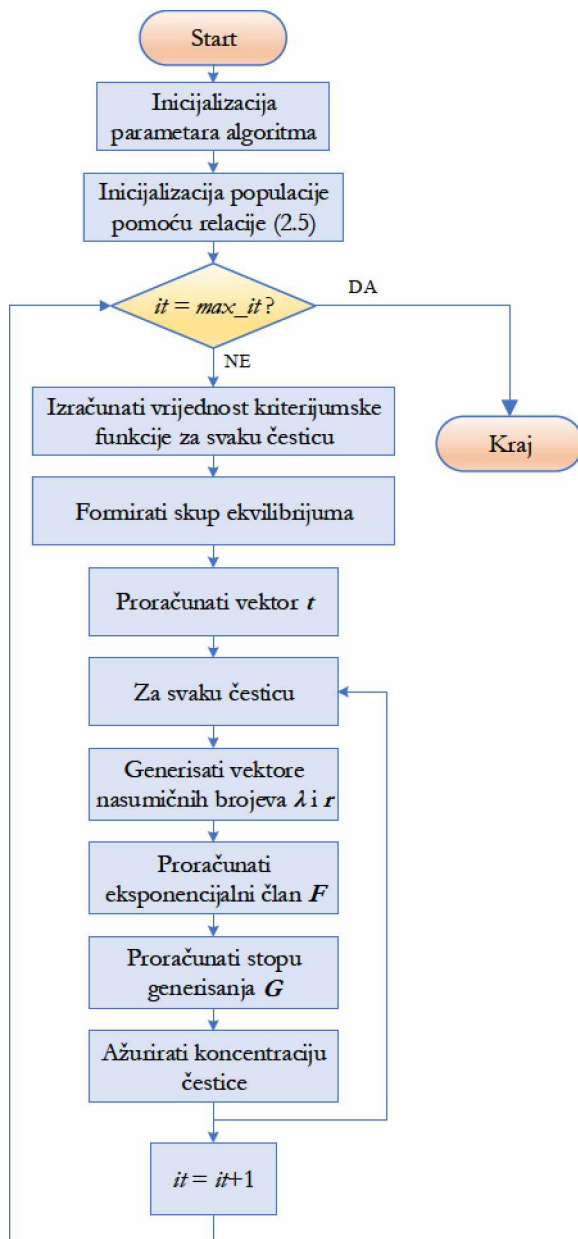
Grafička ilustracija približavanja koncentracija pojedinih čestica koncentraciji ekvilibrijuma data je na slici 2.1.3.



Slika 2.1.3 Grafička ilustracija ažuriranja koncentracija

Prethodno opisani postupak ažuriranja koncentracije pojedinih čestica u populaciji se iterativno ponavlja dok se ne dostigne maksimalni broj iteracija. Nakon toga, koncentracija

sa najmanjom vrijednošću kriterijumske funkcije predstavlja konačno optimalno rješenje optimizacionog problema. Radi lakšeg uvida, dijagram toka i pseudokod ovog algoritma dati su na slici 2.1.4.




---

Pseudokod EO algoritma

---

- 1: Inicijalizovati parametre algoritma
- 2: Inicijalizovati populaciju – relacija (2.5)
- 3: **for**  $it = 1:max\_it$
- 4: Izračunati vrijednost kriterijumske funkcije za svaku česticu
- 5: Formirati skup ekvilibrijuma
- 6: Proračunati vektor  $t$
- 7: **for**  $i = 1:n$
- 8: Generisati vektore  $\lambda$  i  $r$
- 9: Proračunati eksponencijalni član  $F$
- 10: Proračunati stopu generisanja  $G$
- 11: Ažurirati koncentraciju čestice
- 12: **endfor**
- 13: **endfor**
- 14: Optimalno rješenje je čestica čija koncentracija ima najmanju vrijednost kriterijumske funkcije

---

a)

b)

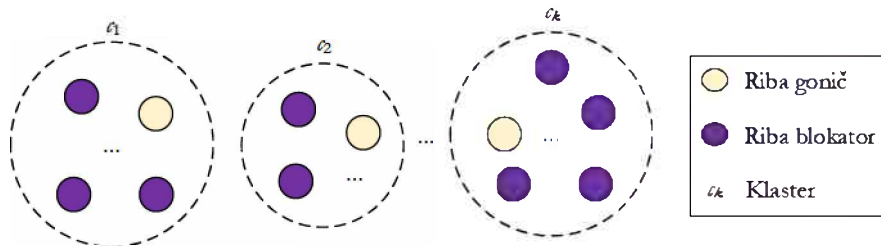
Slika 2.1.4 a) Dijagram toka i b) pseudokod algoritma optimizatora ekvilibrijuma

### 2.1.3.2 Algoritam žute ribe (Yellow Saddle Goatfish Algoritam – YSGA)

Ovaj metaheuristički algoritam je zasnovan na modelu procesa lova grupe žutih (zlatnih) riba [92]. Prema osnovnoj ideji ovoga algoritma, populacija riba je podijeljena na sub-populacije, tzv. klustere. Svaki klaster ima svoju ribu goniča (*chaser fish*), dok se ostale ribe u klasteru nazivaju ribe blokatori (*blocker fish*). Oblast lova žutih riba predstavlja prostor pretrage mogućih rješenja optimizacionog problema. Svaka riba u populaciji predstavlja potencijalno rješenje, pa je matematički modelovana kao vektor  $p_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) od  $m$  elemenata. Pozicija svake ribe u populaciji se, u prvom koraku algoritma, mora nasumično inicijalizovati tako da bude smještena između donjeg i gornjeg ograničenja za svaku optimizacionu varijablu:

$$p_i^{(0)} = LB + rand_i \cdot (UB - LB). \quad (2.10)$$

Naredni korak je razdvajanje populacije na klustere, tj. sub-populacije, koje može biti izvršeno nekim od brojnih algoritama klasterovanja. U ovoj disertaciji primijenjen je *K-mean* algoritam, o kojem se više detalja može naći u [92]. Svaki od  $k$  klastera ima ribu goniča označenu sa  $\phi_i$  i ribe blokatore označene sa  $\varphi_B$ . Podjela populacije ilustrovana je na slici 2.1.5.



Slika 2.1.5 Ilustracija podjele populacije riba na klustere.

Riba gonič svakog klastera je ona riba koja ima najmanju vrijednost kriterijumske funkcije. Prvi korak u procesu lova je ažuriranje pozicije ribe goniča, koje se vrši prema sljedećoj relaciji:

$$\Phi_i(it+1) = \Phi_i(it) + \alpha \left( \frac{\alpha}{|\nu|^{1/\beta}} \right) (\Phi_i(it) - \Phi_{best}(it)), \quad (2.11)$$

gdje je  $\Phi_{best}$  riba sa najmanjom vrijednošću kriterijumske funkcije iz svih klastera, tj. iz kompletne populacije,  $\alpha$  je veličina koraka koja ima vrijednost 1 [92], dok je  $\beta$  tzv. Levy indeks koji se računa na sljedeći način:

$$\beta = 1.99 + 0.01 \frac{it}{\max\_it}. \quad (2.12)$$

Parametri  $u$  i  $v$  iz relacije (2.11) se računaju na sljedeći način:

$$u \sim N(0, \sigma_u^2), \quad \sigma_u = \left( \frac{\Gamma(1+\beta) \cdot \sin \frac{\beta\pi}{2}}{\Gamma(1+\beta) \cdot \beta \cdot 2^{(\beta-1)/2}} \right)^{1/\beta}, \quad (2.13)$$

$$v \sim N(0, \sigma_v^2), \quad \sigma_v = 1, \quad (2.14)$$

pri čemu je  $N$  oznaka za normalnu raspodjelu, a  $\Gamma$  predstavlja gama funkciju. U cilju ažuriranja pozicije za ribu  $\Phi_{best}$  koristi se sljedeća relacija:

$$\Phi_{best}(it+1) = \Phi_{best}(it) + \alpha \left( \frac{u}{|v|^{1/\beta}} \right). \quad (2.15)$$

Naredni korak u procesu optimizacije primjenom YSGA algoritma je ažuriranje pozicija ostalih riba u klasteru, tj. riba blokatora:

$$\varphi_g(it+1) = |r \cdot \Phi_1(it) - \varphi_g(it)| \cdot e^\rho \cdot \cos(2\pi\rho) + \Phi_1(it), \quad (2.16)$$

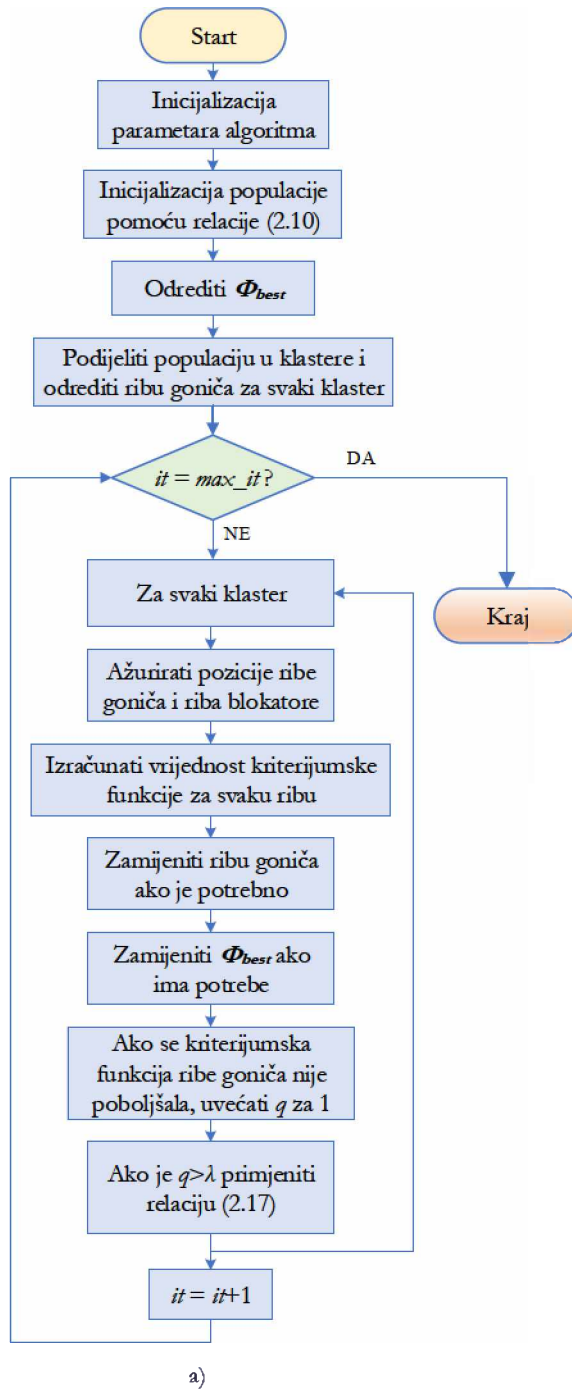
gdje je  $r$  slučajni broj između 0 i 1,  $\rho$  je slučajni broj između  $a$  i 1, pri čemu je  $a$  faktor lokalne pretrage koji tokom iteracija linearno opada od  $-1$  do  $-2$ . Nakon ažuriranja svih riba u svakom klasteru, potrebno je ponovo proračunati kriterijumsku funkciju za sve ribe i ažurirati uloge – ukoliko je kriterijumska funkcija neke ribe blokatora manja od kriterijumske funkcije ribe goniča, onda ta riba blokator postaje gonič u narednoj iteraciji.

U cilju sprječavanja da se algoritam zarobi u lokalnom minimumu, YSGA algoritam sadrži parametar koji se označava sa  $\lambda$ . Ukoliko u  $\lambda$  iteracija ne dođe do poboljšanja rješenja smatra se da je algoritam zarobljen u lokalnom optimumu i da treba promijeniti oblast pretrage. Sve ribe iz populacije, nezavisno od toga da li su goniči ili blokatori, ažuriraju se prema sljedećoj relaciji ( $R$  je oznaka za poziciju ribe, nezavisno od njene uloge):

$$P(it+1) = \frac{\Phi_{best} + P(it)}{2}. \quad (2.17)$$



Kompletan opisani proces se iterativno ponavlja dok se ne postigne maksimalni broj iteracija. Riba sa najmanjom vrijednošću kriterijumske funkcije ( $\Phi_{best}$ ) je rješenje problema optimizacije. Iterativna procedura YSGA algoritma je prikazana pomoću dijagrama toka i pseudokoda na slici 2.1.6.



#### Pseudokod YSGA algoritma

- 1: Inicijalizovati parametre algoritma
- 2: Inicijalizovati populaciju – relacija (2.10)
- 3: Odrediti najbolje rješenje  $\Phi_{best}$
- 4: Podijeliti populaciju u  $k$  klastera i odrediti ribu goniča za svaki klaster
- 5: for  $it = 1: max\_it$
- 6: for  $i = 1:k$
- 7: Ažurirati pozicije ribe goniča i blokatora
- 8: Izračunati vrijednost kriterijumske funkcije za sve ribe
- 9: Zamijeniti ribu goniča ako je potrebno
- 10: Zamijeniti  $\Phi_{best}$  ako je potrebno
- 11: Uvećati  $q$  za 1 ako se kriterijumska funkcija ribe goniče nije poboljšala
- 12: Ako je  $q > \lambda$  primijeniti relaciju (2.17)
- 13: endfor
- 14: endfor
- 14: Optimalno rješenje je  $\Phi_{best}$  dobijeno nakon posljednje iteracije

b)

Slika 2.1.6 a) Dijagram toka i b) pseudokod algoritma žute ribe

### 2.1.3.3 Algoritam morskih raža (Manta Ray Foraging Optimizer – MRFO)

Algoritam morskih raža je razvijen bazirajući se na ponašanju morskih raža prilikom potrage za hranom [93]. Opservacijom njihovog ponašanja, uočene su tri inteligentne strategije potrage za hranom: lančana potraga, ciklonsko traženje hrane i pretraga hrane saltom (salto – gimnastički pokret). Pozicija svake raže predstavlja potencijalno rješenje optimizacionog problema i matematički je predstavljena vektorom od  $m$  elemenata, gdje je  $m$  broj varijabli koje se optimizuju, tj. dimenzija problema. Ukoliko se usvoji, kao i kod prethodno opisanih algoritama, da je  $n$  veličina populacije, onda se početna populacija inicijalizuje na sljedeći način ( $p_i$  je pozicija  $i$ -te raže):

$$p_i^{(0)} = LB + rand_i \cdot (UB - LB). \quad (2.18)$$

Nakon procesa inicijalizacije populacije, prva strategija pretrage hrane koja se može primijeniti u iterativnoj proceduri je strategija lančane pretrage hrane. Prema ovoj strategiji, pozicija raže se ažurira prema sljedećoj relaciji:

$$p_{i,j}(it+1) = \begin{cases} p_{i,j}(it) + r \cdot (p_{best,j} - p_{i,j}(it)) + a \cdot (p_{best,j} - p_{i,j}(it)), & i = 1 \\ p_{i,j}(it) + r \cdot (p_{i-1,j} - p_{i,j}(it)) + a \cdot (p_{best,j} - p_{i,j}(it)), & i \neq 1 \end{cases}, \quad (2.19)$$

$(i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$

pri čemu je  $p_{best}$  pozicija najbolje raže, tj. one raže sa najmanjom vrijednošću kriterijumske funkcije,  $r$  je slučajni broj između 0 i 1 i  $a$  je težinski koeficijent koji se računa na sljedeći način:

$$a = 2 \cdot r \cdot \sqrt{|\log(r)|}. \quad (2.20)$$

Druga strategija pretrage hrane kod primjene MRFO algoritma je ciklonska pretraga hrane. Ovaj korak matematički ilustruje specifične spiralne pokrete raža u cilju napada na plijen. Koristeći ovu strategiju, pozicije raža se ažuriraju na sljedeći način:

$$p_{i,j}(it+1) = \begin{cases} p_{best,j} + r_1 \cdot (p_{best,j} - p_{i,j}(it)) + \beta \cdot (p_{best,j} - p_{i,j}(it)), & i = 1 \\ p_{best,j} + r_1 \cdot (p_{i-1,j} - p_{i,j}(it)) + \beta \cdot (p_{best,j} - p_{i,j}(it)), & i \neq 1 \end{cases}, \quad (2.21)$$

$(i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$

gdje  $n$  predstavlja slučajni broj između 0 i 1, a težinski koeficijent  $\beta$  se računa na sljedeći način:

$$\beta = 2 \cdot \exp\left(r_1 \cdot \frac{\max\_it - it + 1}{\max\_it}\right) \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot r_1). \quad (2.22)$$

Mehanizam ažuriranja pozicija dat relacijom (2.21) forsira sposobnost algoritma da vrši lokalnu pretragu. U okviru strategije ciklonske pretrage hrane, potrebno je dodati i mehanizam ažuriranja pozicija raža koji će omogućiti i globalnu pretragu, kako bi se spriječio problem „zaglavljivanja“ u lokalnom optimumu. Relacija koja stavlja akcenat na globalnu pretragu, tj. pretragu kompletnog skupa mogućih rješenja glasi:

$$p_{i,j}(it+1) = \begin{cases} p_{rand,j} + r_1 \cdot (p_{rand,j} - p_{i,j}(it)) + \beta \cdot (p_{rand,j} - p_{i,j}(it)), & i = 1 \\ p_{rand,j} + r_1 \cdot (p_{i-1,j} - p_{i,j}(it)) + \beta \cdot (p_{rand,j} - p_{i,j}(it)), & i \neq 1 \end{cases} \quad (2.23)$$

$(i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$

pri čemu je  $p_{rand}$  pozicija nasumično kreirane raže:

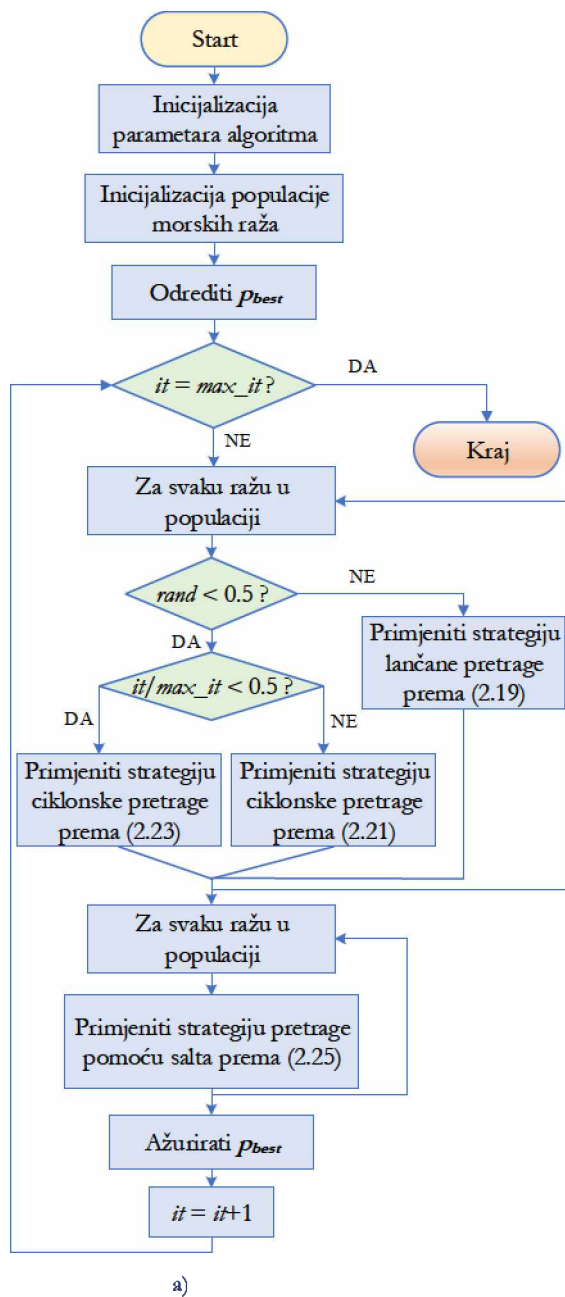
$$p_{rand,j} = r_1 \cdot (UB_j - LB_j) + LB_j. \quad (2.24)$$

Na kraju, treća strategija pretrage hrane koja se može sresti kod raža bazira se na njihovom specifičnom kretanju koje podsjeća na salto. Ova strategija služi za dobijanje finalne pozicije svake raže u populaciji i matematički je opisana sljedećom relacijom:

$$p_{i,j}(it+1) = p_{i,j}(it) + S \cdot (r_2 \cdot p_{best,j} - r_3 \cdot p_{i,j}(it)), \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m, \quad (2.25)$$

gdje su  $r_2$  i  $r_3$  slučajno generisani brojevi između 0 i 1, a  $S$  je faktor koji iznosi 2 [93]. Nakon završetka ove faze kompletirana je jedna iteracija algoritma. Nakon toga, koraci algoritma se iterativno ponavljaju dok se ne postigne maksimalan broj iteracija. Optimalno rješenje optimizacionog problema koje je pronašao MRFO algoritam predstavljeno je pozicijom raže čija je vrijednost kriterijumske funkcije minimalna  $p_{best}$ .

U cilju boljeg uvida u korake algoritma, kao i u način odabira strategije pretrage hrane, dijagram toka i pseudokod dati su na slici 2.1.7.



#### Pseudokod MRFO algoritma

```

1: Inicijalizovati parametre algoritma
2: Inicijalizovati populaciju – relacija (2.18)
3: Odrediti najbolje rješenje  $p_{best}$ 
4: for  $it = 1: max\_it$ 
5:   for  $i = 1:n$ 
6:     if ( $rand < 0.5$ )
7:       if ( $it/max\_it < 0.5$ ) Ažurirati pozicije
morskih raža koristeći strategiju ciklonske
pretrage hrane s akcentom na globalnu
pretragu prema relaciji (2.23)
8:       else Ažurirati pozicije morskih raža
koristeći strategiju ciklonske pretrage hrane s
akcentom na lokalnu pretragu prema relaciji
(2.21)
9:       else Ažurirati pozicije morskih raža
koristeći strategiju lančane pretrage hrane
prema relaciji (2.19)
10:    endfor
11:   for  $i = 1:n$ 
12:     Ažurirati pozicije morskih raža
koristeći strategiju pretrage hrane pomoću
salta prema relaciji (2.25)
13:   endfor
14:   Ažurirati  $p_{best}$ 
15: endfor
16: Optimalno rješenje je  $p_{best}$  dobijeno nakon
posljednje iteracije

```

Slika 2.1.7 a) Dijagram toka i b) pseudokod algoritma morskih raža

#### 2.1.3.4 Algoritam crnih udovica (Black Widow Optimizer – BWO)

Algoritam crnih udovica je razvijen matematičkom interpretacijom karakterističnih procesa u životnom ciklusu ove vrste paukova, jedne od najotrovnijih na svijetu [94]. Populacija crnih udovica se matematički predstavlja kao matrica dimenzija  $n \times m$ , gdje je  $n$  veličina populacije, a  $m$  dimenzija optimizacionog problema. Svaki pauk, tj. svaka crna

udovica predstavlja potencijalno rješenje problema optimizacije. Početni korak ovog algoritma je nasumična inicijalizacije svakog pauka  $\mathbf{x}_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ):

$$\mathbf{x}_i^{(0)} = \mathbf{LB} + \text{rand}_i \cdot (\mathbf{UB} - \mathbf{LB}). \quad (2.26)$$

Nakon procesa inicijalizacije, naredna faza algoritma jeste sprovođenje procesa razmnožavanja. Najprije je potrebno odabrati dva nasumična pauka iz populacije, označena sa  $\mathbf{x}_j$  i  $\mathbf{x}_k$ , koji predstavljaju roditelje. Njihovom međusobnom rekombinacijom stvaraju se potomci označeni sa  $\mathbf{y}_j$  i  $\mathbf{y}_k$ :

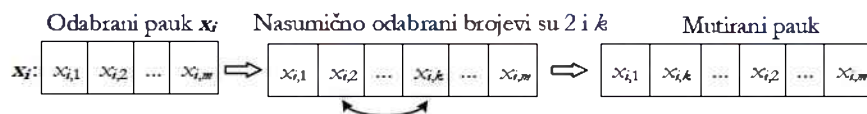
$$\begin{aligned} \mathbf{y}_j &= \mathbf{a} \cdot \mathbf{x}_j + (1 - \mathbf{a}) \cdot \mathbf{x}_k, \\ \mathbf{y}_k &= \mathbf{a} \cdot \mathbf{x}_k + (1 - \mathbf{a}) \cdot \mathbf{x}_j, \end{aligned} \quad (2.27)$$

pri čemu  $\mathbf{a}$  predstavlja vektor slučajnih brojeva između 0 i 1. Broj paukova iz populacije koji uzimaju učešće u procesu rekombinacije određen je faktorom razmnožavanja  $PR$  (*procreation rate*).

Sljedeći korak BWO algoritma je modelovanje kanibalističkog ponašanja crnih udovica, koje je veoma karakteristično za beskičmenjake, kao što su paukovi, škorpije, itd. Opservacijom ponašanja paukova, uočena su dva tipa kanibalizma:

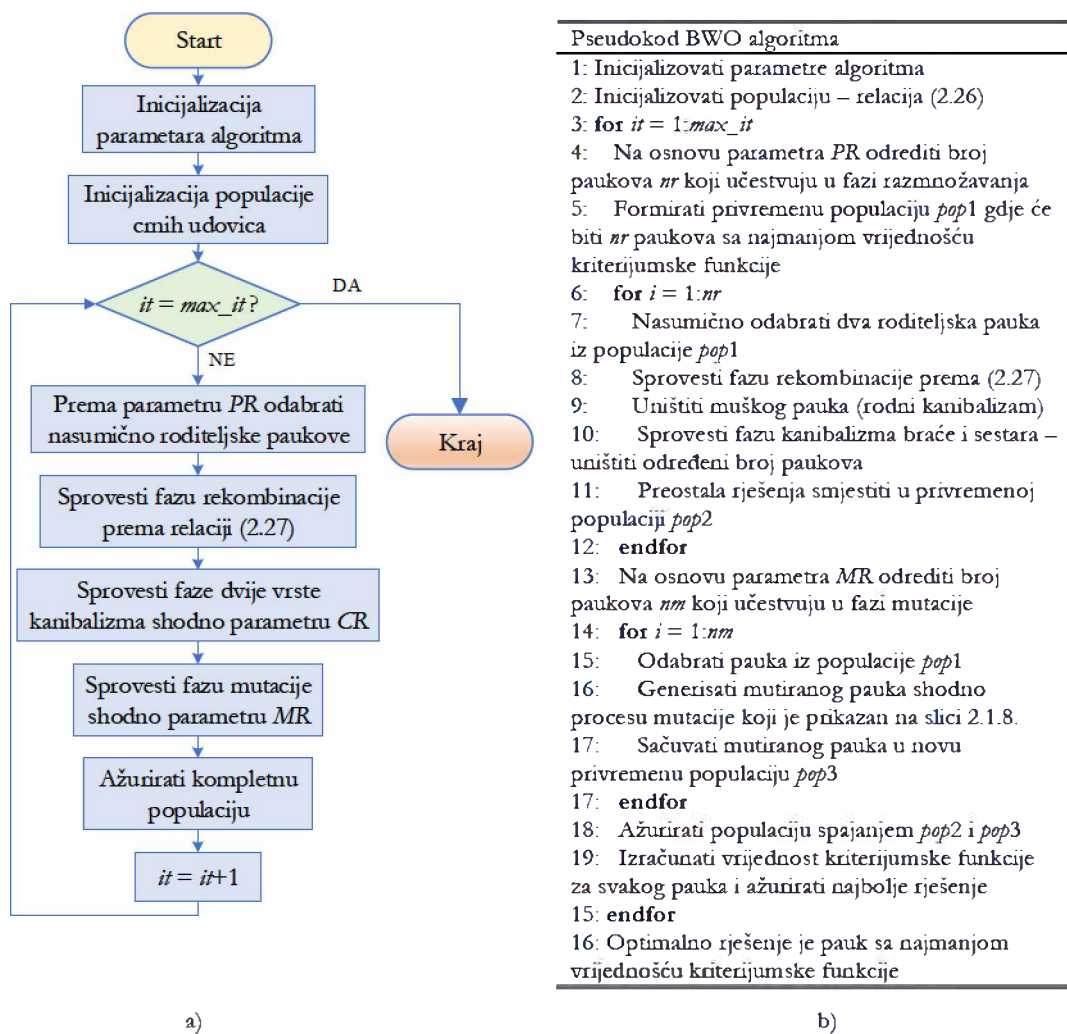
- Rodni kanibalizam, za koji je karakteristično da tokom ili nakon procesa razmnožavanja ženka pauka pojede mužjaka (ženka i mužjak se razlikuju prema vrijednosti kriterijumske funkcije),
- Kanibalizam braće i sestara, kod kojeg jači paukovi pojedu svoju slabiju braću/sestre paukove. Faktor kanibalizma  $CR$  (*Cannibalism Rate*) definiše broj paukova iz populacije koji će biti pojedeni u ovoj fazi.

Posljednja faza algoritma crnih udovica je proces mutacije. Broj paukova iz populacije koji će mutirati definisan je parametrom koji se naziva faktor mutacije  $MR$  (*Mutation Rate*). Tokom procesa mutacije, svaki od odabranih paukova razmijeni vrijednosti za dvije optimizacione varijable, pri čemu nastaje mutirani pauk, kao što je slikovito prikazano na slici 2.1.8.



Slika 2.1.8 Ilustracija procesa mutacije paukova

Prethodno opisane faze BWO algoritma se iterativno ponavljaju dok se ne postigne maksimalni broj iteracija. Tada pauk, tj. crna udovica sa najmanjom vrijednošću kriterijumske funkcije predstavlja rješenje optimizacionog problema. Dijagram toka i pseudokod algoritma crnih udovica dati su na slici 2.1.9.

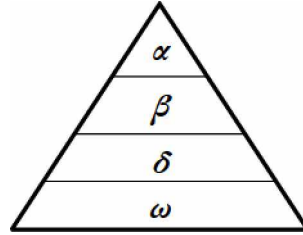


Slika 2.1.9 a) Dijagram toka i b) pseudokod algoritma crnih udovica

### 2.1.3.5 Algoritam sivih vukova (Grey Wolf Optimizer – GWO)

Algoritam sivih vukova (GWO) algoritam razvijen je osmatranjem i matematičkim modelovanjem socijalnog ponašanja sivih vukova [95]. Naime, sivi vukovi su na samom vrhu lanca ishrane, tj. smatraju se jednim od glavnih predatora u prirodi. Oni su organizovani u čoporima, pri čemu čopor ima jednog lidera koji se naziva dominantni ili alfa ( $\alpha$ ) vuk i on se nalazi na vrhu ljestvice. Drugi nivo u hijerarhijskoj organizaciji čopora pripada beta ( $\beta$ ) vuku, koji predstavlja vođu čopora u slučaju smrti alfa vuka. Ispod alfa i beta vukova nalazi se delta

vuk ( $\delta$ ), dok svi ostali vukovi u čopori pripadaju grupaciji koja se naziva omega ( $\omega$ ) vukovi. Opisana hijerarhijska organizacija čopora sivih vukova prikazana je na slici 2.1.10.



Slika 2.1.10 Hijerarhijska organizacija čopora sivih vukova

Kod matematičkog modela algoritma sivih vukova, potencijalno rješenje optimizacionog problema predstavljeno je pozicijom vuka, koja je označena sa  $\mathbf{x}_i$  ( $i$  je redni broj vuka, tj.  $i=1, 2, 3, \dots, n$ ). Najbolji vuk u cijelom čoporu, tj. vuk sa najmanjom vrijednošću kriterijumske funkcije je alfa vuk, a najbolja rješenja nakon njega su beta i delta vukovi. Svi ostali vukovi spadaju u grupu omega vukova. Prvi korak kod algoritma sivih vukova je nasumična inicijalizacija cijele populacije:

$$\mathbf{x}_i^{(0)} = \mathbf{LB} + \text{rand}_i \cdot (\mathbf{UB} - \mathbf{LB}). \quad (2.28)$$

Iterativna procedura u toku koje se ažuriraju pozicije svih vukova bazirana je na procesu okruživanja i lova plijena od strane čopora. Ažuriranje pozicija viši se prema sljedećoj relaciji:

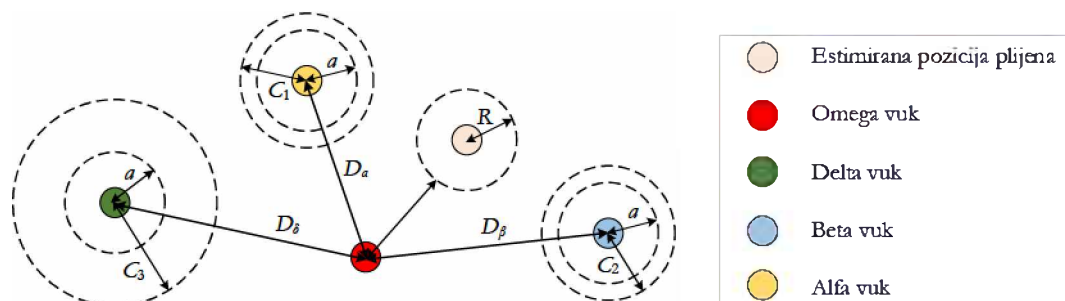
$$x_{i,j}(it+1) = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3}, \quad (2.29)$$

gdje se veličine  $x_1$ ,  $x_2$  i  $x_3$  računaju posebno za svakog vuka ( $i=1, 2, \dots, n$ ) i za svaku optimizacionu varijablu ( $j=1, 2, \dots, m$ ):

$$\begin{aligned} x_1 &= x_{\alpha,j} - (2 \cdot a \cdot r_1 - a) \cdot \left| 2 \cdot r_2 \cdot x_{\alpha,j} - x_{i,j}(it) \right|, \\ x_2 &= x_{\beta,j} - (2 \cdot a \cdot r_3 - a) \cdot \left| 2 \cdot r_4 \cdot x_{\beta,j} - x_{i,j}(it) \right|, \\ x_3 &= x_{\delta,j} - (2 \cdot a \cdot r_5 - a) \cdot \left| 2 \cdot r_6 \cdot x_{\delta,j} - x_{i,j}(it) \right|, \end{aligned} \quad (2.30)$$

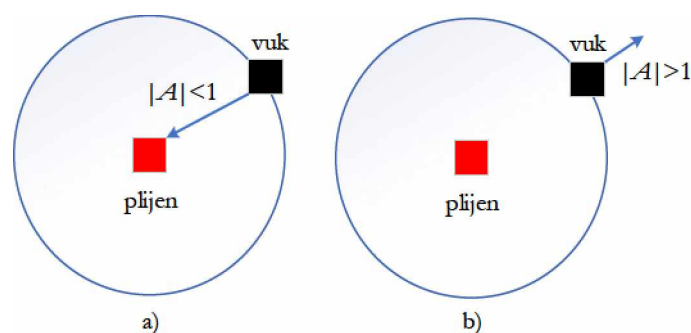
pri čemu su  $r_1 - r_6$  nasumično generisani brojevi između 0 i 1 koji se iznova generišu za svakog vuka i za svaku optimizacionu varijablu (tj. za svako  $x_{ij}$ ),  $a$  je broj koji iterativno opada od vrijednosti 2 do 0, dok su  $\mathbf{x}_\alpha$ ,  $\mathbf{x}_\beta$  i  $\mathbf{x}_\delta$  vektori pozicija alfa, beta i delta vuka, respektivno.

Ovakva matematička formulacija jasno ukazuje na to da se svi omega vukovi u čoporu kreću u skladu sa kretanjem alfa, beta i delta vuka. Drugim riječima, pozicija plijena nije tačno poznata, već estimaciju te pozicije vrše tri najbolja vuka u čoporu, kao što je slikovito prikazano na slici 2.1.11, gdje je  $C_1=2\cdot r_2$ ,  $C_2=2\cdot r_4$ ,  $C_3=2\cdot r_6$ .



Slika 2.1.11 Ilustracija kretanja sivih vukova

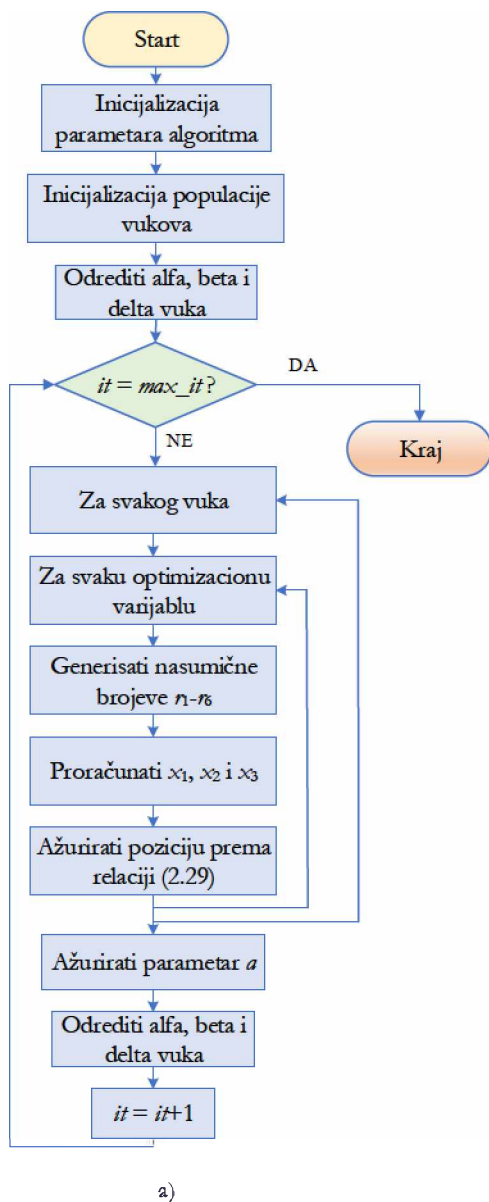
U cilju modelovanja približavanja plijenu, elementi vektora  $a$  se linearno smanjuju od početne vrijednosti 2 do krajnje vrijednosti koja iznosi 0, odnosno izraz  $A=2\cdot a\cdot r_1 - a$  uzima vrijednosti iz opsega od  $-a$  do  $a$ . U slučaju kada je  $|A| < 1$  tada vukovi napadaju plijen, tj. vrše konvergentno kretanje, a sami algoritam forsira lokalnu pretragu. Nasuprot tome, vukovi vrše divergentno kretanje kada se odaljavaju od plijena, odnosno kada važi  $|A| > 1$ . U ovom slučaju algoritam vrši globalnu pretragu prostora rješenja. Konvergentno i divergentno kretanje vukova ilustrirano je na slici 2.1.12.



Slika 2.1.12 a) Konvergentno i b) divergentno kretanje vukova

Ovako opisan proces se iterativno ponavlja dok se ne postigne prethodno zadati maksimalni broj iteracija. Na kraju, pozicija alfa vuka nakon posljednje iteracije je rješenje optimizacionog problema. Na slici 2.1.13 prikazani su dijagram toka i pseudokod algoritma sivih vukova.






---

Pseudokod GWO algoritma

---

- 1: Inicijalizovati parametre algoritma
- 2: Inicijalizovati populaciju – relacija (2.28)
- 3: Odrediti pozicije alfa, beta i delta vuka
- 4: **for**  $it = 1: max\_it$
- 5:   **for**  $i = 1:n$
- 6:     **for**  $j = 1:m$
- 7:       Generisati slučajne brojeve  $r_1 - r_6$
- 8:       Izračunati  $x_1, x_2$  i  $x_3$
- 9:       Ažurirati  $x_{ij}$  prema relaciji (2.29)
- 10:     **endfor**
- 11:   **endfor**
- 12:   Ažurirati parametar  $a$
- 13:   Odrediti alfa, beta i delta vuka
- 14: **endfor**
- 15: Optimalno rješenje je pozicija alfa vuka nakon posljednje iteracije

---

b)

Slika 2.1.13 a) Dijagram toka i b) pseudokod algoritma sivih vukova

### 2.1.3.6 Algoritam optimizacije pomoću afričkih lešinara (African Vultures Optimization Algorithm – AVOA)

Još jedan u nizu algoritama koji se bazira na socijalnom ponašanju grupe životinja je AVOA algoritam, koji je razvijen analizom ponašanja afričkih lešinara [96]. Analogno prethodno opisanim algoritmima, populacija od  $n$  lešinara predstavlja skup potencijalnih rješenja optimizacionog problema, pri čemu je pozicija  $i$ -tog lešinara  $\mathbf{x}_i$  vektor od  $m$  elemenata ( $m$  – dimenzija problema). Nasumična inicijalizacija pozicije svakog lešinara sprovodi se prema sljedećoj relaciji:

$$\mathbf{x}_i^{(0)} = \text{rand}_i \cdot (\mathbf{UB} - \mathbf{LB}) + \mathbf{LB}. \quad (2.31)$$

Nakon nasumične inicijalizacije populacije lešinara, od interesa je odrediti dva „najbolja“ rješenja, tj. dva lešinara sa najmanjom vrijednošću kriterijumske funkcije, označena sa **Best<sub>1</sub>** i **Best<sub>2</sub>**. Naredni korak algoritma je da se, za svakog lešinara pojedinačno, nasumično odabere **Best<sub>1</sub>** ili **Best<sub>2</sub>**. Fizički, ovaj korak predstavlja kretanje svakog lešinara iz populacije ka jednom od dva „najbolja“. Odabiranje nasumičnog lešinara **R<sub>i</sub>** se vrši na sljedeći način:

$$\mathbf{R}_i = \begin{cases} \mathbf{Best}_1, p_i = L_1 \\ \mathbf{Best}_2, p_i = L_2 \end{cases}, \quad (2.32)$$

pri čemu je  $p_i$  vjerovatnoća odabiranja lešinara **Best<sub>1</sub>** ili **Best<sub>2</sub>** koja se računa pomoću mehanizma ruleta, kao što je opisano u [96]. Takođe, parametri  $L_1$  i  $L_2$  imaju vrijednosti 0.8 i 0.2, respektivno [96]. Uloga ova dva parametra je da obezbijede adekvatan balans između globalne pretrage (*exploration* ili *diversification*) i lokalne pretrage (*exploitation* ili *intensification*). Ukoliko je vrijednost parametra  $L_1$  blizu 1 i  $L_2$  blizu 0, tada je akcenat na lokalnoj pretrazi. Nasuprot tome, manja vrijednost parametra  $L_1$  (blizu 0) i veća vrijednost parametra  $L_2$  (blizu 1) utiču na forsiranje globalne pretrage.

U narednom koraku, tok AVOA algoritma se odvija u jednom od dva pravca – pravac globalne pretrage ili pravac lokalne pretrage. O daljem pravcu u kojem se kreće tok algoritma odlučuje parametar  $F$ , koji se naziva faktor zasićenosti:

$$F = b \cdot \left[ \sin^w \left( \frac{\pi}{2} \cdot \frac{it}{max\_it} \right) + \cos \left( \frac{\pi}{2} \cdot \frac{it}{max\_it} \right) - 1 \right] + \varepsilon \cdot (1 + 2 \cdot r_1) \cdot \left( 1 - \frac{it}{max\_it} \right), \quad (2.33)$$

gdje je  $\varepsilon$  slučajni broj u opsegu od  $-1$  do  $1$ , a  $b$  je slučajni broj između  $-2$  i  $2$ . Velike vrijednosti parametra  $F$  ukazuju na to da lešinari imaju velike količine energije i da teže da idu dalje tražeći hranu, dok manje vrijednosti faktora zasićenosti  $F$  znače da su lešinari gladni i da imaju manje energije. Nakon proračuna parametra  $F$ , tok algoritma, kao što je već naglašeno, ide u jednom od dva pravca:

- Ako je  $|F| \geq 1$  algoritam ulazi u fazu globalne pretrage;
- Ako je  $|F| < 1$  algoritam ulazi u fazu lokalne pretrage.

Faza globalne pretrage počinje generisanjem slučajnog broja između 0 i 1, označenog sa  $r_{p1}$ . zavisno od odnosa ovog nasumično generisanog broja i predefinisano parametra algoritma  $P_1$ , moguće su dvije strategije globalne pretrage za ažuriranje pozicija lešinara:

$$\mathbf{x}(it+1) = \begin{cases} \mathbf{R}(it) - F \cdot |2 \cdot rand \cdot \mathbf{R}(it) - \mathbf{x}(it)|, P_1 \geq r_{p1} \\ \mathbf{R}(it) - F + rand \cdot ((UB - LB) \cdot rand + LB), P_1 < r_{p1} \end{cases}, \quad (2.34)$$

gdje je  $rand$  slučajni broj između 0 i 1.

Fazu lokalne pretrage karakteriše vrijednost faktora zasićenja  $|F| < 1$ , što fizički znači da lešinari ne posjeduju dovoljno energije da bi išli u potragu za hranom. U okviru ove faze, razliku se dvije pod-faze:

- Ako je  $|F| \geq 0.5$  onda lešinari imaju određenu količinu energije, pa se ta pod-faza naziva „takmičenje za hranom“. Generiše se slučajni broj između 0 i 1 koji se označava  $r_{p2}$  i upoređuje sa parametrom  $P_2$ , koji je definisan na početku algoritma. Na osnovu odnosa između ova dva broja, pozicije lešinara se mogu ažurirati na jedan od sljedeća dva načina:

$$\mathbf{x}(it+1) = \begin{cases} (F + rand) \cdot |2 \cdot rand \cdot \mathbf{R}(it) - \mathbf{x}(it)| - (\mathbf{R}(it) - \mathbf{x}(it)), P_2 \geq r_{p2} \\ \mathbf{R}(it) - (\mathbf{S}_1 + \mathbf{S}_2), P_2 < r_{p2} \end{cases}, \quad (2.35)$$

gdje se vektori  $\mathbf{S}_1$  i  $\mathbf{S}_2$  računaju na sljedeći način:

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_1 &= \mathbf{x}(it) \cdot \frac{rand \cdot \mathbf{x}(it)}{2\pi} \cdot \cos(\mathbf{x}(it)), \\ \mathbf{S}_2 &= \mathbf{x}(it) \cdot \frac{rand \cdot \mathbf{x}(it)}{2\pi} \cdot \sin(\mathbf{x}(it)). \end{aligned} \quad (2.36)$$

- Ukoliko je  $|F| < 0.5$  tada lešinari imaju veoma malu količinu energije, pa se ta faza zove „agresivno takmičenje za hranom“. Slično kao i u prethodnom slučaju, vrši se poređenje slučajnog broja između 0 i 1, označenog sa  $r_{p3}$ , i parametra  $P_3$  kojeg je potrebno definisati na početku algoritma. Matematičke relacije za ažurirane pozicije lešinara date su u nastavku:

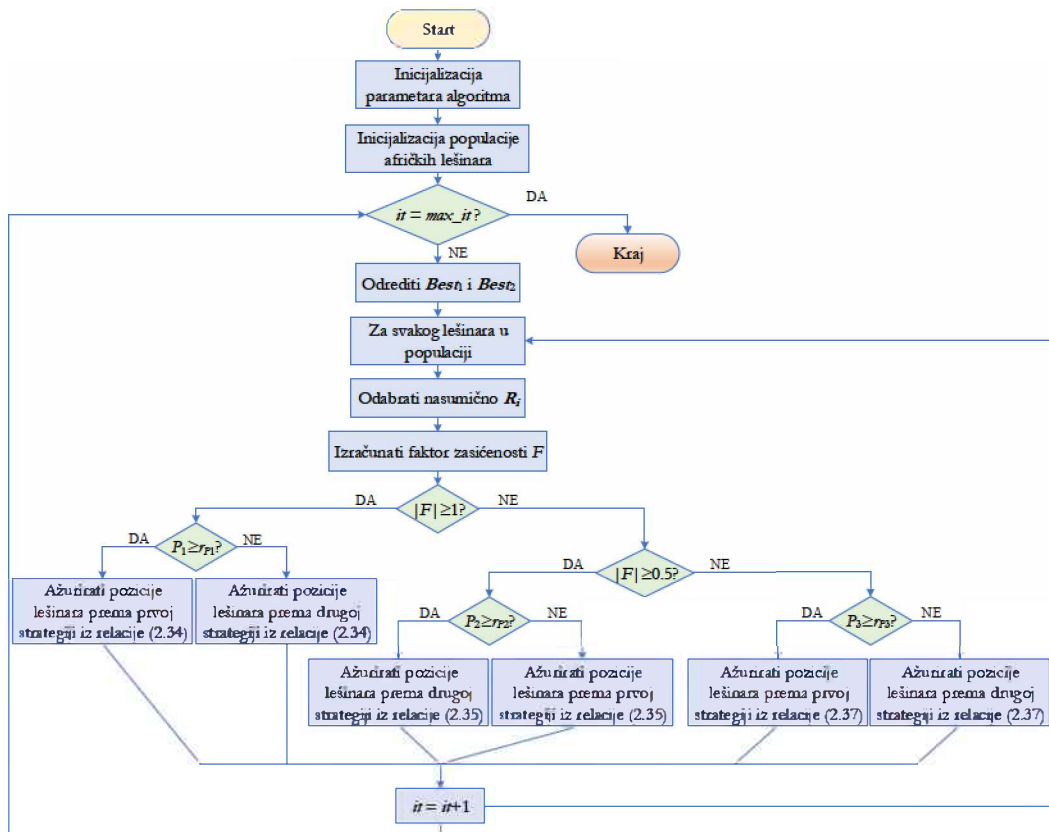
$$\mathbf{x}(it+1) = \begin{cases} \frac{\mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_2}{2}, P_3 \geq r_{p3} \\ \mathbf{R}(it) - F \cdot |\mathbf{R}(it) - \mathbf{x}(it)| \cdot Levy(\mathbf{R}(it) - \mathbf{x}(it)), P_3 < r_{p3} \end{cases}, \quad (2.37)$$

pri čemu se vektori  $A_1$  i  $A_2$  računaju shodno sljedećim relacijama:

$$A_1 = Best_1(it) - F \cdot \frac{Best_1(it) \cdot x(it)}{Best_1(it) - x^2(it)},$$

$$A_2 = Best_2(it) - F \cdot \frac{Best_2(it) \cdot x(it)}{Best_2(it) - x^2(it)}.$$
(2.38)

Prethodno opisani koraci algoritma se iterativno ponavljaju dok se ne dostigne maksimalni broj iteracija. Nakon kompletiranja posljednje iteracije, lešinar sa najmanjom vrijednošću kriterijumske funkcije je rješenje optimizacionog problema. Dijagram toka i pseudokod algoritma optimizacije pomoću afričkih lešinara prikazani su na slikama 2.1.14 i 2.1.15, respektivno.



Slika 2.1.14 Dijagram toka algoritma optimizacije pomoću afričkih lešinara

---

**Pseudokod AVOA algoritma**

---

```
1: Inicijalizovati parametre algoritma
2: Inicijalizovati populaciju – relacija (2.31)
3: for  $it = 1: max\_it$ 
4:   Odrediti  $Best_1$  i  $Best_2$ 
5:   for  $i = 1:n$ 
6:     Odabrati nasumičnog lešinara  $R_i$ 
7:     Izračunati faktor zasićenosti  $F$ 
8:     if ( $|F| \geq 1$ )
9:       if ( $P_1 \geq r_{p1}$ ) Ažurirati pozicije lešinara prema prvoj strategiji iz relacije (2.34)
10:      else Ažurirati pozicije lešinara prema drugoj strategiji iz relacije (2.34)
11:     else
12:       if ( $|F| \geq 0.5$ )
13:         if ( $P_2 \geq r_{p2}$ ) Ažurirati pozicije lešinara prema prvoj strategiji iz relacije (2.35)
14:         else Ažurirati pozicije lešinara prema drugoj strategiji iz relacije (2.35)
15:       else
16:         if ( $P_3 \geq r_{p3}$ ) Ažurirati pozicije lešinara prema prvoj strategiji iz relacije (2.37)
17:         else Ažurirati pozicije lešinara prema drugoj strategiji iz relacije (2.37)
18:     endfor
19:   endfor
20: Optimalno rješenje je lešinar sa najmanjom vrijednošću kriterijumske funkcije nakon posljednje iteracije
```

---

Slika 2.1.15 Pseudokod algoritma optimizacije pomoću afričkih lešinara

### 2.1.3.7 Algoritam kruženja vode sa faktorom isparavanja (Evaporation Rate-Water Cycle Algorithm – ERWCA)

U ovoj disertaciji biće korišćen i metaheuristički ERWCA algoritam, koji je, za razliku od prethodno prikazanih algoritama, baziran na prirodnom fenomenu kruženja vode [97]. Populacija ERWCA algoritma se sastoji od:

- jednog mora, čija je pozicija označena sa  $X_{sea}$ ,
- $N_r$  rijeka ( $N_r$  je parametar definisan na početku ERWCA algoritma), čija je pozicija označena sa  $X_{river}$ ,
- $N_s$  potoka ( $N_s = n - N_r - 1$ ,  $n$  je veličina populacije), čija pozicija je označena sa  $X_{stream}$ .

Prvi korak kod ERWCA algoritma je nasumična inicijalizacije populacije. Pozicija svake jedinke u populaciji inicijalizuje se na sljedeći način:

$$X_j^{(0)} = rand_j \cdot (UB - LB) + LB. \quad (2.39)$$

Nakon procesa inicijalizacije, određuju se vrijednosti kriterijumske funkcije za svakog člana populacije. Onaj član populacije sa najmanjom vrijednošću kriterijumske funkcije predstavlja more, narednih  $N_r$  članova sa minimalnim vrijednostima kriterijumske funkcije su rijeke, a sve ostalo iz populacije su potoci. U prirodi, svaki potok se uliva u rijeku ili u more, pa se stoga broj potoka koji pripadaju moru i svakoj rijeci računa na sljedeći način:

$$NS_j = \text{round} \left\{ \left| \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j} \right| \cdot N_s \right\}, j = 1, 2, \dots, N_r + 1, \quad (2.40)$$

gdje  $NS_j$  označava broj potoka koji se uliva u  $j$ -tu rijeku ili more (ako je  $j=1$ ),  $\text{round}\{\}$  predstavlja funkciju zaokruživanja na najbliži cijeli broj, dok  $||$  označava apsolutnu vrijednost. Koeficijent  $C_j$  se računa prema sljedećoj formuli:

$$C_j = f(\mathbf{X}_j) - f(\mathbf{X}_{N_r+2}), j = 1, 2, \dots, N_r + 1, \quad (2.41)$$

pri čemu  $\mathbf{X}_j$  označava poziciju  $j$ -tog člana populacije. Pozicija svakog potoka se iterativno ažurira zavisno od toga da li se odgovarajući potok uliva u rijeku ili more. Ako se uliva u rijeku onda se za ažuriranje pozicije koristi relacija (2.42), a ako se uliva u more onda se koristi relacija (2.43), koje su date u nastavku:

$$\mathbf{X}_{stream}(it) = \mathbf{X}_{stream}(it-1) + 2 \cdot \text{rand} \cdot (\mathbf{X}_{river}(it-1) - \mathbf{X}_{stream}(it-1)), \quad (2.42)$$

$$\mathbf{X}_{stream}(it) = \mathbf{X}_{stream}(it-1) + 2 \cdot \text{rand} \cdot (\mathbf{X}_{sea}(it-1) - \mathbf{X}_{stream}(it-1)), \quad (2.43)$$

pri čemu  $\text{rand}$  označava slučajni broj između 0 i 1. Nakon ažuriranja pozicija svih potoka, neophodno je uporediti kriterijumske funkcije ažuriranih potoka i rijeka. Ako je došlo do situacije da neki potok ima manju kriterijumsku funkciju od rijeke, onda njih dvoje mijenjaju uloge. Slična procedura se koristi i za ažuriranje pozicija svih rijeka:

$$\mathbf{X}_{river}(it) = \mathbf{X}_{river}(it-1) + 2 \cdot \text{rand} \cdot (\mathbf{X}_{sea}(it-1) - \mathbf{X}_{river}(it-1)). \quad (2.44)$$

Takođe, ukoliko se nakon ažuriranja pozicija rijeka dogodi da je vrijednost kriterijumske funkcije neke rijeke manja od kriterijumske funkcije mora, onda ta rijeka i more mijenjaju svoje uloge.

Posljednja faza ERWCA algoritma je proces isparavanja. Fizički, proces isparavanja može se desiti u dva slučaja:

- Ukoliko rijeka ima mali broj odgovarajućih potoka koji se ulivaju u nju, onda se može desiti da ona ispari prije nego što „dođe“ do mora. Šansa da se ovo dogodi definisana je faktorom isparavanja  $ER$ :

$$ER = \frac{\sum_{j=2}^{N_r+1} NS_j}{N_r}. \quad (2.45)$$

Ukoliko se dogodi isparavanje rijeka, onda se od tako dobijene pare formira novi potok:

$$X_{stream}^{new} = rand \cdot (UB - LB) + LB, \quad (2.46)$$

gdje je **rand** vektor nasumičnih brojeva između 0 i 1.

Sumarno, proces isparavanja rijeka se može predstaviti na sljedeći način:

$$\begin{aligned} & \text{if} \left( e^{-\frac{it}{max-it}} < rand \right) \wedge (NS_j < ER), j = 2, \dots, N_r + 1 \\ & X_{stream}^{new} = rand \cdot (UB - LB) + LB \\ & \text{endif} \end{aligned} \quad (2.47)$$

- Drugi vid procesa isparavanje je isparavanje morske vode prilikom ulivanja potoka ili rijeka. Proces isparavanja morske vode kada se u more uliva rijeka opisan je na sljedeći način:

$$\begin{aligned} & \text{if} \left( |X_{sea} - X_j| < d_{max} \right) \vee (rand < 0.1), j = 2, \dots, N_r + 1 \\ & X_{stream}^{new} = rand \cdot (UB - LB) + LB \\ & \text{endif} \end{aligned} \quad (2.48)$$

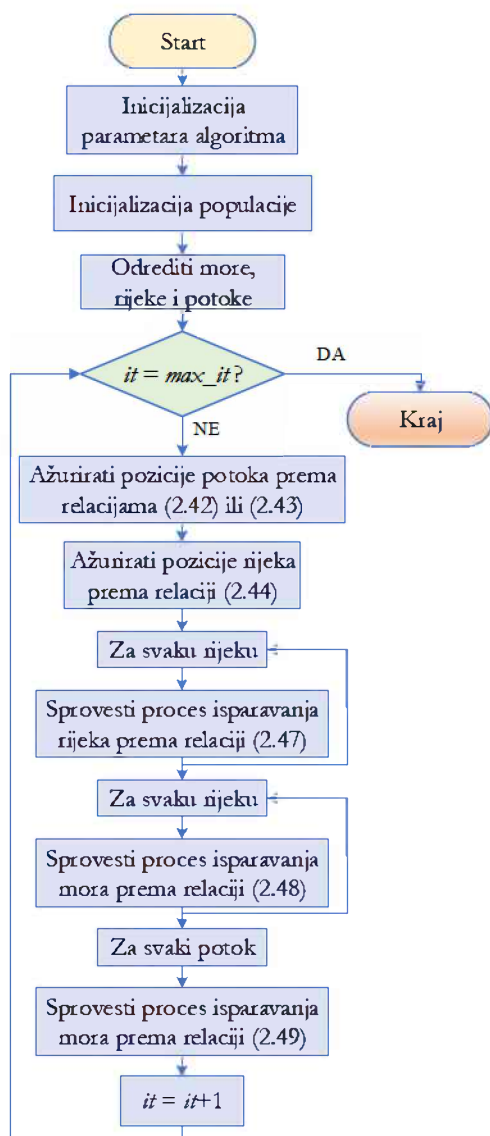
Druga moguća situacija jest da dođe do isparavanja morske vode kada se u more uliva potok. Taj proces je opisan sljedećom relacijom:

$$\begin{aligned} & \text{if} \left( |X_{sea} - X_j| < d_{max} \right), j = 1, 2, \dots, N_r \\ & X_{stream}^{new} = X_{sea} + \sqrt{\mu} \cdot randn \\ & \text{endif} \end{aligned} \quad (2.49)$$

U prikazanim relacijama (2.48) i (2.49),  $\mu$  je parametar čija je vrijednost podešena na 0.1 [97], **randn** je vektor standardnih Gausovih brojeva, a  $d_{max}$  je parametar koji se iterativno mijenja shodno sljedećoj relaciji:

$$d_{max}(it) = d_{max}(it-1) - \frac{d_{max}(it-1)}{max\_it}. \quad (2.50)$$

Nakon kompletiranja procesa isparavanja, završena je jedna iteracija ERWCA algoritma. Prethodno opisana procedura se iterativno ponavlja sve dok se ne dostigne predefinisani maksimalan broj iteracija. Nakon kompletiranja posljednje iteracije, onaj član populacije sa najmanjom vrijednošću kriterijumske funkcije predstavlja konačno rješenje problema optimizacije. Konačno, dijagram toka i pseudokod ERWCA algoritma prikazani su na slici 2.1.16.



#### Pseudokod ERWCA algoritma

- 1: Inicijalizovati parametre algoritma
- 2: Inicijalizovati populaciju – relacija (2.39)
- 3: Odrediti more, rijeke i potoke
- 4: **for**  $it = 1:max\_it$
- 5:   Ažurirati pozicije potoka prema relacijama (2.42) ili (2.43)
- 6:   Ažurirati pozicije rijeke prema relaciji (2.44)
- 7:   **for**  $i=1:N$ ,
- 8:     Sprovesti proces isparavanja rijeka shodno relaciji (2.47)
- 9:   **endfor**
- 10:   **for**  $i=1:N$ ,
- 11:     Sprovesti proces isparavanja mora prema relaciji (2.48)
- 12:   **endfor**
- 13:   **for**  $i=1:N$ ,
- 14:     Sprovesti proces isparavanja mora prema relaciji (2.49)
- 15:   **endfor**
- 16: **endfor**
- 17: Optimalno rješenje je pozicija člana populacije sa najmanjom vrijednošću kriterijumske funkcije nakon posljednje iteracije

a)

b)

Slika 2.1.16 a) Dijagram toka i b) pseudokod algoritma kruženja vode sa faktorom isparavanja



### 2.1.4 Hibridne i modifikovane verzije metaheurističkih algoritama

U cilju poboljšanja performansi originalnih algoritama, tj. ubrzanja konvergencije i dobijanja što boljeg rješenja, u ovoj disertaciji predložene su određene modifikacije prethodno opisanih algoritama. Preciznije, izvršene su hibridne i adaptivne modifikacije datih algoritama. Performanse svih predloženih algoritama biće testirane primjenom na konkretne optimizacione probleme u narednim poglavljima disertacije.

Hibridizacija dva algoritma se može sprovesti prema nekoj od dvije postojeće strategije hibridizacije – kolaborativna i integrativna [98]. Kolaborativna strategija se dalje dijeli na timsku i relejnu kolaborativnu strategiju, koje će detaljnije biti opisane u nastavku. Integrativna strategija hibridizacije podrazumijeva da se samo jedna određena funkcija nekog algoritma zamijeni sa drugim algoritmom. Ova strategija hibridizacije neće biti primijenjena u ovoj disertaciji.

#### 2.1.4.1 Timska kolaborativna strategija hibridizacije

Kod timske kolaborativne strategije hibridizacije karakteristično je to da se oba algoritma izvršavaju paralelno. U ovoj disertaciji predloženi su hibridni EO-GWO i EO-ERWCA algoritmi. Prvi korak kod ovakve vrste hibridnog algoritma je da se populacija inicijalizuje nasumično, kao i kod svakog od već opisanih metaheurističkih algoritama. Nakon toga, vrši se podjela populacije na dvije jednake sub-populacije. Za prvu sub-populaciju primijenjuje se prvi algoritam, dok se za drugu sub-populaciju primijenjuje drugi algoritam. Iterativni postupak se ponavlja dok se ne postigne maksimalni broj iteracija, pa se nakon posljednje iteracije odrede najbolja rješenja iz obje sub-populacije. Bolje rješenje od ta dva rješenja, tj. ono sa manjom vrijednošću kriterijumske funkcije, je ujedno rješenje optimizacionog problema. Pseudokod opisanog tipa hibridnog algoritma dat je na slici u nastavku.

---

---

#### Pseudokod EO-GWO (EO-ERWCA) algoritma

---

- 1: Inicijalizovati parametre oba algoritma
  - 2: Nasumično inicijalizovati populaciju
  - 3: **for**  $it = 1:max\_it$
  - 4:   **for**  $i = 1:n/2$
  - 5:     Ažurirati prvu sub-populaciju pomoću EO algoritma
  - 6:     Ažurirati drugu sub-populaciju pomoću GWO (ERWCA) algoritma
  - 7:   **endfor**
  - 8: **endfor**
  - 9: Optimalno rješenje je bolje od dva rješenja dobijena iz obje sub-populacije
- 

Slika 2.1.17 Pseudokod hibridnih EO-GWO i EO-ERWCA algoritama

#### 2.1.4.2 Relejna kolaborativna strategija hibridizacije

Kod hibridnih algoritama koji su kreirani na osnovu relejne kolaborativne strategije hibridizacije karakteristično je da se algoritmi izvršavaju jedan za drugim, a ne paralelno kao u prethodnom slučaju. Kod primjene metaheurističkih algoritama, inicijalizacija populacije je izuzetno važan korak, kojem se u originalno predloženim algoritmima ne posvećuje dovoljno pažnje. Naime, kao što je već opisano u prethodnim potpoglavljima, populacija svakog metaheurističkog algoritma se nasumično inicijalizuje tako da sve optimizacione varijable budu između donje i gornje granice. U cilju obezbjeđivanja optimalnih performansi metaheurističkih algoritama, tj. brže konvergencije i dobijanja što boljeg finalnog optimalnog rješenja, potrebno je obezbijediti što bolju i kvalitetniju početnu populaciju rješenja. Stoga, u ovoj disertaciji koriste se hibridni metaheuristički algoritmi kod kojih jedan algoritam služi za inicijalizaciju populacije, tj. za obezbjeđivanje početne populacije za drugi algoritam. Nakon toga, na bazi matematičkih relacija drugog algoritma, započinje iterativni postupak kojim se od početne populacije dobija finalna populacije, iz koje se dalje dobija optimalno rješenje.

U ovoj disertaciji, kao algoritmi za inicijalizaciju populacije koriste se haotični algoritam [99] i algoritam simuliranog kaljenja (*Simulated Annealing* – SA) [100].

Haotični algoritam se koristi za generisanje pseudo-slučajnih brojeva u određenom opsegu prema nekoj od postojećih tehnika mapiranja, kao što su logističko, cirkularno, kubično, Gausovo, sinusoidalno, itd. U ovoj disertaciji koristi se logističko mapiranje, koje se vrši prema sljedećim relacijama [99]:

$$\begin{aligned} y_1 &= \mathit{rand}, \\ y_{i+1} &= 4 \cdot y_i \cdot (1 - y_i), \end{aligned} \quad (2.51)$$

pri čemu je  $i=1, 2, \dots, n$ , gdje  $n$  predstavlja veličinu populacije, kao i kod svih prethodno opisanih metaheurističkih algoritama.

U ovoj disertaciji predložena su dva hibridna metaheuristička algoritma kod kojih se populacija inicijalizuje haotičnim algoritmom – haotični algoritam žutih riba (C-YSGA) i haotični optimizator ekvilibrijuma (C-EO) algoritam. Kod C-YSGA algoritma za inicijalizaciju populacije se umjesto relacije (2.10) koristi sjedeća relacija:

$$p_i^{(0)} = LB + y_i \cdot (UB - LB), \quad (2.52)$$

dok se populacija C-EO algoritma inicijalizuje na sljedeći način (umjesto relacije (2.5)):

$$C_i^{(0)} = LB + y_i \cdot (UB - LB). \quad (2.53)$$

Drugi algoritam koji se može koristiti za inicijalizaciju populacije je algoritam simuliranog kaljenja (SA), koji je posebno pogodan jer pripada grupi algoritama koji su bazirani na jednom rješenju, tzv. S-metaheuristikama [100]. U ovoj disertaciji je predložen hibridni SA-MRFO algoritam, kod kojeg je populacija morskih raža inicijalizovana primjenom SA algoritma, a ne nasumično kao što je to prikazano relacijom (2.18). Proces inicijalizacije populacije morskih raža pomoću SA algoritma dat je pseudokodom na slici koja slijedi.

---



---

```

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

```

---

Slika 2.1.18 Pseudokod SA algoritma za inicijalizaciju morskih raža

### 2.1.4.3 Adaptivne modifikacije metaheurističkih algoritama

Iterativni proces svakog metaheurističkog algoritma karakteriše pretraga za optimalnim rješenjem, koja se sastoji iz globalne i lokalne pretrage. Globalna pretraga označava široku pretragu kompletnog skupa mogućih rješenja, dok lokalna pretraga predstavlja pretragu u bliskom okruženju već pronađenog rješenja, kako bi došlo do eventualnog poboljšanja toga rješenja. S obzirom na karakter globalne i lokalne pretrage, jasno je da je u ranijim iteracijama algoritma potrebno forsirati globalnu pretragu, a u kasnijim iteracijama, kada se već došlo do rješenja koje je blizu optimalnog, potrebno je staviti akcenat na lokalnu pretragu u cilju poboljšanja trenutnog rješenja.

Osnovna ideja adaptivne modifikacije postojećih metaheurističkih algoritama je da se najprije identifikuju parametri algoritma koji kontrolišu balans između globalne i lokalne pretrage. Nakon toga, predlaže se adaptivna promjena tih parametara tokom iteracija, tako da se u ranijim iteracijama stavi fokus na globalnu pretragu, a u kasnijim iteracijama akcenat

prebaci na lokalnu pretragu. U ovoj disertaciji predloženi su adaptivni algoritam crnih udovica (A-BWO algoritam) i adaptivni algoritam optimizacije pomoću afričkih lešinara (A-AVOA algoritam).

Kao što je detaljnije opisano u [94], kod BWO algoritma faktor razmnožavanja  $PR$  je parametar koji se vezuje za proces rekombinacije, odnosno koji definiše sposobnost algoritma da vrši globalnu pretragu. Nasuprot tome, faktor mutacije  $MR$  govori o sposobnosti algoritma da sprovođi lokalnu pretragu. Kod originalnog BWO algoritma, ovi parametri su konstantni i imaju vrijednosti  $PR=0.6$  i  $MR=0.4$ . Adaptivna modifikacija BWO algoritma predložena u ovoj disertaciji podrazumijeva adaptivnu promjenu ovih parametara tokom iteracija, tako da se osigura da algoritam u ranijim iteracijama vrši dominantno globalnu pretragu, a u kasnijim iteracijama dominantno lokalnu pretragu. Ovaj efekat se postiže tako što se parametar  $PR$  linearno smanjuje, a parametar  $MR$  linearno raste tokom iteracija, tako je zbir ova dva parametra u svakom trenutku bude jednak 1. Pomenuti parametri se iterativno mijanjaju u skladu sa sljedećom relacijom:

$$\begin{aligned} PR(it) &= PR_{max} - (PR_{max} - PR_{min}) \cdot \frac{it}{max\_it}, \\ MR(it) &= MR_{min} + (MR_{max} - MR_{min}) \cdot \frac{it}{max\_it}, \end{aligned} \quad (2.54)$$

gdje su vrijednosti minimalnih i maksimalnih vrijednosti parametara odabrane metodom pokušaja i iznose:  $PR_{min}=0.6$ ,  $PR_{max}=0.8$ ,  $MR_{min}=0.2$  i  $MR_{max}=0.4$ .

Takođe, kao što je već rečeno prilikom opisivanja AVOA algoritma, parametri  $L_1$  i  $L_2$  definišu odnos između lokalne i globalne pretrage i to na sljedeći način:

- Ako je vrijednost parametra  $L_1$  blizu 1 i  $L_2$  blizu 0, tada je akcenat na lokalnoj pretrazi;
- Ako je vrijednost parametra  $L_1$  blizu 0 i  $L_2$  blizu 1, tada je akcenat na lokalnoj pretrazi.

U radu [96] gdje je originalno predložen AVOA algoritam, sugerisano je da parametri  $L_1$  i  $L_2$  imaju fiksne vrijednosti koje se ne mijenjaju tokom iteracija, tj.  $L_1=0.8$  i  $L_2=0.2$ . Prema adaptivnoj modifikaciji AVOA algoritma koja je predložena u ovoj disertaciji (A-AVOA), u cilju obezbjeđivanja dominacije globalne pretrage u ranijim i lokalne pretrage u kasnijim iteracijama, parametre  $L_1$  i  $L_2$  je neophodno adaptivno mijenjati tokom iteracija na sljedeći način:

$$\begin{aligned}
L_1(it) &= L_{1min} + (L_{1max} - L_{1min}) \cdot \frac{it}{max\_it}, \\
L_2(it) &= L_{2max} - (L_{2max} - L_{2min}) \cdot \frac{it}{max\_it},
\end{aligned}
\tag{2.55}$$

gdje su vrijednosti minimalnih i maksimalnih vrijednosti parametara takođe odabrane metodom pokušaja i iznose:  $L_{1min}=0.4$ ,  $L_{1max}=0.6$ ,  $L_{2min}=0.4$  i  $L_{2max}=0.6$ .

## 2.2 Vještačke neuralne mreže (*Artificial Neural Networks* – ANN)

Vještačke neuralne mreže predstavljaju jedan od najčešćih oblika implementacije vještačke inteligencije. One su moderan računarski alat ima veoma široku i rasprostranjenu primjenu. Vještačke neuralne mreže (NM) su napravljene koristeći analogiju sa ljudskim nervnim sistemom, čija je osnovna jedinica građe nervna ćelija – neuron.

### 2.2.1 Opšte napomene o neuralnim mrežama

Biološki neuron se sastoji od dendrita, tijela ćelije i aksona. Dendriti služe za prikupljanje signala i informacija od drugih neurona i prosljeđuju ih tijelu nervne ćelije. Nakon toga, tijelo ćelije obrađuje signal i šalje aksonu, koji taj signal dalje prosljeđuje drugim neuronima ostvarujući vezu preko sinapsi. S obzirom na to da svaki neuron ima veći broj dendrita i sinapsi, on može da prenosi veći broj signala istovremeno. Ovakav mehanizam predstavlja osnovu za kreiranje i razvoj vještačkih neuralnih mreža [101, 102].

Ono što vještačke neuralne mreže čini veoma popularnim alatom jesu brojne prednosti, među kojima su najvažnije sljedeće [101]:

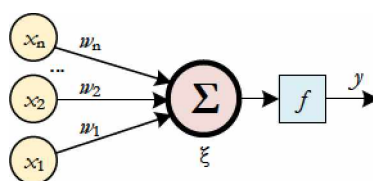
- Neuralne mreže pripadaju tzv. *black-box* alatima, tj. mogu da povežu izlazni signal sa ulaznim signalom bez poznavanja i razumijevanja modela samog sistema;
- Sposobne su da nauče i modeluju kako linearne, tako i nelinearne veze;
- Imaju veoma veliku sposobnost generalizacije, što znači da su primijenjive i za podatke za koje nisu obučene;
- Veoma dobro funkcionišu sa oštećenim, zašumljenim i nepotpunim podacima, tj. signalima kojima nedostaje određeni broj odbiraka;

Generalno posmatrano, vještačke neuralne mreže su robusnije i najprikladnije za primjenu u odnosu na brojne ostale računске alate za rješavanje problema iz sljedećih kategorija [101]:

- 1) Klasifikacija obrasca (*pattern classification*) predstavlja povezivanje nekog nepoznatog ulaznog obrasca sa jednim od već poznatih predefinisanih klasa, bazirano na jednoj ili više osobina koji karakterišu tu klasu.
- 2) Grupisanje (*clustering*) se sprovodi tako što se formiraju grupe ili klase istraživanjem sličnosti ili razlika između ulaznih obrazaca na osnovu njihovih međusobnih veza;
- 3) Aproksimacija ili modelovanje funkcije uključuje obučavanje vještačke neuralne mreže na osnovu ulazno-izlaznog seta podataka kako bi se aproksimirala postojeća zavisnost između izlaznih podataka i ulaznih podataka. Neuralne mreže se smatraju univerzalnim aproksimatorom koji može da aproksimira bilo koju proizvoljnu funkciju sa velikim stepenom tačnosti.
- 4) Prognoziranje (*forecasting*) predstavlja obučavanje vještačke neuralne mreže na odbircima signala koji opisuju određeni fenomen u nekom vremenskom intervalu, a zatim korišćenje neuralne mreže za predviđanje drugih scenarija, tj. ponašanja sistema u narednim vremenskim intervalima.
- 5) Optimizacija se odnosi na pronalaženje rješenja pri čemu se vrši minimizacija ili maksimizacija definisane kriterijumske funkcije, uzimajući u obzir određena ograničenja.
- 6) Povezivanje (*association*) uključuje obučavanje neuralne mreže korišćenjem idealnog kompletnog seta podataka, koji nije ni na koji način oštećen ili zašumljen, a zatim primijenjivanje tako obučene neuralne mreže za klasifikaciju zašumljenih podataka ili čak za rekonstrukciju signala kojima nedostaju određeni odbirci.
- 7) Regulacija sistema podrazumijeva dizajniranje neuralne mreže koja će služiti kao adaptivni regulator u sistemima automatskog upravljanja, tj. generisati upravljački signal tako da izlazni signal iz sistema prati referentni signal.

### 2.2.2 Matematičko modelovanje vještačkih neuralnih mreža

Sistem od  $n$  neurona koji nose različite signale intenziteta  $x_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) i koji imaju sinapse intenziteta  $w_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) ilustrovan je na slici 2.2.1. Ovaj sistem neurona dalje prosljeđuje signale izlaznom neuronu čiji je prag aktivacije  $b$ .



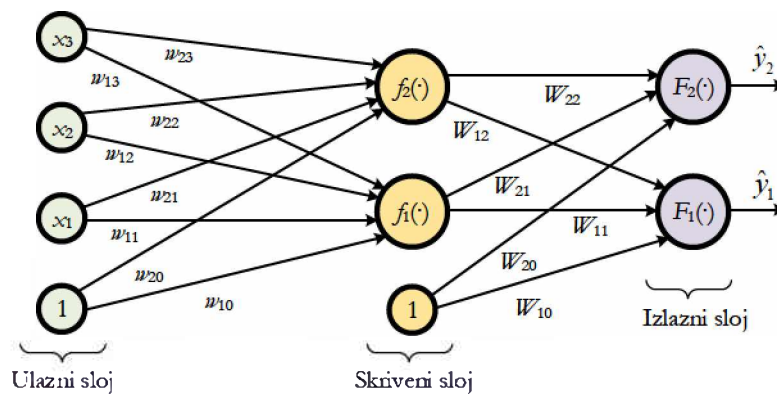
Slika 2.2.1 Sistem od  $n$  ulaznih i jednog izlaznog neurona

S matematičkog aspekta,  $x$  predstavlja ulazni signal,  $w$  je težinski koeficijent, a  $y$  je izlazni signal koji se računa na sljedeći način [101, 102]:

$$y = f(\xi) = f\left(\sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i\right) = \begin{cases} 1, & \xi \geq b \\ 0, & \xi < b \end{cases} \quad (2.56)$$

gdje  $f$  predstavlja aktivacionu funkciju, koja je u ovom slučaju predstavljena step funkcijom. Osim step funkcije, aktivaciona funkcija može biti linearna, sigmoidna, hiperbolični tangens, itd. Alternativno, u literaturi se vrlo često može uočiti da je prag neurona predstavljen kao dodatni ulazni čvor čija je vrijednost  $x=1$  i težinski koeficijent  $w=b$ .

Kako bi neuralna mreža bila sposobna da rješava složene nelinearne probleme, osnovna struktura predstavljena na prethodnoj slici se proširuje sa dodatnim slojevima neurona između ulaznog i izlaznog sloja. Ovi umetnuti slojevi se nazivaju skriveni slojevi. Primjer neuralne mreže sa tri sloja (jedan ulazni, jedan skriveni i jedan izlazni) ilustrovan je na slici 2.2.2.



Slika 2.2.2 Primjer neuralne mreže sa jednim ulaznim, jednim skrivenim i jednim izlaznim slojem

Izlazi iz neuralne mreže se sada mogu izračunati prema sljedećoj relaciji:

$$\hat{y}_i(\mathbf{w}, \mathbf{W}) = F_i\left(W_{i0} + \sum_{j=1}^q W_{ij} \cdot f_j\left(w_{j0} + \sum_{k=1}^m w_{jk} \cdot x_k\right)\right), \quad (2.57)$$

pri čemu pojedini članovi u prethodnoj relaciji imaju sljedeća značenja:

- $\hat{y}_i$  predstavlja izlaz iz neuralne mreže (sa prethodne slike  $i=\{1, 2\}$ );
- $F$  i  $f$  su aktivacione funkcije izlaznog i skrivenog sloja, respektivno;
- $q$  je broj neurona u skrivenom sloju, a  $m$  je broj neurona u ulaznom sloju;

- $\mathbf{w}$  i  $\mathbf{W}$  su matrice težinskih koeficijenata neuralne mreže, koji predstavljaju podešive parametre vještačkih neuralnih mreža i određuju se u procesu koji se naziva obučavanje neuralne mreže.

### 2.2.3 Obučavanje neuralnih mreža

Obučavanje neuralnih mreža predstavlja podešavanje težinskih koeficijenata s ciljem da greška između izlaza iz neuralne mreže i izlaznog seta podataka za obučavanje bude minimizovana [102]. Ulazno-izlazni set podataka koji je neophodan za obučavanje neuralne mreže označava se sa  $Z^N$ :

$$Z^N = \{[u(t), y(t)]; t = 1, 2, \dots, N\}, \quad (2.58)$$

gdje je  $t$  redni broj odbiraka,  $N$  je ukupan broj odbiraka,  $u$  predstavlja ulazni signal, dok je  $y$  izlazni signal. S obzirom na to da je cilj podešavanja težinskih koeficijenata da izlaz iz neuralne mreže bude što bliži izlaznom setu podataka za obučavanje, kriterijumska funkcija koju je cilj minimizovati se najčešće formuliše kao srednja vrijednost kvadrata greške:

$$V_N(\mathbf{w}, \mathbf{W}, Z^N) = \frac{1}{2 \cdot N} \sum_{t=1}^N [y(t) - \hat{y}(t, \mathbf{w}, \mathbf{W})]^2. \quad (2.59)$$

U cilju obučavanja neuralne mreže u literaturi se može naći veliki broj algoritama, kao što su gradijentni metod, Njutnov metod, konjugovani gradijentni, kvazi-Njutnov metod, Levenberg-Marquardt algoritam, *backpropagation* algoritam, metod najmanjih kvadrata, rekurzivni metod predikcije greške, itd. U ovoj disertaciji, za obučavanje neuralnih mreža biće primijenjen Levenberg-Marquardt algoritam, pa će u nastavku biti ukratko predstavljen ovaj algoritam [103, 104].

Levenberg-Marquardt (LM) algoritam je iterativni algoritam koji se često koristi za rješavanje optimizacionih problema kod kojih je cilj minimizovati kriterijumsku funkciju datu u obliku kvadrata greške. Ukoliko se svi težinski koeficijenti vještačke neuralne mreže zapišu u obliku vektora  $\boldsymbol{\theta}$ , tada se iterativno ažuriranje težinskih koeficijenata prema Levenberg-Marquardt algoritmu sprovodi shodno sljedećoj relaciji [104]:

$$\boldsymbol{\theta}^{(i+1)} = \boldsymbol{\theta}^{(i)} + \mathbf{f}^{(i)}, \quad (2.60)$$

gdje  $i$  predstavlja trenutnu iteraciju, a vektor  $\mathbf{f}$  označava pravac pretrage.



Ovaj algoritam kombinuje dva numerička algoritma za minimizaciju: gradijentni metod i Gaus-Njutnov metod. Naime, LM algoritam se ponaša kao gradijentni metod kada su optimizacione varijable daleko od svojih optimalnih vrijednosti, dok se ponaša kao Gaus-Njutnov metod kada su optimizacione varijable blizu svojih optimalnih vrijednosti. Ponašanje LM algoritma određeno je odnosom između stvarnog i predviđenog stepena pada kriterijumske funkcije  $V_N$ . Ovaj faktor se označava sa  $r^{(i)}$  i računa na sljedeći način:

$$r^{(i)} = \frac{V_N(\boldsymbol{\theta}^{(i)}, Z^N) - V_N(\boldsymbol{\theta}^{(i)} + \mathbf{f}^{(i)}, Z^N)}{V_N(\boldsymbol{\theta}^{(i)}, Z^N) - L^{(i)}(\boldsymbol{\theta}^{(i)} + \mathbf{f}^{(i)})}, \quad (2.61)$$

gdje je član  $L$  definisan na sljedeći način:

$$L^{(i)}(\boldsymbol{\theta}^{(i)} + \mathbf{f}^{(i)}) = \sum_{t=1}^N \left( y(t) - \hat{y}(t, \boldsymbol{\theta}^{(i)}) - \mathbf{f}^T \cdot \frac{\partial y(t, \boldsymbol{\theta})}{\partial \boldsymbol{\theta}} \Big|_{\boldsymbol{\theta}=\boldsymbol{\theta}^{(i)}} \right)^2. \quad (2.62)$$

U cilju pojednostavljenja prethodnog izraza, najprije je potrebno definisati  $\mathbf{G}$  kao gradijent kriterijumske funkcije  $V_N$  po vektoru  $\boldsymbol{\theta}$  i Hesijan  $\mathbf{H}$ :

$$\begin{aligned} \mathbf{G} &= \frac{\partial V_N(\boldsymbol{\theta}, Z^N)}{\partial \boldsymbol{\theta}}, \\ \mathbf{H} &= \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \frac{\partial (y(t) - \hat{y}(t, \boldsymbol{\theta}))}{\partial \boldsymbol{\theta}} \cdot \left( \frac{\partial (y(t) - \hat{y}(t, \boldsymbol{\theta}))}{\partial \boldsymbol{\theta}} \right)^T. \end{aligned} \quad (2.63)$$

Nakon toga, potrebno je uvesti i Gaus-Njutnovu aproksimaciju Hesijana, označenu sa  $\mathbf{R}$ :

$$\mathbf{R} = \mathbf{J}^T \cdot \mathbf{W}_1 \cdot \mathbf{J}, \quad (2.64)$$

gdje je  $\mathbf{W}_1$  dijagonalna matrica čiji su elementi po dijagonali jednaki  $\frac{1}{2 \cdot N}$  i  $\mathbf{J}$  je matrica Jakobijana:

$$\mathbf{J} = \frac{\partial \hat{\mathbf{y}}(\boldsymbol{\theta})}{\partial \boldsymbol{\theta}}. \quad (2.65)$$

Sada se relacija (2.62) može jednostavnije zapisati na sljedeći način:

$$L^{(i)}(\boldsymbol{\theta}^{(i)} + \mathbf{f}^{(i)}) = V_N(\boldsymbol{\theta}^{(i)}, Z^N) + \mathbf{f}^T \cdot \mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}^{(i)}) + \frac{1}{2} \cdot \mathbf{f}^T \cdot \mathbf{R}(\boldsymbol{\theta}^{(i)}) \cdot \mathbf{f}. \quad (2.66)$$

Konačno, Levenberg-Marquardt algoritam se iterativno sprovodi shodno sljedećim koracima [104]:

- 1) Inicijalizovati vrijednosti težinskih koeficijenata  $\theta^{(0)}$  i veličinu koraka  $\lambda^{(0)}$ .
- 2) Na osnovu sljedeće relacije izračunati pravac pretrage  $f^{(i)}$  ( $I$  predstavlja jediničnu matricu):

$$\left[ R(\theta^{(i)}) + \lambda \cdot I \right] \cdot f^{(i)} = -G(\theta^{(i)}). \quad (2.67)$$

- 3) Izračunati faktor  $r^{(i)}$  na osnovu relacije (2.61) kako bi se odredio dalji pravac LM algoritma.
  - a) Ako je  $r^{(i)} > 0.75 \rightarrow \lambda^{(i)} = \lambda^{(i)}/2$ , tj. LM algoritam treba da se ponaša kao Gaus-Njutnov algoritam.
  - b) Ako je  $r^{(i)} < 0.25 \rightarrow \lambda^{(i)} = 2 \cdot \lambda^{(i)}$ , tj. LM algoritam treba da se ponaša kao gradijentni metod.
- 4) Ažurirati vektor težinskih koeficijenata  $\theta^{(i+1)} = \theta^{(i)} + f^{(i)}$  i povećati brojač iteracija:  $i = i + 1$ .
- 5) Provjeriti ispunjenost zaustavnog kriterijuma:
  - a) Ako kriterijum za zaustavljanje algoritma nije ispunjen vratiti se na korak 2).
  - b) Ako je kriterijum za zaustavljanje algoritma ispunjen, onda se algoritam prekida i konačno rješenje, tj. optimalne vrijednosti težinskih koeficijenata neuralne mreže, predstavljeno je vektorom  $\theta$  nakon posljednje iteracije.

# Poglavlje 3

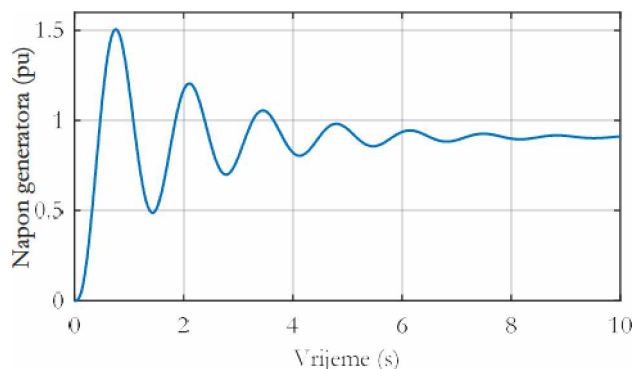
## Predlog nove strukture i dizajna regulatora pobudnih sistema sinhronih mašina

Treće poglavlje, kroz dvije cjeline, posvećeno je opisu i analizi rada regulatora pobudnih sistema sinhronog generatora. Prva cjelina se odnosi na optimalni dizajn već postojećih regulatora primjenom novih modifikovanih metaheurističkih algoritama i novih kriterijumskih funkcija, za uprošćenu šemu sistema za regulaciju napona. Drugi dio ovog poglavlja odnosi se na predlog nove strukture regulatora, koja još nije u dostupnoj literaturi primijenjena kod sistema za regulaciju napona. U ovoj cjelini, za razliku od prve, posmatrana je realna, potpuna zamjenska šema sistema za regulaciju napona, koja je realizovana na osnovu tehničke dokumentacije jednog od generatora snage od 40 MVA iz HE „Penućica“.

### 3.1 Optimalni dizajn regulatora za uprošćenu šemu sistema za regulaciju napona sinhronog generatora

U ovom potpoglavljju biće prikazani rezultati dobijeni optimizacijom parametara idealnog PID, realnog PID, FOPID i PIDD<sup>2</sup> regulatora uzimajuću u obzir uprošćenu šemu sistema za regulaciju napona, prikazanu na slici 1.6.1. U cilju optimizacije parametara pomenutih regulatora koristiće se predloženi hibridni i adaptivni metaheuristički algoritmi, uz primjenu novih kriterijumskih funkcija.

Prije prelaska na sam proces optimalnog dizajna regulatora, korisno je analizirati dinamičke performanse sistema za automatsku regulaciju napona prema uprošćenoj šemi datoj na slici 1.6.1. Naime, na slici 3.1.1 prikazan je step odziv ovakvog sistema u odsustvu regulatora, pri čemu su korišćeni parametri čije su vrijednosti date u Potpoglavljju 1.6. Inače, ovi parametri sistema za regulaciju napona na krajevima sinhronog generatora su korišćeni gotovu u svim radovima koji se bave optimizacijom parametara regulatora.



Slika 3.1.1 Step odziv sistema za regulaciju napona sinhronog generator u odsustvu regulatora

Kvalitet prelaznog procesa step odziva najbolje se opisuje pomoću karakterističnih veličina prelaznog procesa, kao što su vrijeme uspona, vrijeme smirenja, preskok i greška u stacionarnom stanju. Ukoliko se usvoji da je vrijeme trajanja simulacije 10, uz korak simulacije koji iznosi  $10^{-4}$ , onda karakteristične veličine prelaznog procesa, za posmatrani odziv sa prethodne slike, imaju sljedeće vrijednosti:

- vrijeme uspona iznosi 0.2607s,
- vrijeme smirenja iznosi 6.9865s,
- preskok je 65.7% i
- greška u stacionarnom stanju je 0.0881 pu (*per unit*).

Na osnovu prezentovanih vrijednosti, kao i step odziva sa slike 3.1.1, očigledno je da je odziv veoma spor (veliko vrijeme smirenja), kao i da je vrijednost preskoka izuzetno velika. Na osnovu navedenog i u cilju postizanja kvalitetnijeg prelaznog procesa, jasno je da postoji potreba za uvođenjem regulatora i za njegovim adekvatnim optimalnim dizajnom.

### 3.1.1 Optimalni dizajn idealnog PID regulatora

U dostupnoj literaturi može se naći veliki broj radova posvećenih optimalnom dizajnu idealnog PID regulatora za uprošćenu šemu sistema za regulaciju napona sinhronog generatora [3 – 16]. Optimalni dizajn PID regulatora podrazumijeva pronalaženje optimalnih vrijednosti parametara PID regulatora –  $K_p$ ,  $K_i$  i  $K_d$ , shodno njegovoj prenosnoj funkciji koja je data relacijom (1.4), a u cilju minimizacije odgovarajuće kriterijumske funkcije.

U cilju optimizacije parametara idealnog PID regulatora, u dostupnoj literaturi autori dominantno koriste metaheurističke algoritme, kao što su: poboljšani algoritam baziran na bubrezima (*Improved Kinney-inspired Algorithm – IKA*) [3], algoritam baziran na optimizaciji rojeva čestica (*Particle Swarm Optimization – PSO*) [14], kombinacija Taguchi i genetičkog

algoritma (*Taguchi Combined Genetic Algorithm* – TCGA) [9], algoritam optimizacije kitova (*Whale Optimization Algorithm* – WOA) [4], algoritam optimizacije pomoću kolonije mrava (*Ant Colony Optimization* – ACO) [7], genetički algoritam (*Genetic Algorithm* – GA) [11], pojednostavljeni algoritam rojeva čestica (*Many Optimizing Liaisons* – MOL) [10], haotični optimizacioni algoritam (*Chaotic Optimization Algorithm* – COA) [13], algoritam pretrage simbiotskih organizama (*Symbiotic Organism Search* – SOS) [5], algoritam vještačke kolonije pčela (*Artificial Bee Colony* – ABC) [12], algoritam lokalnog unimodalnog uzorkovanja (*Local Unimodal Sampling* – LUS) [6, 8], algoritam harmonijske pretrage (*Harmony Search* – HS) [6], algoritam baziran na podučavanju i učenju (*Teaching – Learning Based Optimization* – TLBO) [6], modificirani algoritam rojeva čestica (*Craziness PSO*) [15] i algoritam haotičnog roja mrava (*Chaotic Ant Swarm* – CAS) [16].

Prilikom procesa određivanja optimalnih vrijednosti parametara idealnog PID regulatora pomoću metaheurističkih algoritama neophodno je definisati adekvatnu kriterijumsku funkciju. U cilju pregleda korišćenih kriterijumskih funkcija, u Tabeli 3.1.1 prikazane su kriterijumske funkcije korišćene u radovima koji se bave optimizacijom parametara idealnog PID regulatora.

**Tabela 3.1.1** Pregled korišćenih kriterijumskih funkcija za optimizaciju parametara idealnog PID regulatora

Referenca	Kriterijumska funkcija $f$
[3]	$f = \mu \cdot \int t \cdot e^2(t) \cdot dt + (1 - e^{-\beta}) \cdot (OS + Ess) + e^{-\beta} \cdot (t_s - t_r)$
[7, 14]	$f = (1 - e^{-\beta}) \cdot (OS + Ess) + e^{-\beta} \cdot (t_s - t_r)$
[9]	$f = w_1 \cdot OS + w_2 \cdot t_r + w_3 \cdot t_s + w_4 \cdot Ess$
[4, 6, 10]	$f = \int e^2(t) \cdot dt$
[11]	$f = \frac{e^{-\beta} \cdot t_s}{(1 - e^{-\beta}) \cdot (1 - t_r)} + e^{-\beta} \cdot OS + Ess$
[8, 10, 12]	$f = \int t \cdot e^2(t) \cdot dt$
[13, 16]	$f = \int t \cdot  e(t)  \cdot dt + w \cdot OS$
[5]	$f = w_1 \cdot \int t \cdot  e(t)  \cdot dt + w_2 \cdot N_{\varphi} + \frac{w_3}{S_r}$
[15]	$f = (w_1 \cdot OS)^2 + w_2 \cdot t_s^2 + \frac{w_3}{(\max_{\Delta v})^2}$
[10]	$f = \int t \cdot  e(t)  \cdot dt$
[10]	$f = \int  e(t)  \cdot dt$

U prethodnoj tabeli, pojedine oznake imaju sljedeća značenja:  $\mu$ ,  $w$  i  $\beta$  su težinski koeficijenti,  $t$  predstavlja vrijeme,  $e(t)$  je signal greške tj. razlike između referentnog napona i napona na izlazu generatora,  $OS$  je preskok,  $E_{ss}$  je greška u stacionarnom stanju,  $t_r$  je vrijeme uspona,  $t_s$  je vrijeme smirenja,  $max_{dv}$  predstavlja maksimalnu vrijednost prvog izvoda signala napona generatora,  $N_p$  je broj kompleksnih polova izračunat iz karakteristične jednačine sistema, dok je  $S$ , suma faktora prigušenja svih kompleksnih polova.

U sklopu istraživanja u okviru ove doktorske disertacije, a čiji su rezultati predstavljeni u [48] i [50], za optimizaciju parametara idealnog PID regulatora predložena je nova kriterijumska funkcija, koja predstavlja modifikaciju kriterijumske funkcije predložene u [14]. Modifikovana kriterijumska funkcija korišćena u ovoj disertaciji data je sljedećom relacijom:

$$f = (1 - e^{-\beta}) \cdot \left( \frac{OS}{\alpha} + E_{ss} \right) + e^{-\beta} \cdot (t_s - t_r), \quad (3.1)$$

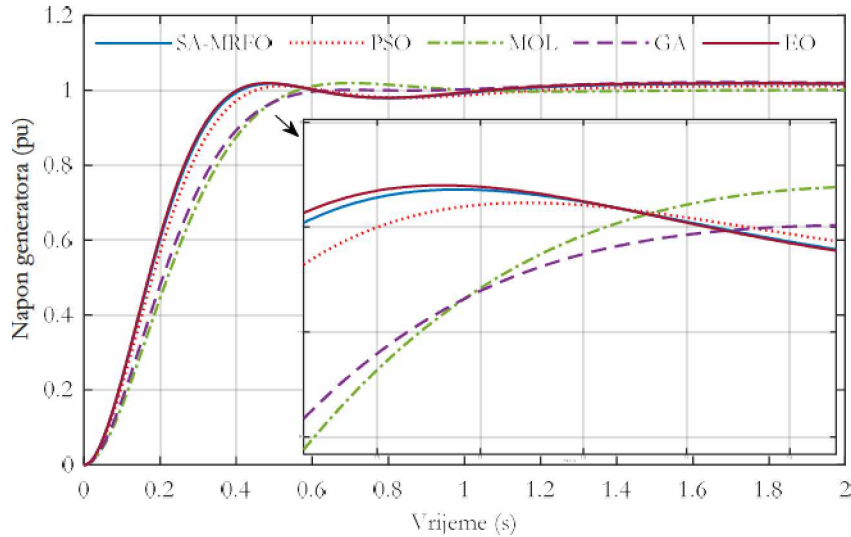
pri čemu parametar  $\alpha$  ima funkciju da obezbijedi adekvatan balans između preskoka i brzine odziva, tj. vremena uspona i smirenja. Nakon brojnih testiranja i analize utvrđeno je da su optimalne vrijednosti  $\alpha=90$  i  $\beta=1$ . Za optimizaciju parametara idealnog PID regulatora u [48] je predložena primjena standardnog EO algoritma, a u [50] hibridnog SA-MRFO algoritma. Kod oba korišćena algoritma uzeto je da je maksimalni broj iteracija 100, a veličina populacije 30. Donja granica za sva tri parametra idealnog PID regulatora je 0.1, dok je gornja granica 1. Optimalne vrijednosti parametara PID regulatora dobijene primjenom oba pomenuta algoritma, kao i odgovarajuće vrijednosti kriterijumske funkcije, date su u Tabeli 3.1.2.

**Tabela 3.1.2** Optimalni parametri idealnog PID regulatora i dobijene vrijednosti kriterijumske funkcije

Algoritam	$K_p$	$K_i$	$K_d$	$f$
EO	0.6829	0.6321	0.2716	0.0718
SA-MRFO	0.6778	0.3802	0.2663	0.0579

U cilju sprovođenja komparativne analize sa radovima koji se bave optimizacijom parametara idealnog PID regulatora iste strukture sistema za regulaciju napona, preuzeti su rezultati dobijeni primjenom PSO algoritma [14], MOL algoritma [10] i genetičkog algoritma (GA) [9]. Radi pojašnjenja, za svrhu poređenja nisu sprovedene simulacije korišćenjem pomenutih algoritama, već su iz navedenih radova preuzete optimalne vrijednosti parametara idealnog PID regulatora.

Kako bi se izvršilo poređenje idealnog PID regulatora čiji su parametri optimizovani pristupima koji su predloženi u ovoj disertaciji sa drugim pomenutim algoritmima iz literature, najprije su na slici 3.1.2 prikazani step odzivi sistema za regulaciju pobude za sve pomenute slučajeve.



Slika 3.1.2 Poređenje step odziva za različite idealne PID regulatore

Takođe, karakteristične veličine prelaznog procesa, za step odzive koji su prikazani na prethodnoj slici, date su u Tabeli 3.1.3.

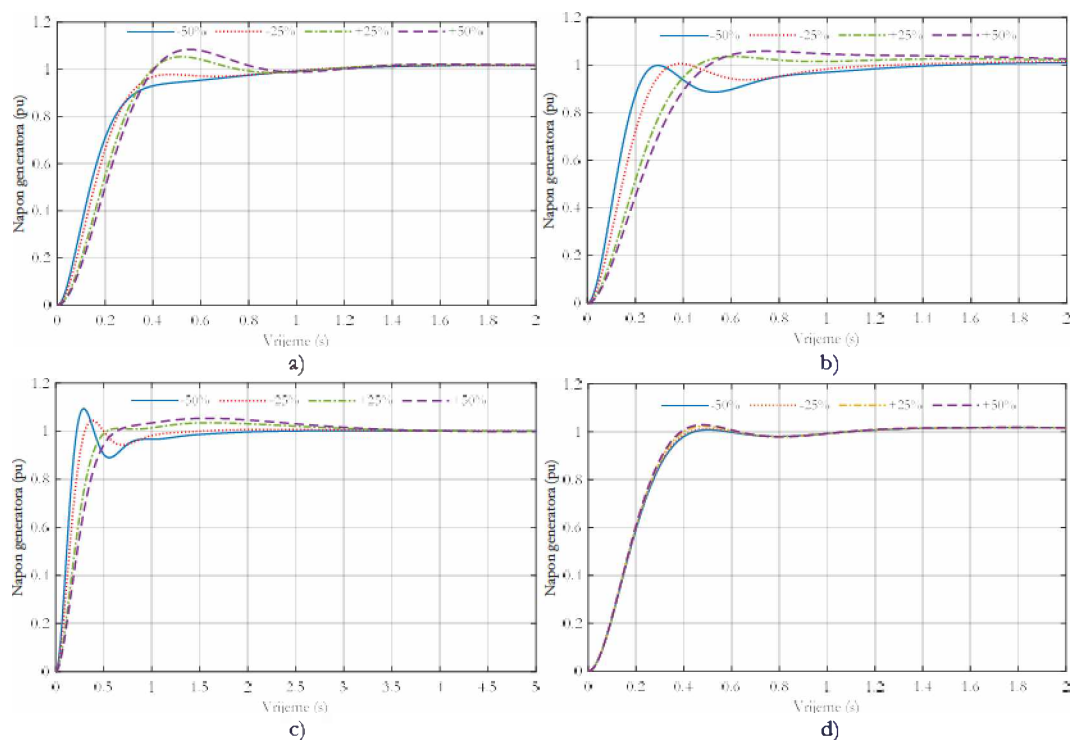
Tabela 3.1.3 Poređenje karakterističnih veličina prelaznog procesa za različite idealne PID regulatore

Algoritam	$t_r$ (s)	$t_s$ (s)	OS (%)
SA-MRFO	0.254	0.382	1.79
EO	0.250	0.373	1.98
PSO [14]	0.271	0.411	1.16
MOL [10]	0.343	0.515	1.95
GA [9]	0.334	1.98	2.15

Na osnovu prethodno prikazanih rezultata, evidentno je da proces optimalnog dizajna idealnog PID regulatora primjenom EO i SA-MRFO algoritma i predložene kriterijumske funkcije poboljšava kvalitet step odziva u odnosu na slučajeve kada se koriste idealni PID regulatori sa parametrima koji su određeni primjenom drugih algoritama predstavljenih u [9, 10, 14]. Preciznije, optimizovani parametri idealnog PID regulatora omogućavaju postizanje bržeg odziva (tj. manjeg vremena uspona i smirenja), dok je preskok i dalje očuvan na izuzetno niskoj vrijednosti (između 1 i 2%).

Performanse idealnog PID regulatora, čiji su parametri određeni novim SA-MRFO algoritmom, moraju biti ispitane i u slučaju uslova u sistemu koji odstupaju od nominalnih uslova. Preciznije, neophodno je sprovesti analizu robusnosti u slučaju promjene parametara sistema, kao i analizu u slučaju prisustva poremećaja u sistemu.

Analiza robusnosti sistema sa idealnim PID regulatorom, čiji su parametri optimizovani predloženim SA-MRFO algoritmom, sprovedena je za slučajeve kada parametri sistema ( $T_A$ ,  $T_E$ ,  $T_G$  i  $T_S$ ) odstupaju od nominalnih vrijednosti. U tom cilju, na slici 3.1.3 prikazani su step odzivi sistema kada prethodno pomenute vremenske konstantne uzimaju vrijednosti  $\pm 25\%$  i  $\pm 50\%$  od nominalne vrijednosti.



Slika 3.1.3 Step odzivi sistema za regulaciju pobude u slučaju varijacije parametra a)  $T_A$  b)  $T_E$  c)  $T_G$  d)  $T_S$

Nakon grafičkog prikaza step odziva, u Tabeli 3.1.4 date su karakteristične veličine prelaznog procesa step odziva za svaki od razmatranih slučajeva prilikom analize robusnosti.

Tabela 3.1.4 Karakteristične veličine prelaznog procesa step odziva prilikom analize robusnosti

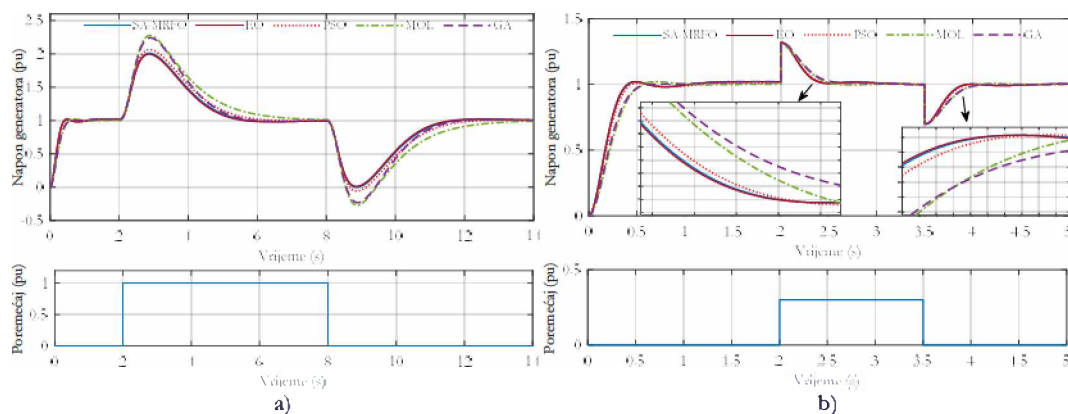
Parametar	Varijacija (%)	$t_r$ (s)	$t_s$ (s)	OS (%)
$T_A$	-50	0.2824	0.8512	1.6919
	-25	0.2549	0.8398	1.7442
	+25	0.2609	0.6764	5.3114
	+50	0.2690	1.8037	8.3913



$T_E$	-50	0.1665	1.1391	1.1137
	-25	0.2122	0.9699	1.3629
	+25	0.2932	2.0922	3.5740
	+50	0.3292	2.2381	5.8169
$T_C$	-50	0.1450	1.3292	9.3365
	-25	0.1984	0.9857	4.3950
	+25	0.3121	2.5294	3.4753
	+50	0.3708	2.8362	5.3403
$T_S$	-50	0.2628	0.3991	1.7907
	-25	0.2587	0.3895	1.7941
	+25	0.2509	0.8315	2.3344
	+50	0.2470	0.8494	2.8962

Prethodno sprovedena analiza robusnosti ukazuje na to da je sistem za automatsku regulaciju napona sa idealnim PID regulatorom, čiji su parametri optimizovani korišćenjem predloženog hibridnog SA-MRFO algoritma, robusan na varijacije parametara sistema, odnosno vremenskih konstanti pojedinih komponenti. U svim razmatranim slučajevima, sistem ostaje stabilan, uz minimalne vrijednosti preskoka, vremena uspona i vremena smirenja.

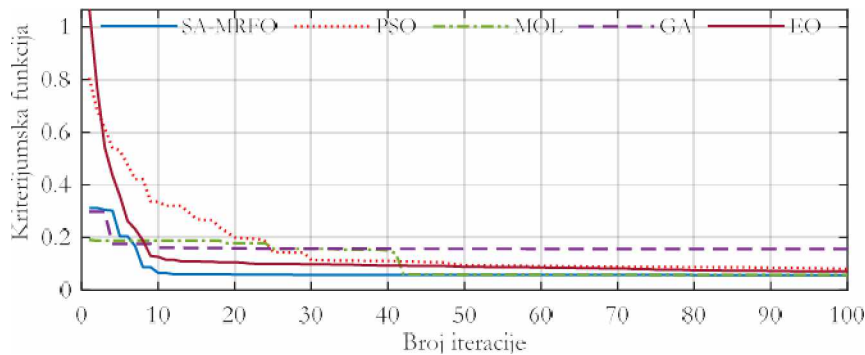
Uticao poremećaja na performanse sistema za regulaciju napona obuhvata uvođenje dvije vrste poremećaja – poremećaj na upravljački signal i poremećaj opterećenja generatora, shodno slici 1.6.1. Poremećaj na upravljački signal modelovan je kao step signal amplitude 1 pu koji traje u intervalu od  $t=2$  s do  $t=8$  s, dok je poremećaj opterećenja takođe modelovan kao step signal amplitude 0.3, koji počinje u trenutku  $t=2$  s i traje do trenutka  $t=3.5$  s. Step odzivi sistema za regulaciju napona sa idealnim PID regulatorom, u slučaju opisanih poremećaja, prikazani su na slici 3.1.4.



Slika 3.1.4 Step odzivi sistema za regulaciju napona u slučaju a) poremećaja na upravljački signal b) poremećaja opterećenja generatora

Prethodno prikazani grafici, za obje vrste poremećaja, ukazuju na to da će u svim razmatranim slučajevima sistem za regulaciju napona ostati stabilan i biti u mogućnosti da otkloni odgovarajući poremećaj. Međutim, najmanji preskok i najbrže otklanjanje poremećaja omogućeno je kada se koristi pristup predložen u ovoj disertaciji, tj. kada se primijene parametri određeni novom kriterijumskom funkcijom i EO i SA-MRFO algoritmima.

U cilju demonstracije superiornosti predloženog hibridnog SA-MRFO algoritma, sprovedena je komparativna analiza sa već pomenutim EO, PSO, MOL i GA algoritmima. Ovi metaheuristički algoritmi su međusobno upoređeni posmatrajući konvergenzijske karakteristike tokom optimizacionog procesa, a koje predstavljaju vrijednost kriterijumske funkcije nakon svake iteracije algoritma. Kako bi poređenje bilo validno, svi algoritmi su testirani pod istim uslovima – veličina populacije je podešena na 30, maksimalni broj iteracija je 100, a kriterijumska funkcija je zajednička za sve algoritma i data je relacijom (3.1). Konvergenzijske krive za sve pomenute algoritme prikazane su na slici 3.1.5.



Slika 3.1.5 Konvergenzijske krive algoritama prilikom optimizacije parametara idealnog PID regulatora

Sa prethodno prikazanog grafika evidentno je da je najbrža konvergencija ka optimalnom rješenju ostvarena u slučaju primjene predloženog SA-MRFO algoritma. Na taj način je pokazana superiornost ovakvog algoritma i potvrđena prednost koja se ostvaruje odgovarajućom hibridizacijom dva metaheuristička algoritma.

### 3.1.2 Optimalni dizajn realnog PID regulatora

Optimalni dizajn realnog PID regulatora obuhvata određivanje optimalnih vrijednosti parametara  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  i  $N$ , shodno prenosnoj funkciji koja je data relacijom (1.5). Iako se većina naučnih radova bavi optimizacijom idealnog PID regulatora, u dostupnoj literaturi se može naći i nekoliko radova koji razmatraju optimalni dizajn realnog PID regulatora [17 – 20]. Autori koriste već opisane ACO [17], PSO [20] i TLBO [19] algoritme, kao i algoritam

pretrage pomoću ptica kukavica (*Cuckoo Search* – CS) [18]. Pregled kriterijumskih funkcija koje su korišćene za optimizaciju parametara realnog PID regulatora u pomenutim radovima dat je u Tabeli 3.1.5.

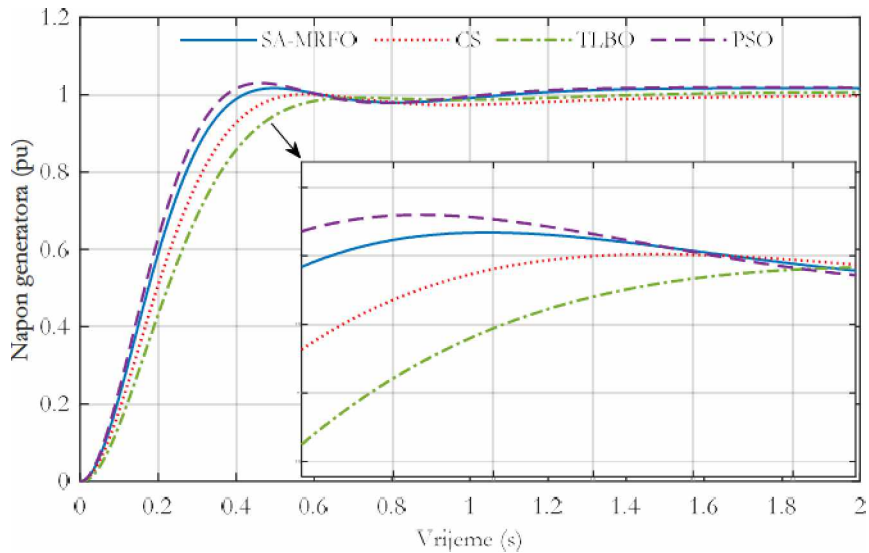
**Tabela 3.1.5** Pregled korišćenih kriterijumskih funkcija za optimizaciju parametara realnog PID regulatora

Referenca	Kriterijumska funkcija $f$
[17, 19]	$f = (1 - e^{-\beta}) \cdot (OS + Ess) + e^{-\beta} \cdot (t_r - t_s)$
[17]	$f = (1 - w) \cdot P_m + \omega_g$
[17]	$f = w_1 \cdot OS + w_2 \cdot t_r + w_3 \cdot t_s + w_4 \cdot Ess + \int (w_5 \cdot  e(t)  + w_6 \cdot V_F^2(t)) \cdot dt + \frac{w_7}{P_m} + \frac{w_8}{G_m}$
[18]	$f = w_1 \cdot \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N t_i \cdot  e_i  + w_2 \cdot \frac{OS}{OS_{max}} + w_3 \cdot \frac{Ess}{Ess_{max}} + w_4 \cdot \frac{t_s}{t_{max}}$
[20]	$f = w_1 \cdot OS + w_2 \cdot t_r + w_3 \cdot t_s$

U prethodnoj tabeli  $P_m$  označava pretek faze,  $G_m$  je pretek pojačanja,  $\omega_g$  je presječna učestanost preteka pojačanja, dok je  $V_F$  odziv napona pobude generatora.

U cilju optimizacije parametara realnog PID regulatora, u istraživanju sprovedenom u okviru ove doktorske disertacije primijenjen je već pomenuti novi hibridni SA-MRFO algoritam. Kriterijumska funkcija je identična kao prilikom optimizacije parametara idealnog PID regulatora i data je relacijom (3.1). Donje i gornje granice parametara  $K_p$ ,  $K_i$  i  $K_d$  su identične kao u prošlom slučaju i iznose 0.1 i 1, respektivno. Takođe, donja granica parametra  $N$  je 200, dok je gornja granica 1000. Podešavanja algoritma su identična kao u slučaju optimizacije parametara idealnog PID regulatora – veličina populacije je 30, dok je maksimalni broj iteracija jednak 100. Primjenom predloženog SA-MRFO algoritma dobijene su sljedeće optimalne vrijednosti parametara realnog PID regulatora:  $K_p=0.6672$ ,  $K_i=0.5938$ ,  $K_d=0.2599$  i  $N=863.2453$ .

U cilju poređenja dobijenih rezultata sa rezultatima iz dostupne literature, odabrani su rezultati koji se dobijaju primjenom CS algoritma u [18], TLBO algoritma u [19] i PSO algoritma u [20]. Grafičko poređenje step odziva sistema za regulaciju napona za različite vrijednosti parametara realnog PID regulatora, dobijenih primjenom predloženog algoritma, kao i TLBO, CS i PSO algoritma, dato je na slici 3.1.6.



Slika 3.1.6 Poređenje step odziva za različite realne PID regulatore

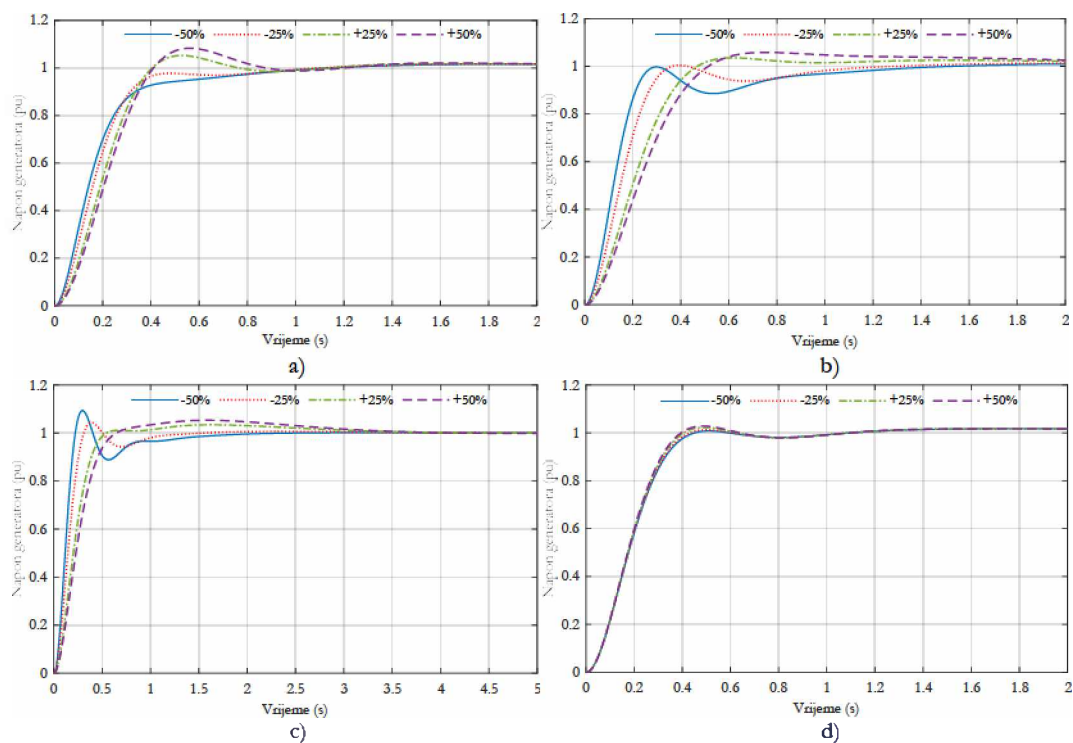
Karakteristične veličine prelaznog procesa (vrijeme uspona, vrijeme smirenja i preskok), za step odzive koji su prikazani na prethodnoj slici, date su u Tabeli 3.1.6.

Tabela 3.1.6 Poređenje karakterističnih veličina prelaznog procesa za različite realne PID regulatore

Algoritam	$t_r$ (s)	$t_s$ (s)	OS (%)
SA-MRFO	0.2576	0.3871	1.7283
CS [18]	0.3055	1.1743	0.1216
TLBO [19]	0.3571	0.5833	0.6166
PSO [20]	0.2378	0.8303	2.9905

Prethodno prikazani rezultati, kako grafičkim tako i tabelarnim poređenjem, ukazuju na to da se optimalni balans između brzog odziva i minimalnog preskoka postiže korišćenjem realnog PID regulatora čiji su parametri određeni predloženim SA-MRFO algoritmom.

Naredni korak je ispitivanje performansi realnog PID regulatora, čiji parametri su određeni pomoću SA-MRFO algoritma, u slučajevima kada uslovi u sistemu odstupaju od nominalnih. U tom cilju, na slici 3.1.7 prikazani su step odzivi sistema za regulaciju napona u slučajevima kada parametri  $T_A$ ,  $T_E$ ,  $T_G$  i  $T_S$  variraju u odnosu na njihove nominalne vrijednosti.



Slika 3.1.7 Step odzivi sistema za regulaciju napona u slučaju varijacije parametra a)  $T_A$  b)  $T_E$  c)  $T_C$  d)  $T_S$

Takođe, karakteristične veličine prelaznog procesa za svaki od step odziva sa prethodnih grafika prikazane su u Tabeli 3.1.7.

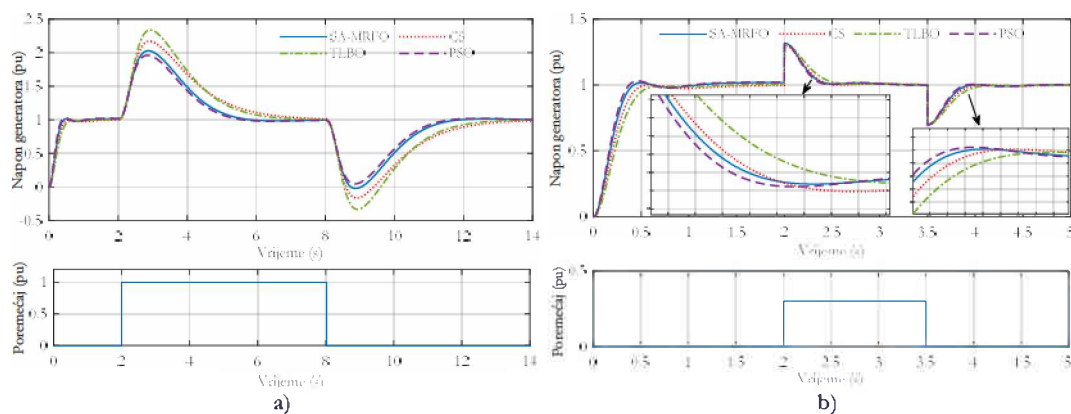
Tabela 3.1.7 Karakteristične veličine prelaznog procesa step odziva prilikom analize robusnosti

Parametar	Varijacija (%)	$t_r$ (s)	$t_s$ (s)	OS (%)
$T_A$	-50	0.2874	0.8632	1.6255
	-25	0.2586	0.8511	1.6766
	+25	0.2645	0.6839	5.2299
	+50	0.2724	1.7641	8.2785
$T_E$	-50	0.1685	1.1570	1.0615
	-25	0.2153	0.9840	1.3034
	+25	0.2973	2.0659	3.5395
	+50	0.3337	2.2284	5.8276
$T_C$	-50	0.1466	1.3566	9.3283
	-25	0.201	1.0021	4.3114
	+25	0.3168	2.5269	3.4093
	+50	0.3765	2.8476	5.2868
$T_S$	-50	0.2665	0.4062	1.7221
	-25	0.2622	0.3963	1.7254
	+25	0.2544	0.8413	2.2334
	+50	0.2505	0.8595	2.7800

Na osnovu prethodno sprovedene analize robusnosti, zaključuje se da, u svim razmatranim slučajevima, sistem ostaje stabilan, kao i da preskok, vrijeme uspona i vrijeme smirenja imaju relativno male vrijednosti. Sumarno, može se zaključiti da je sistem za regulaciju napona, koji sadrži realni PID regulatorom sa parametrima optimizovanim pomoću SA-MRFO algoritma, robusstan na promjene parametara sistema.

Prethodno sprovedena analiza robusnosti ukazuje na to da je sistem za automatsku regulaciju napona sa idealnim PID regulatorom, čiji su parametri optimizovani korišćenjem predloženog hibridnog SA-MRFO algoritma robusstan na varijacije parametara sistema, odnosno vremenskih konstanti pojedinih komponenti. U svim razmatranim slučajevima, sistem ostaje stabilan, uz minimalne vrijednosti preskoka, vremena uspona i vremena smirenja.

Nakon analize robusnosti, odrađena je i analiza sposobnosti sistema za regulaciju napona sa realnim PID regulatorom, čiji parametri su određeni primjenom prethodno pomenutih metaheurističkih algoritama, da suzbije različite vrste poremećaja. Analiza uticaja poremećaja sprovedena je najprije za poremećaj na upravljački signal, a zatim za poremećaj opterećenja generatora. Poremećaj na upravljački signal modelovan je kao step signal amplitude 1 pu koji traje u intervalu od  $t=2$  s do  $t=8$  s, dok je poremećaj opterećenja generatora modelovan kao step signal amplitude 0.3, koji počinje u trenutku  $t=2$  s i traje do trenutka  $t=3.5$  s. Poređenje odgovarajućih step odziva dato je na slici 3.1.8.

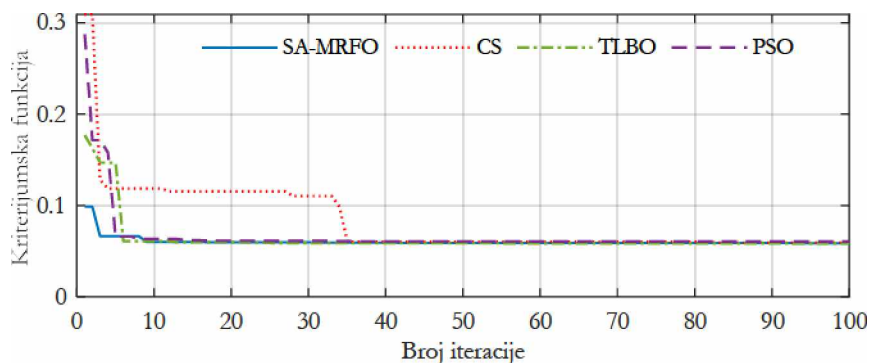


Slika 3.1.8 Step odzivi sistema za regulaciju napona u slučaju a) poremećaja na upravljački signal b) poremećaja opterećenja generatora

Na osnovu prethodno prikazanih rezultata, jasno se zaključuje da će sistem ostati stabilan u oba slučaja, primjenom svakog od razmatranih algoritama. Međutim, primjena realnog PID

regulatora, sa parametrima određenim pomoću predloženog SA-MRFO algoritma, obezbjeđuje optimalni balans između brzine otklanjanja poremećaja i preskoka u prelaznim procesima kada nastaje poremećaj.

Takođe, izvršeno je međusobno poređenje predloženog SA-MRFO algoritma sa ostalim pomenutim algoritmima – CS, TLBO i PSO po pitanju brzine konvergencije. Naime, svi algoritmi su primijenjeni za optimizaciju parametara realnog PID regulatora, pri čemu su, radi validnosti rezultata, parametri algoritma podešeni na iste vrijednosti – veličina populacije je 30, a maksimalni broj iteracija je 100. Takođe, svi razmatrani algoritmi imaju za cilj da minimizuju istu kriterijumsku funkciju, datu relacijom (3.1). Konvergencijske krive za sva 4 algoritma date su na slici 3.1.9.



Slika 3.1.9 Konvergencijske krive algoritama prilikom optimizacije parametara realnog PID regulatora

Poređenjem konvergencijskih krivih jasna je prednost predloženog algoritma u odnosu na ostale posmatrane algoritme. Naime, predloženi SA-MRFO algoritam konvergira brže ka optimalnom rješenju od ostala tri algoritma razmatrana za poređenje.

### 3.1.3 Optimalni dizajn FOPID regulatora

Shodno prenosnoj funkciji FOPID regulatora, koja je data relacijom (1.12), jasno je da se ovaj regulator opisuje sa 5 parametara –  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ,  $\lambda$  i  $\mu$ . Stoga, optimalni dizajn FOPID regulatora podrazumijeva određivanje optimalnih vrijednosti prethodno pomenutih parametara tako da sistem sa zatvorenom povratnom spregom zadovolji određene kriterijume [21 – 28]. U radovima koji se bave ovom tematikom, autori primijenjuju različite algoritme za optimizaciju parametara FOPID regulatora – CS algoritam [21], genetički algoritam [22, 25, 27], algoritam multiobjektivne ekstremne optimizacije (*multi – objective extremal optimization* – MOEO) [23], ABC algoritam [24], CAS algoritam [26] i PSO algoritam

[28]. Pregled kriterijumskih funkcija koje su korišćene u dostupnim naučnim radovima koji se bave optimizacijom parametara FOPID regulatora dat je u Tabeli 3.1.8.

**Tabela 3.1.8** Pregled korišćenih kriterijumskih funkcija za optimizaciju parametara FOPID regulatora

Referenca	Kriterijumska funkcija $f$
[21, 26]	$f = (1 - e^{-\beta}) \cdot (OS + Ess) + e^{-\beta} \cdot (t_s - t_r)$
[22]	$f = w_1 \cdot OS + w_2 \cdot t_s + w_3 \cdot Ess + w_4 \cdot \int  e(t)  \cdot dt + w_5 \cdot \int u^2(t) \cdot dt$
[23]	$f_1 = \int  e(t)  \cdot dt, f_2 = 1000 \cdot  Ess , f_3 = t_s$
[24]	$f = \int  e(t)  \cdot dt$
[25]	$f_1 = \omega_g, f_2 = P_m$
[27]	$f_1 = \int t \cdot e^2(t) \cdot dt, f_2 = \int \Delta u^2(t) \cdot dt, f_3 = \int t \cdot e_{load}^2(t) \cdot dt$
[28]	$f = w_1 \cdot OS + w_2 \cdot t_r + w_3 \cdot t_s + w_4 \cdot Ess + \int (w_5 \cdot  e(t)  + w_6 \cdot V_f^2(t)) \cdot dt + \frac{w_7}{P_m} + \frac{w_8}{G_m}$

U prikazanoj tabeli, osim već uvedenih oznaka,  $u$  predstavlja upravljački signal (izlazni signal iz regulatora), dok je  $e_{load}$  signal greške kada u sistemu postoji poremećaj opterećenja.

U istraživanjima koja su sprovedena u okviru ove disertacije i predstavljena u [49] i [50], predloženi su novi hibridni C-YSGA i SA-MRFO metaheuristički algoritmi za optimizaciju parametara FOPID regulatora kod sistema za regulaciju napona. Detalji o korišćenim hibridnim metaheurističkim algoritmima dati su u prethodnom poglavlju ove disertacije. Prilikom primjene optimizacionih algoritama, najprije je neophodno definisati kriterijumsku funkciju. Za optimizaciju parametara FOPID regulatora, definisana je multi-objektivna kriterijumska funkcija koja ima za cilj postizanje što kvalitetnijeg prelaznog procesa step odziva sistema za regulaciju napona. Preciznije, kriterijumska funkcija teži da minimizuje integral proizvoda vremena i apsolutne vrijednosti greške, preskok, apsolutnu vrijednost greške u ustaljenom stanju i vrijeme smirenja. Matematička formulacija predložene kriterijumske funkcije data je narednom relacijom:

$$f = w_1 \cdot \int t \cdot |e(t)| \cdot dt + w_2 \cdot OS + w_3 \cdot |Ess| + w_4 \cdot t_s, \quad (3.2)$$

gdje su  $w_1 - w_5$  težinski koeficijenti, koji imaju sljedeće vrijednosti:  $w_1=1$ ,  $w_2=0.02$ ,  $w_3=1$  i  $w_4=5$ . Podešavanja za oba predložena metaheuristička algoritma su identična – veličina



populacije je 30, a maksimalni broj iteracija je 50. Ograničenja za optimizacione varijable, tj. parametre regulatora, data su u Tabeli 3.1.9.

**Tabela 3.1.9** Granice prilikom optimizacije parametara FOPID regulatora

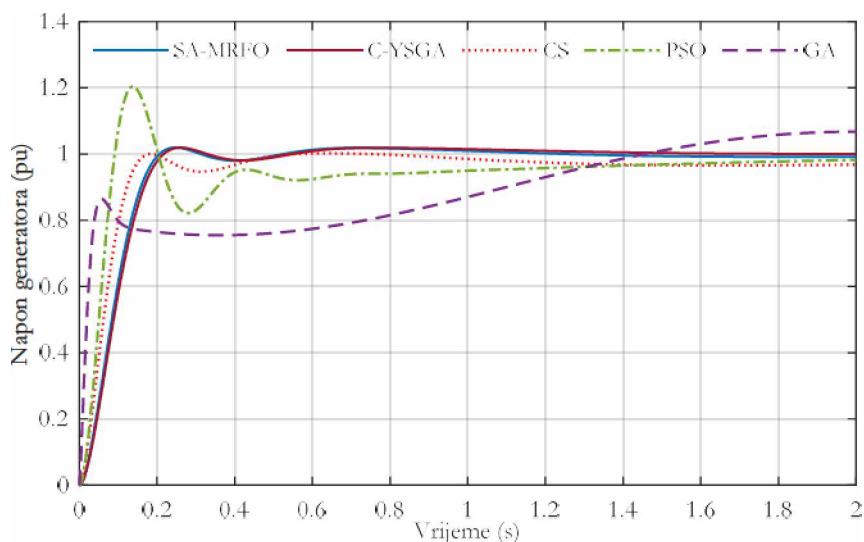
Parametar	Donja granica	Gornja granica
$K_p$	1	2
$K_i$	0.1	1
$K_d$	0.1	0.4
$\lambda$	1	2
$\mu$	1	2

Nakon završenog procesa optimizacije parametara FOPID regulatora primjenom predloženih C-YSGA i SA-MRFO algoritama, dobijene optimalne vrijednosti parametara i odgovarajuće vrijednosti kriterijumske funkcije prikazane su u Tabeli 3.1.10.

**Tabela 3.1.10** Optimalni parametri FOPID regulatora

Algoritam	$K_p$	$K_i$	$K_d$	$\lambda$	$\mu$	$f$
SA-MRFO	1.8931	0.8699	0.3595	1.0408	1.278	1.0806
C-YSGA	1.7776	0.9463	0.3525	1.1274	1.2607	1.0856

Kako bi se izvršilo adekvatno poređenje predloženog pristupa optimalnog dizajna FOPID regulatora sa drugim metodama iz literature, iz pomenutih radova koji se bave optimizacijom parametara FOPID regulatora odabrana su sljedeća tri rada – [21], [22] i [25]. U [21] korišćen je CS algoritam, PSO algoritam je primijenjen u [22], dok je genetički algoritam korišćen za optimizaciju u [25]. Iz pomenutih radova preuzeti su rezultati, tj. dobijene optimalne vrijednosti parametara FOPID regulatora. Korišćenjem tih parametara, simulacionom analizom dobijeni su odgovarajući step odzivi sistema za regulaciju napona. Takođe, step odzivi sistema za regulaciju napona sa FOPID regulatorom, korišćenjem parametara iz Tabele 3.1.10, dobijeni su odgovarajućim simulacijama. Grafičko poređenje prethodno dobijenih step odziva sistema za regulaciju napona dato je na slici 3.1.10. Nakon grafičkog poređenja, kako bi se preciznije izvršila komparativna analiza, karakteristične veličine prelaznog procesa step odziva za svaki od prethodno razmatranih slučajeva date su u Tabeli 3.1.11.



Slika 3.1.10 Poređenje step odziva za različite FOPID regulatore

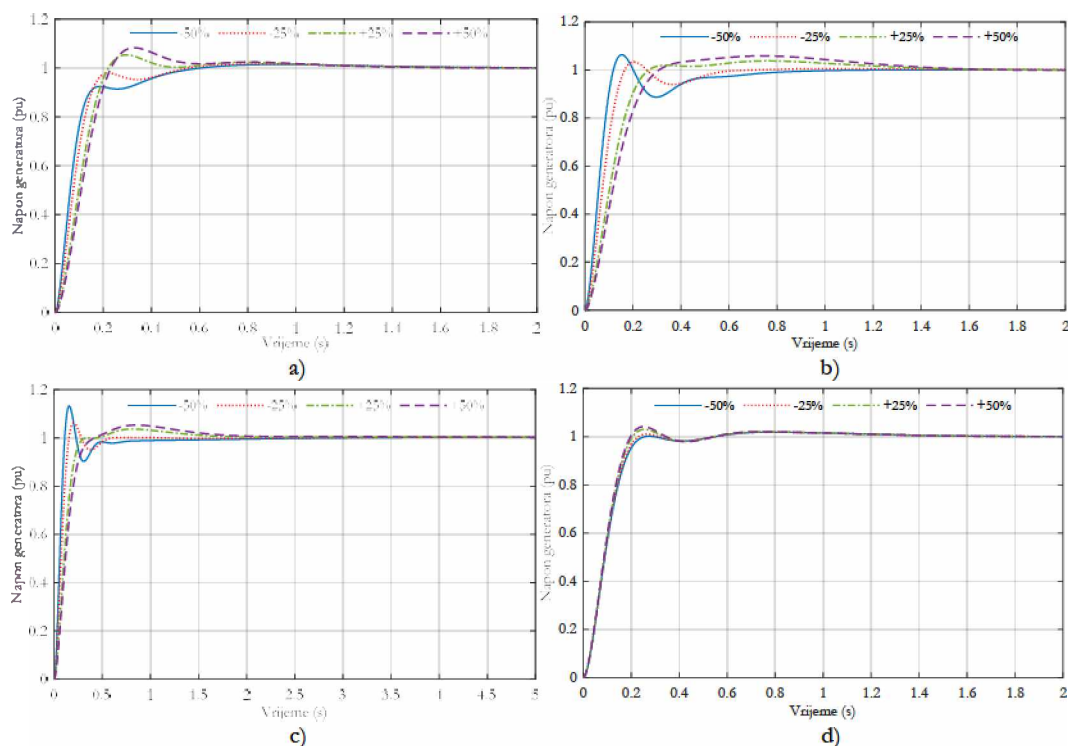
Tabela 3.1.11 Poređenje karakterističnih veličina prelaznog procesa za različite FOPID regulatore

Algoritam	$t_r$ (s)	$t_s$ (s)	OS (%)
SA-MRFO	0.1309	0.1909	1.9765
C-YSGA	0.1375	0.2010	1.856
CS [21]	0.0989	0.7203	2.1341
PSO [22]	0.0626	1.8531	20.5618
GA [25]	0.0479	9.0029	11.6334

Na osnovu prethodno prikazanih grafičkih i numeričkih rezultata, evidentno je da se najkvalitetniji step odziv dobija kada se kod sistema za regulaciju napona primijeni FOPID regulator sa parametrima optimizovanim pomoću predloženih SA-MRFO i C-YSGA algoritama. Iako je vrijeme uspona neznatno manje kada se koriste ostala tri algoritma za poređenje, ostala dva parametra – vrijeme smirenja i preskok imaju značajno veće vrijednosti. Preciznije, uočljivo je da se primjenom genetičkog algoritma dobija vrijeme smirenja od 9 s i preskok od 11%. To znači da, za vrijeme simulacije od 2 s, step odziv sistema neće uspjeti da dostigne svoju referentnu vrijednost, odnosno 1 pu. Takođe, primjena PSO algoritma dovodi do velikog preskoka od 20%, što znači da će napon na izlazu generatora doći do vrijednosti od 1.2 pu u prelaznom procesu. Nasuprot tome, primjena parametara FOPID regulatora određenih primjenom predloženih algoritama dovodi do brzog odziva, veoma malog vremena smirenja i vrlo malog preskoka, koji iznosi nešto manje od 2%.

U nastavku prikazana je analiza robusnosti sistema za regulaciju napona sa FOPID regulatorom, za slučajeve kada dolazi do promjene parametara sistema, tj. vremenskih konstantni pojedinih komponenti. Analiza je izvršena za slučajeve kada se primijenjuju

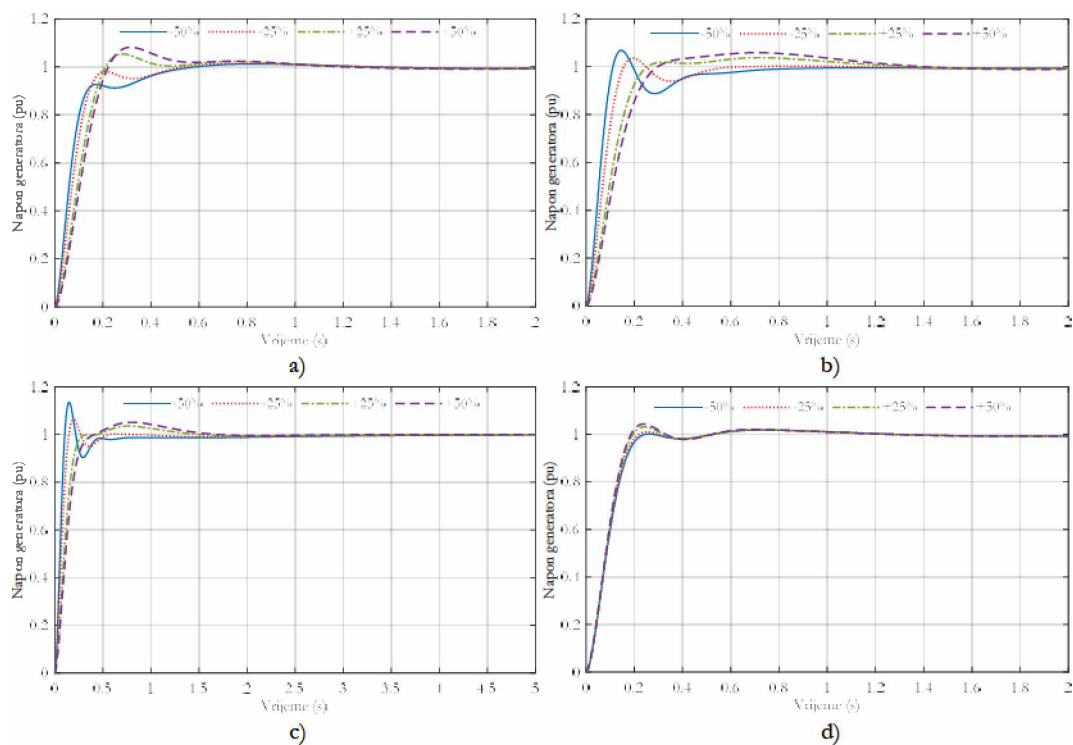
parametri dobijeni pomoću predloženih SA-MRFO i C-YSGA algoritama. Odgovarajući step odzivi dati su na slikama 3.1.11 i 3.1.12, dok su karakteristične veličine prelaznog procesa step odziva za sve razmatrane slučajeve date u Tabelema 3.1.12 i 3.1.13.



Slika 3.1.11 Step odzivi sistema za regulaciju napona sa FOPID regulatorom (korišćenjem C-YSGA algoritma) u slučaju varijacije parametra a)  $T_A$  b)  $T_E$  c)  $T_G$  d)  $T_S$

Tabela 3.1.12 Karakteristične veličine prelaznog procesa step odziva pri likom analize robusnosti (C-YSGA algoritam)

Parametar	Varijacija (%)	$t_r$ (s)	$t_s$ (s)	OS (%)
$T_A$	-50	0.1685	0.4814	1.4095
	-25	0.1583	0.4668	1.6056
	+25	0.1477	0.9067	5.3566
	+50	0.158	0.9493	8.2584
$T_E$	-50	0.1052	0.6646	6.3444
	-25	0.1424	0.521	3.2505
	+25	0.1652	1.141	3.796
	+50	0.1926	1.275	5.8771
$T_G$	-50	0.0832	0.6271	7.374
	-25	0.1367	0.4907	6.0111
	+25	0.1727	0.2673	0
	+50	0.2112	1.5152	5.3053
$T_S$	-50	0.1659	0.2556	1.8826
	-25	0.1411	0.2091	1.9181
	+25	0.1334	0.7754	3.029
	+50	0.1301	0.801	4.1668



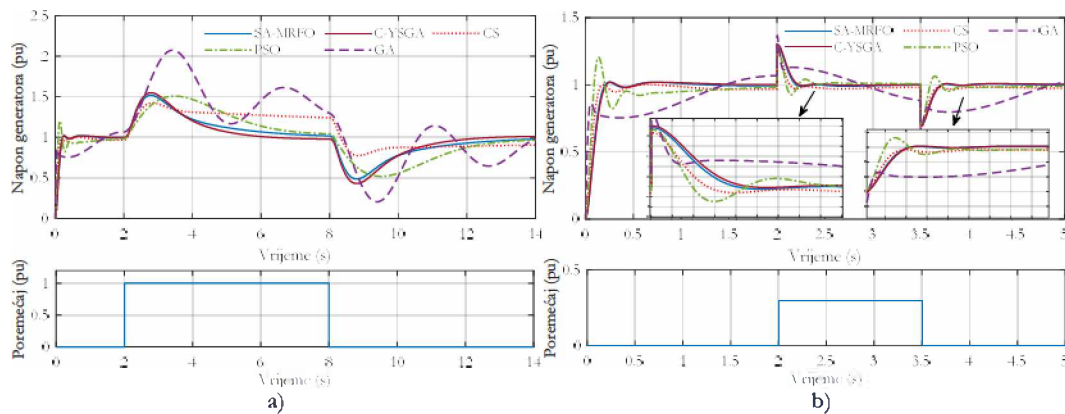
Slika 3.1.12 Step odzivi sistema za regulaciju napona sa FOPID regulatorom (konščenjem SA-MRFO algoritma) u slučaju varijacije parametra a)  $T_A$  b)  $T_E$  c)  $T_C$  d)  $T_S$

Tabela 3.1.13 Karakteristične veličine prelaznog procesa step odziva prilikom analize robusnosti (SA-MRFO algoritam)

Parametar	Varijacija (%)	$t_r$ (s)	$t_s$ (s)	OS (%)
$T_A$	-50	0.1537	0.4664	1.2013
	-25	0.1466	0.4505	1.4475
	+25	0.1415	0.8305	5.3236
	+50	0.1519	0.8678	8.1757
$T_E$	-50	0.0956	0.6449	3.1452
	-25	0.1326	0.4977	3.0660
	+25	0.1581	1.0242	3.7745
	+50	0.1848	1.1492	5.8548
$T_C$	-50	0.0783	0.4394	9.3831
	-25	0.1278	0.4735	5.7077
	+25	0.1650	0.2554	0.000
	+50	0.2022	1.2865	5.1250
$T_S$	-50	0.1392	0.2100	0.1732
	-25	0.1348	0.1995	1.8593
	+25	0.1272	0.4180	3.1257
	+50	0.1239	0.7366	4.3271

Na osnovu prethodno sprovedene analize, jasno je da je sistem za regulaciju napona sa FOPID regulatorom robustan na promjene parametara komponenti samog sistema. Za oba slučaja, kada se primjenjuju parametri FOPID regulatora određeni pomoću predloženih SA-MRFO i C-YSGA algoritama, sistem ostaje stabilan i veoma brzo, uz minimalni preskok, dostiže referentnu vrijednost napona.

Nakon analize odziva sistema na varijacije parametara, predstavljena je i analiza odziva sistema kada djeluju poremećaji. Razmatrane su dvije vrste poremećaja – prvo kada djeluje poremećaj na upravljački signal, a zatim kada postoji poremećaj na opterećenje generatora. Poremećaj na upravljački signal je modelovan step signalom amplitude 1 pu, koji traje između 2. i 8. sekunde, dok je poremećaj na opterećenje predstavljen step signalom amplitude 0.3 pu, koji počinje u trenutku  $t=2$  s i traje do trenutka  $t=3.5$  s. Analiza je sprovedena kada se kod sistema za regulaciju napona koristi FOPID regulator, čiji parametri su određeni pomoću predloženih SA-MRFO i C-YSGA algoritama. Takođe, izvršeno je poređenje sa rezultatima iz prethodno pomenutih naučnih radova, u kojima se koriste CS algoritam [21], PSO algoritam [22] i GA algoritam [25]. Step odzivi sistema za regulaciju napona, za oba tipa poremećaja u sistemu, dati su na slici 3.1.13.

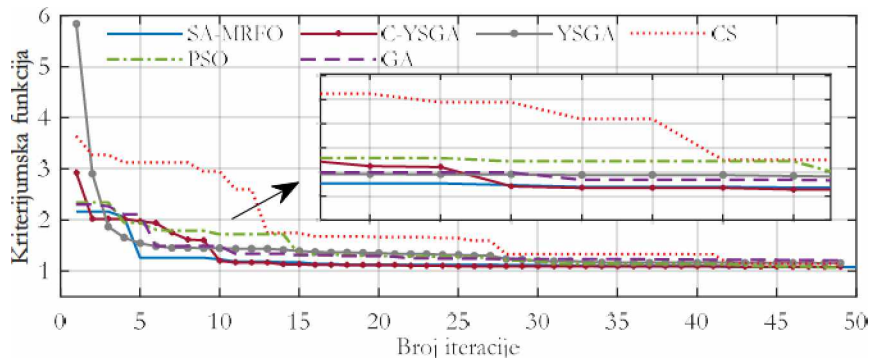


Slika 3.1.13 Step odzivi sistema za regulaciju napona u slučaju a) poremećaja na upravljački signal b) poremećaja opterećenja generatora

Posmatrajući prikazane grafike, jasno je da sistem sa FOPID regulatorom, čiji parametri su određeni pomoću predloženih algoritama, mnogo bolje suzbija poremećaje u odnosu na slučajeve kada se primjenjuju parametri čije su vrijednosti proračunate primjenom drugih algoritama. Primjena parametara FOPID regulatora određenih pomoću algoritama predloženih u ovoj disertaciji dovodi do odziva koji, nakon pojave poremećaja, najbrže

ponovo dostigne referentnu vrijednost napona i to uz minimalni preskok. Takođe, sa prikazanih grafika jasno je da primjena određenih algoritama, CS i GA, ne može da ispuni zadatak otklanjanja poremećaja. Drugim riječima, u posmatranom intervalu trajanja poremećaja, izlazni napon na kraju ne dostiže referentnu vrijednost.

Na kraju, superiornost predloženih SA-MRFO i C-YSGA algoritama u odnosu na YSGA, CS, PSO i GA algoritme pokazana je poređenjem njihovih konvergencijskih karakteristika (slika 3.1.14). Sa prikazane slike jasno je da C-YSGA najbrže konvergira ka optimalnom rješenju, dok predloženi SA-MRFO algoritam za mali broj iteracija postiže skoro optimalnu vrijednost kriterijumske funkcije. Svi pomenuti algoritmi su primijenjeni za optimizaciju parametara FOPID regulatora pod identičnim uslovima, koji su isti kao i u prethodnom dijelu ovog potpoglavlja.



Slika 3.1.14 Konvergencijske krive algoritama prilikom optimizacije parametara FOPID regulatora

### 3.1.4 Optimalni dizajn PIDD<sup>2</sup> regulatora

Optimizacija parametara PID regulatora sa dodatim dvostrukim diferencijalnim dejstvom, tj. PIDD<sup>2</sup> regulatora, demonstrirana je u radovima [4, 30 – 33]. U pomenutim radovima, autori koriste WOA algoritam [4], PSO algoritam [30], Runge-Kuta (RUN) optimizacioni algoritam [31], poboljšani Aquila optimizacioni algoritam (*enhanced Aquila Optimizer* – enAO) [32], kao i hibridni algoritam HHO-SA (*Harris Hawks Optimizer-Simulated Annealing*) [33]. Pregled korišćenih kriterijumskih funkcija dat je u Tabeli 3.1.14.

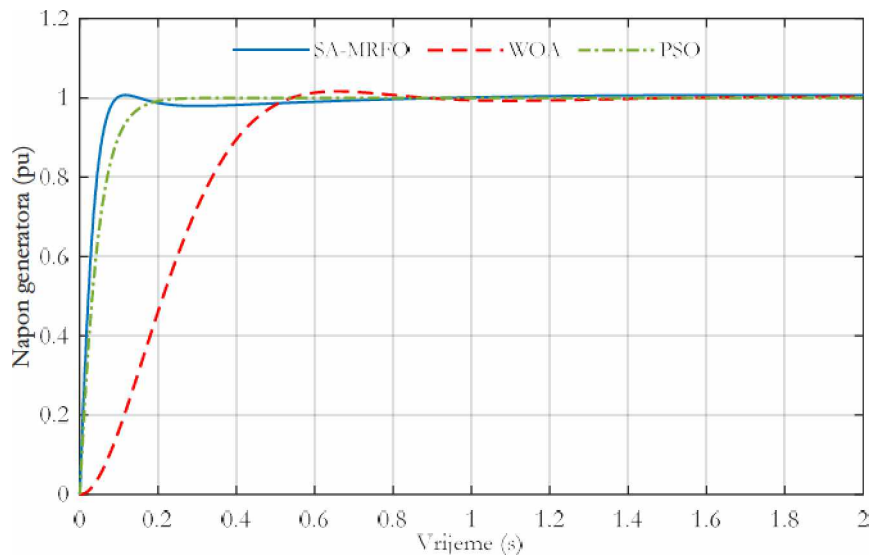
Tabela 3.1.14 Pregled korišćenih kriterijumskih funkcija za optimizaciju parametara PIDD<sup>2</sup> regulatora

Referenca	Kriterijumska funkcija $f$
[4, 31]	$f = \int e^2(t) \cdot dt$
[30]	$f = \int t \cdot  e(t)  \cdot dt$
[33]	$f = (1 - e^{-\beta}) \cdot (OS + Ess) + e^{-\beta} \cdot (t_s - t_r)$

U istraživanju koje je sprovedeno u okviru ove doktorske disertacije, a čiji rezultati su publikovani u [50], parametri PIDD<sup>2</sup> regulatora ( $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  i  $K_{d2}$ ) su optimizovani primjenom hibridnog SA-MRFO algoritma. Prilikom optimizacije korišćena je kriterijumska funkcija data relacijom (3.2). Donja granica za sve parametre iznosi 0.1, dok je gornja granica jednaka 3. Maksimalni broj iteracija SA-MRFO algoritma je 50, dok je veličina populacije 30.

Koristeći prethodno opisana podešavanja SA-MRFO algoritma, prilikom optimizacije parametara PIDD<sup>2</sup> regulatora dobijeni su sljedeći rezultati:  $K_p=2.9943$ ,  $K_i=2.9787$ ,  $K_d=1.5882$  i  $K_{d2}=0.102$ .

U cilju poređenja, iz dostupne literature koja se bavi optimizacijom parametara PIDD<sup>2</sup> regulatora, izdvojeni su rezultati iz radova [4] i [30]. U [4] koristi se WOA algoritam, dok je PSO algoritam primijenjen u [30]. Koristeći rezultate preuzete iz pomenutih radova, simulirani su step odzivi sistema za regulaciju napona sa PIDD<sup>2</sup> regulatorom. Takođe, na istom grafiku dat je step odziv sistema sa PIDD<sup>2</sup> regulatorom kada se koriste parametri dobijeni pomoću predloženog SA-MRFO algoritma. Grafičko poređenje step odziva dato je na slici 3.1.15, dok su karakteristične veličine prelaznog procesa date u Tabeli 3.1.15.



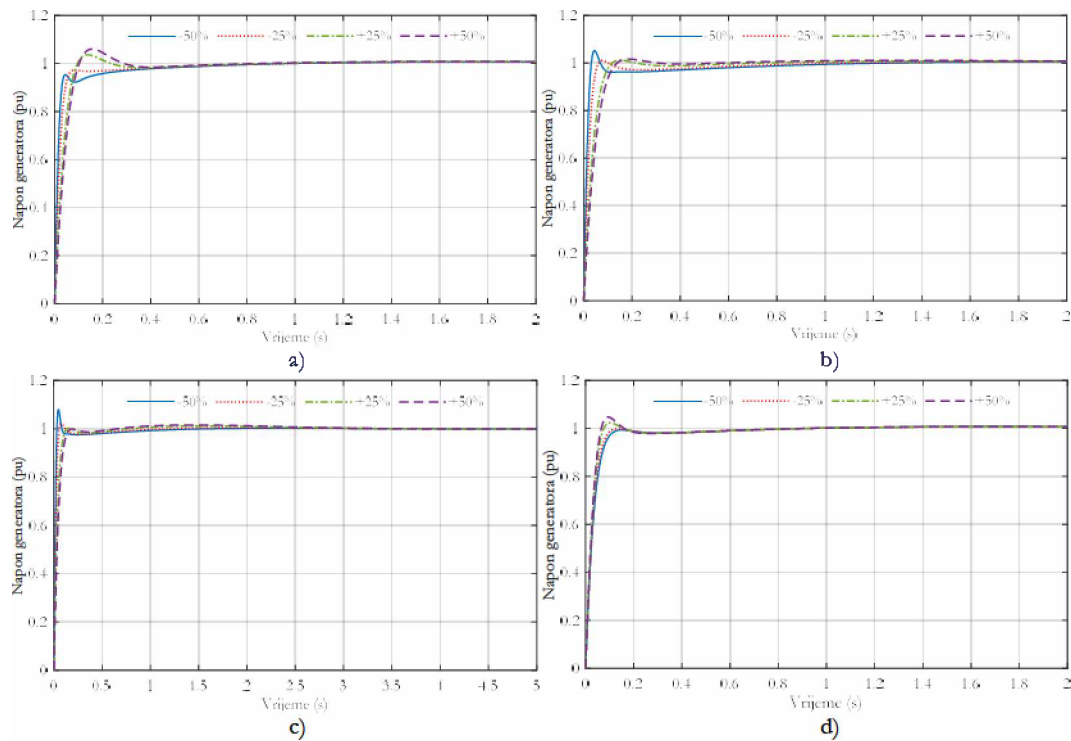
Slika 3.1.15 Poređenje step odziva za različite PIDD<sup>2</sup> regulatore

Tabela 3.1.15 Poređenje karakterističnih veličina prelaznog procesa za različite PIDD<sup>2</sup> regulatore

Algoritam	$t_r$ (s)	$t_s$ (s)	OS (%)
SA-MRFO	0.0535	0.0798	0.7562
WOA [4]	0.3277	0.4954	1.6483
PSO [30]	0.0929	0.1635	0.0026

Međusobnim poređenjem prethodno prikazanih step odziva može se zaključiti da se najbrži odziv, sa najmanjim vremenom smirenja, dobija primjenom PIDD<sup>2</sup> regulatora sa parametrima određenim pomoću SA-MRFO algoritma. Takođe, za sva tri razmatrana slučaja preskok ima veoma male vrijednosti (ispod 1% kada se koristi hibridni algoritam predložen u ovoj disertaciji).

Što se tiče ponašanja sistema u uslovima koji odstupaju od nominalnih, najprije je izvršena analiza robusnosti sistema na promjenu parametara, na identičan način kao u prethodnim potpoglavljima. Na slici 3.1.16 prikazani su step odzivi sistema za regulaciju napona sa PIDD<sup>2</sup> regulatorom, kada se koriste parametri dobijeni pomoću SA-MRFO algoritma, za razne vrijednosti vremenskih konstantni komponenti sistema za regulaciju napona. Nakon toga, u Tabeli 3.1.16 date su vrijednosti karakterističnih veličina prelaznog procesa step odziva, za sve razmatrane slučajeve prilikom analize robusnosti.



Slika 3.1.16 Step odzivi sistema za regulaciju napona sa PIDD<sup>2</sup> regulatorom u slučaju varijacije parametra a)  $T_A$  b)  $T_E$  c)  $T_C$  d)  $T_S$

Tabela 3.1.16 Karakteristične veličine prelaznog procesa step odziva prilikom analize robusnosti

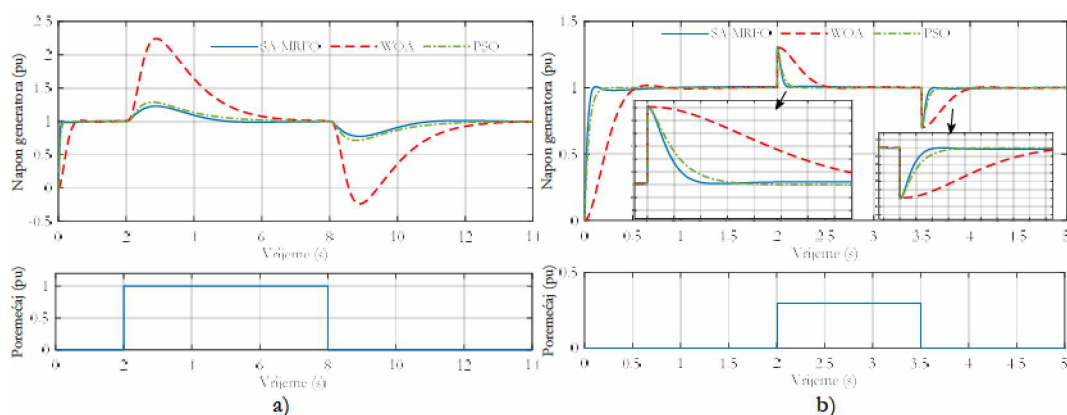
Parametar	Varijacija (%)	$t_r$ (s)	$t_s$ (s)	OS (%)
$T_A$	-50	0.0277	0.4261	0.5216
	-25	0.0422	0.3866	0.3883
	+25	0.0628	0.1874	3.6262



	+50	0.0710	0.2432	6.0381
$T_E$	-50	0.0222	0.5885	5.2642
	-25	0.0375	0.4729	1.0781
	+25	0.0688	0.1018	1.1785
	+50	0.0831	0.1211	1.7012
	-50	0.0215	0.4780	7.9604
$T_C$	-25	0.0367	0.3891	2.2559
	+25	0.0706	0.1083	0.2115
	+50	0.0874	0.1364	0.6077
	-50	0.0659	0.1084	0.0000
$T_S$	-25	0.0595	0.0940	0.0000
	+25	0.0488	0.3175	2.3589
	+50	0.0453	0.3211	4.7336

Posmatranjem prethodno prikazanih grafičkih i tabelarnih rezultata dolazi se do identičnog zaključka – sistem za regulaciju napona sa  $PIDD^2$  regulatorom ostaje stabilan u svim razmatranim slučajevima varijacije parametara sistema. Karakteristične veličine prelaznog procesa, tj. vrijeme uspona, vrijeme smirenja i preskok, imaju veoma male vrijednosti, što je izuzetno poželjno u toku prelaznog procesa.

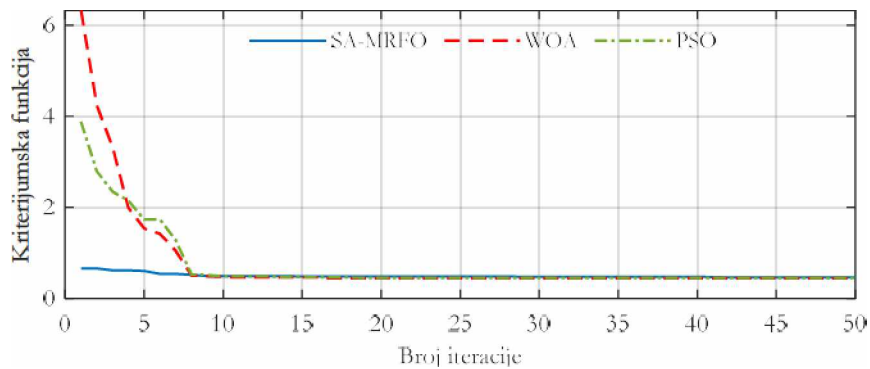
U nastavku je prikazana analiza sposobnosti sistema za regulaciju napona sa  $PIDD^2$  regulatorom da suzbije dvije vrste poremećaja – poremećaj na upravljački signal i poremećaj opterećenja. U cilju adekvatnog poređenja, primijenjeni su parametri  $PIDD^2$  regulatora određeni SA-MRFO algoritmom, kao i pomoću WOA [4] i PSO algoritma [30]. Step odzivi sistema za regulaciju napona, za sve razmatrane slučajeve i za obje vrste poremećaja, prikazani su na slici 3.1.17.



Slika 3.1.17 Step odzivi sistema za regulaciju napona u slučaju a) poremećaja na upravljački signal b) poremećaja opterećenja generatora

Najbrže suzbijanje poremećaja na upravljački signal i poremećaja opterećenja generatora je u slučaju primjene  $PIDD^2$  regulatora sa parametrima određenim pomoću SA-MRFO algoritma. Kada se koristi  $PIDD^2$  regulator čiji su parametri određeni pomoću PSO algoritma, također se dobija zadovoljavajući odziv, dok primjena parametara određenih sa WOA algoritmom dovodi do odziva sa ogromnim preskokom, pa napon generatora u prelaznom procesu dostiže vrijednost čak preko 200% nominalne vrijednosti.

Finalno, superiornost predloženog SA-MRFO algoritma nad drugim algoritmima korišćenim za poređenje, tj. WOA i PSO algoritmima, pokazana je poređenjem njihovih konvergencijskih karakteristika dobijenih pod identičnim uslovima – veličina populacije je 30, maksimalni broj iteracija je 50, a kriterijumska funkcija je data relacijom (3.2). Poređenje konvergencijskih karakteristika dato je na slici 3.1.18.



Slika 3.1.18 Konvergencijske krive algoritama prilikom optimizacije parametara  $PIDD^2$  regulatora

S aspekta brzine konvergencije ka optimalnom rješenju, SA-MRFO algoritam značajno brže dostiže optimalno rješenje od WOA i PSO algoritama, koji su korišćeni u svrhu komparativne analize. Glavni razlog za to je hibridna priroda SA-MRFO algoritma, koja osigurava veoma „kvalitetno“ početno rješenje. Sa druge strane, kod PSO i WOA algoritma je karakteristično to da je početna populacija, tj. početno rješenje, nasumično inicijalizovano.

### 3.1.5 Optimalni dizajn $PIDD^2$ regulatora sa limiterom napona pobude

Uprikos tome što u dostupnoj literaturi postoji veoma veliki broj naučnih radova posvećenih problemu optimalnog dizajna regulatora kod sistema za regulaciju napona, kod svih radova se može uočiti jedan nedostatak. Konkretno, ni u jednom od citiranih naučnih radova iz literature ne razmatra se praktično ograničenje napona pobude. Naime, ukoliko se krajevi pobudnog namotaja generatora prikače na izvor jednosmjernog napona, tada će kroz

ovaj namotaj proteći pobudna struja. Sa fizičkog aspekta, prevelika vrijednost struja može dovesti do pregrijavanja i oštećenja namotaja pobude. Stoga, s obzirom na to da vrijednost napona pobude diktira vrijednost pobudne struje, jasno je da se u praksi ne smiju dozvoliti neograničene vrijednosti napona pobude. U praksi, najveće dozvoljene vrijednosti napona pobude su između 1.6 pu i 3 pu i karakteristične su za režim forsiranja pobude [105]. U istraživanju sprovedenom u ovoj disertaciji, izvršena je optimizacija parametara PIDD<sup>2</sup> regulatora uzimajući u obzir ograničenje napona pobude. Ograničavanje pobudnog napona nije izvršeno prostim dodavanjem limitera kod pobudnice u šemi sistema za regulaciju napona. Limitiranje pobudnog napona izvršeno je prilikom definisanje kriterijumske funkcije.

U cilju optimizacije parametara PIDD<sup>2</sup> regulatora uzimajući u obzir ograničavanje pobudnog napona, primijenjen je novi hibridni EO-ERWCA algoritam, čiji je opis dat u Poglavlju 2. Prilikom optimizacije, podešeno je da veličina populacije predloženog algoritma iznosi 30, a da maksimalni broj iteracije bude 100. Donja granica svih optimizacionih varijabli je 10<sup>-5</sup>, dok je gornja granica podešena na 1. Takođe, kako bi se adekvatno uzelo u obzir ograničavanje pobudnog napona, predložene su dvije nove kriterijumske funkcije  $f_1$  i  $f_2$ :

$$f_1 = \begin{cases} \sum_{k=1}^N (V_{rf} - V_g(k))^2, & \text{ako je } \max(V_F) \leq V_F^{limit} \\ \infty, & \text{ako je } \max(V_F) > V_F^{limit} \end{cases}, \quad (3.3)$$

$$f_2 = \begin{cases} \sum_{k=1}^N (V_{rf} - V_g(k))^2 + w \cdot \max(V_g), & \text{ako je } \max(V_F) \leq V_F^{limit} \\ \infty, & \text{ako je } \max(V_F) > V_F^{limit} \end{cases}, \quad (3.4)$$

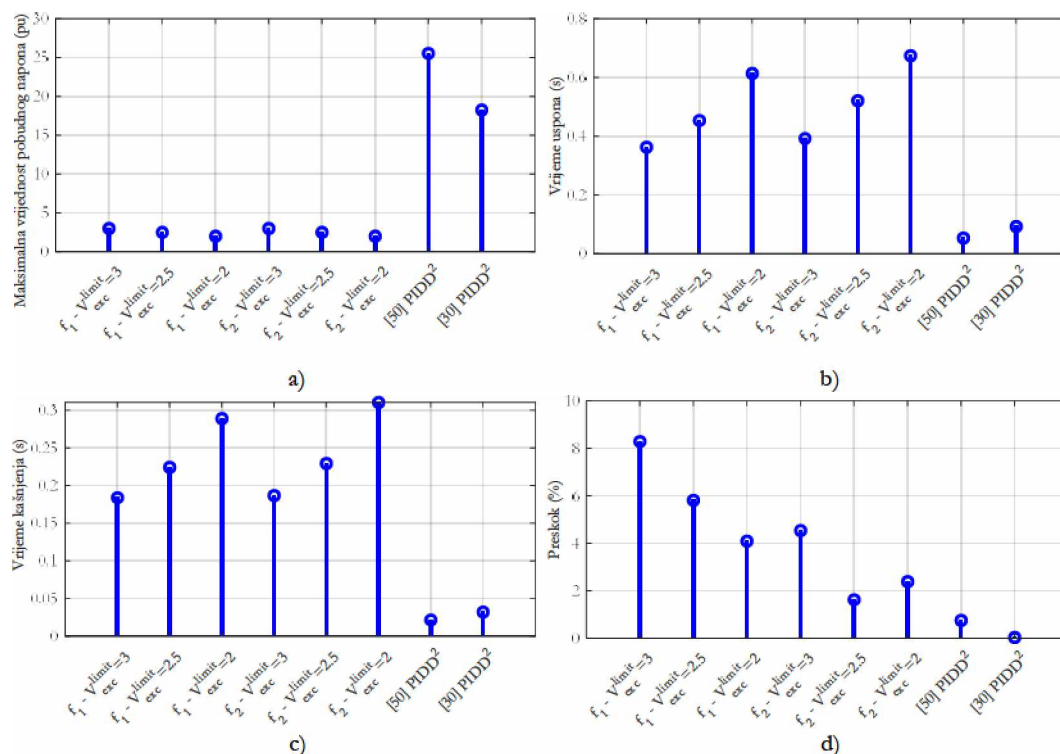
gdje  $N$  predstavlja maksimalni broj odbiraka mjenog napona,  $w$  je težinski koeficijent čija je optimalna vrijednost 10, dok je  $V_F^{limit}$  maksimalna dozvoljena vrijednost napona pobude.

Optimizacija parametara PIDD<sup>2</sup> regulatora izvršena je primjenom obje predložene kriterijumske funkcije i to za tri različite vrijednosti maksimalnog dozvoljenog pobudnog napona – 2 pu, 2.5 pu i 3 pu. Dobijeni rezultati upoređeni su sa [30] i [50], u kojima je takođe izvršen optimalni dizajn PIDD<sup>2</sup> regulatora, ali bez uzimanja u obzir ograničavanja pobudnog napona. Dobijene optimalne vrijednosti parametara date su u Tabeli 3.1.17.

Tabela 3.1.17 Optimalne vrijednosti parametara PIDD<sup>2</sup> regulatora

Metod	Limit $V_F$	$K_p$	$K_i$	$K_d$	$Kd_2$
Predložena funkcija $f_1$	3 pu	0.8577	0.4361	0.1783	0.0116
	2.5 pu	0.6531	0.3624	0.1428	0.0098
	2 pu	0.4498	0.3137	0.1104	0.0079
Predložena funkcija $f_2$	3 pu	0.7407	0.4396	0.1859	0.0109
	2.5 pu	0.5459	0.3435	0.1503	0.0092
	2 pu	0.3809	0.2899	0.1079	0.0051
[50]	/	2.9943	2.9787	1.5882	0.102
[30]	/	2.7784	1.8521	0.9997	0.073

Koristeći parametre PIDD<sup>2</sup> regulatora iz prethodne tabele, za sve slučajeve proračunate su neke od karakterističnih veličina step odziva – vrijeme uspona, vrijeme kašnjenja i preskok. Takođe, za slučaj kada je referentni napon step funkcija amplitude 1 pu, proračunate su i maksimalne vrijednosti pobudnog napona. Na slici 3.1.18 dato je grafičko poređenje maksimalnih vrijednosti pobudnog napona, vremena uspona, vremena kašnjenja i preskoka za sve razmatrane slučajeve.



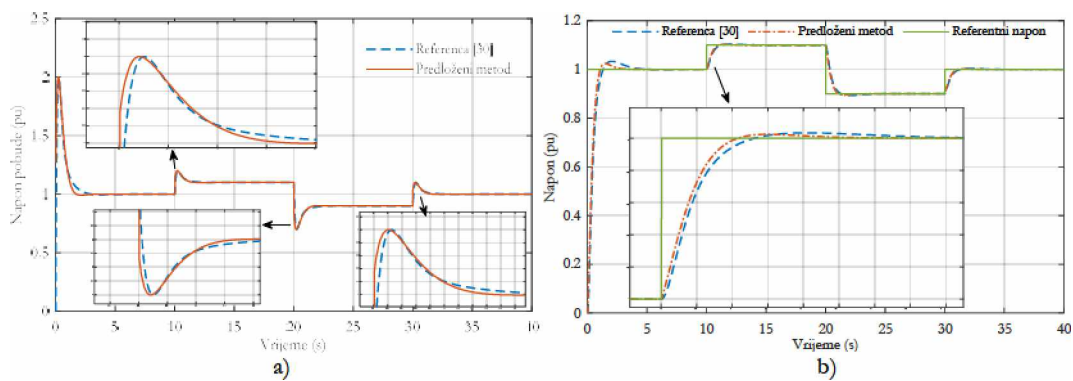
Slika 3.1.19 Poređenje a) maksimalne vrijednosti pobudnog napona b) vremena smirenja c) vremena kašnjenja d) preskoka kada se primjenjuju parametri regulatora iz Tabele 3.1.17

Upoređujući maksimalne vrijednosti pobudnog napona za sve razmatrane slučajeve, jasno je da se u radovima [30] i [50] dobijaju nedozvoljeno velike maksimalne vrijednosti

pobudnog napona, koje iznose preko 25 pu [50], odnosno između 15 pu i 20 pu [30]. Na osnovu prethodne analize, zaključuje se da bi ovako velike vrijednosti pobudnog napona izazvale proticanje veoma velikih vrijednosti pobudne struje, čime bi u praksi došlo do oštećenja pobudnog namotaja. S obzirom na to da je limitiran pobudni napon, logično je da će vrijeme uspona, vrijeme kašnjenja i preskok imati veće vrijednosti kada se koristi predloženi pristup.

Robusnost prethodno optimizovanog PID<sup>2</sup> regulatora analizirana je za tri različita slučaja promjene radnih uslova kod sistema za regulaciju napona. Za sva tri slučaja koristi se set optimalnih parametara dobijen korišćenjem kriterijumske funkcije  $f_2$  za maksimalni napon pobude  $V_F^{hmi}=2$  pu.

U prvom slučaju analiziran je dinamički odziv sistema za regulaciju napona u slučaju step promjena referentnog napona – u početku je referentni napon jednak 1 pu, nakon 10 s poraste na 1.1 pu, da bi nakon 20 s od početka simulacije referentni napon pao na vrijednost 0.9 pu. Na slici 3.1.20 prikazani su odzivi napona generatora kada se koriste parametri određeni predloženim pristupom, kao i parametri iz [30]. Na istoj slici prikazan je i odziv pobudnog napona.

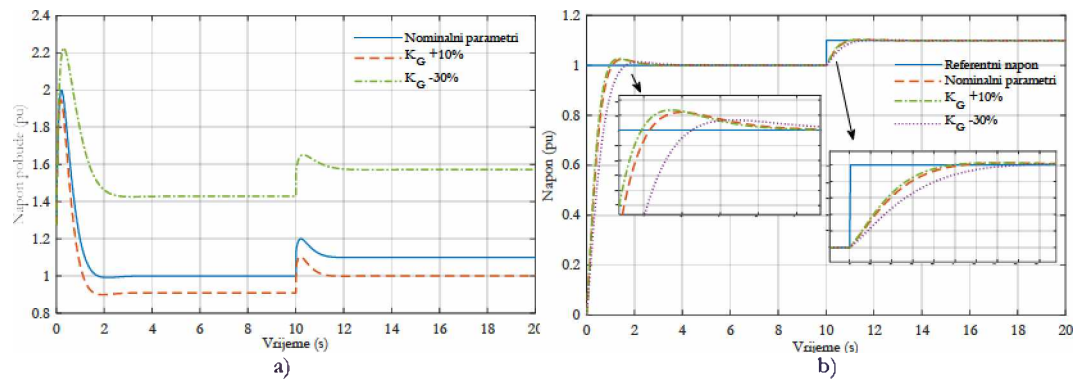


Slika 3.1.20 Odziv a) pobudnog napona b) napona generatora u slučaju step promjena referentnog napona

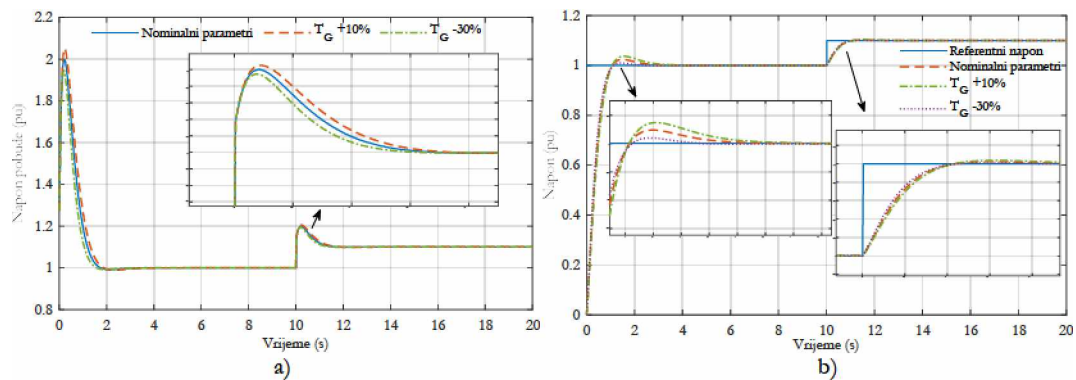
U oba razmatrana slučajeve, vrijednost pobudna napona ostaje unutar dozvoljenih granica, dok je odziv neznatno brži i sa manjim preskokom kada se koriste parametri određeni u ovom radu.

U drugom slučaju, analizirano je ponašanje sistema kada dođe do promjene parametara prenosne funkcije generatora. Preciznije, na slici 3.1.21 prikazani su odziv napona pobude i odziv napona generatora kada pojačanje generatora  $K_G$  uzima vrijednost za 10%

veću od nominalne, kao i za 30% manju od nominalne. Nakon toga, na slici 3.1.22 prikazani su odgovarajući odzivi u slučaju varijacije parametra  $T_G$ . Referentna vrijednost napona generatora iznosi u početku 1 pu, da bi se nakon 10 s povećala na 1.1 pu. Prilikom simulacija korišćen je set optimalnih parametara PIDD<sup>2</sup> regulatora koji su dobijeni primjenom kriterijumske funkcije  $f_2$  za maksimalni napon pobude  $V_F^{limit}=2$  pu.



Slika 3.1.21 Odziv a) pobudnog napona b) napona generatora u slučaju promjene parametra  $K_G$

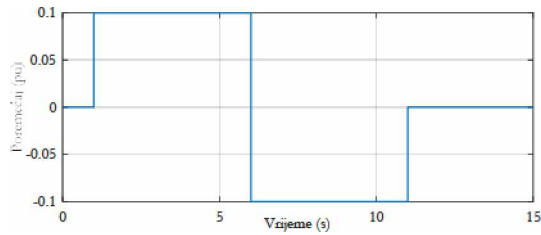


Slika 3.1.22 Odziv a) pobudnog napona b) napona generatora u slučaju promjene parametra  $T_G$

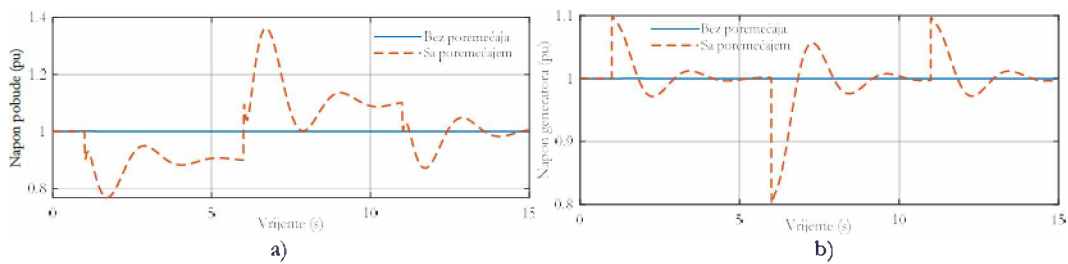
Prikazani rezultati za oba slučaja varijacije parametara  $K_G$  i  $T_G$  pokazuju da napon na izlazu generatora, u svim razmatranim slučajevima, bez greške u stacionarnom stanju, prati referentni signal. Takođe, zaključuje se da vrijednost napona pobude u prelaznom procesu ne prelazi kritične vrijednosti. Stoga, jasno je da je ovako optimizovani PIDD<sup>2</sup> regulator robustan na promjenu parametara sistema, jer obezbjeđuje željene dinamičke karakteristike za razne vrijednosti parametara prenosne funkcije generatora.

U trećem slučaju, razmatra se poremećaj opterećenja generatora, tj. dodavanje signala na izlazni napon generatora  $V_g$ . Poremećaj je modelovan signalom koji je predstavljen na slici

3.1.23. Odziv napona pobude i izlaznog napona generatora uz prisustvo ovakvog tipa poremećaja prikazani su na slici 3.1.24.



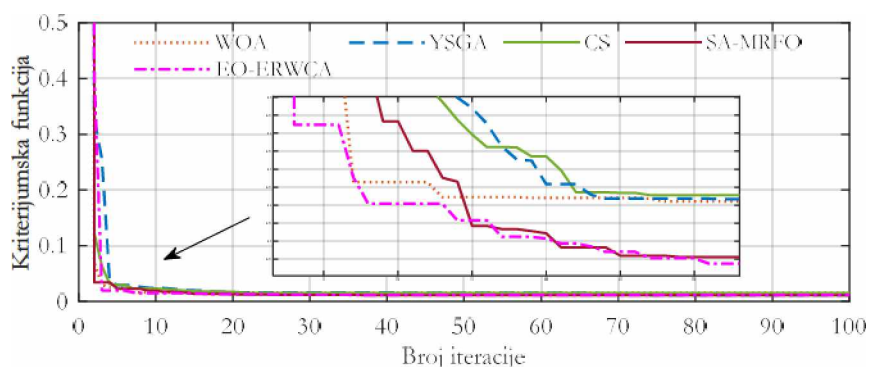
Slika 3.1.23 Signal poremećaja koji se superponira sa izlaznim naponom generatora



Slika 3.1.24 Odziv a) pobudnog napona b) napona generatora u slučaju prisustva poremećaja

Prethodnom analizom obuhvaćeno je ponašanje sistema za regulaciju napona u slučaju postojanja kako pozitivne, tako i negativne, step smetnje na izlazni napon generatora. Primjećuje se da, u oba slučaja, PIDD<sup>2</sup> regulator doprinosi da napon generatora dostigne referentnu vrijednost. Takođe, pobudni napon ostaje u dozvoljenim granicama, čime se zaključuje da sistem ima sposobnost da uspješno otkloni uticaj poremećaja.

Na kraju, neophodno je sprovesti analizu performansi predloženog EO-ERWCA algoritma za optimizaciju parametara PIDD<sup>2</sup> regulatora. U cilju komparativne analize, izvršeno je poređenje predloženog algoritma sa WOA algoritmom [4], YSGA algoritmom [49], CS algoritmom [18] i SA-MRFO algoritmom [50]. Radi validnosti poređenja, svaki od pomenutih algoritama je pokrenut 30 puta, pod identičnim uslovima (veličina populacije je 30, maksimalni broj iteracija je 100, a korišćena je kriterijumska funkcija  $f_2$ ). Na slici 3.1.25 prikazane su srednje vrijednosti konvergencijskih krivih za sve razmatrane algoritme. Na pomenutom grafiku prikazane su normalizovane, tj. skalirane vrijednosti kriterijumske funkcije. Takođe, u Tabeli 3.1.18 prikazane su najmanja i najveća vrijednost kriterijumske funkcije, srednja vrijednost, medijana i standardna devijacija, za svaki algoritam i za svih 30 ponavljanja.



Slika 3.1.25 Poređenje konvergenijskih karakteristika algoritama

Tabela 3.1.18 Statistički parametri pojedinih algoritama

Algoritam	Najmanja vrijednost	Najveća vrijednost	Srednja vrijednost	Medijana	Standardna devijacija
EO-ERWCA	1284.5	1406.9	1345.1	1343	35.7286
C-YSGA	1284.7	1468.6	1378.4	1381.3	54.2141
CS	1284.6	1592	1429.7	1427.2	110.1038
WOA	1286.4	1530.8	1415.7	1424.6	70.0808

Prethodno sprovedena komparativna analiza pokazuje da predloženi EO-ERWCA algoritam neznatno brže konvergira ka optimalnom rješenju u poređenju sa ostalim algoritmima. Na osnovu statističkih parametara, najmanja vrijednost kriterijumske funkcije je skoro identična za sve algoritme (sa neznom razlikom najmanja vrijednost se dobija primjenom EO-ERWCA algoritma). Takođe, primjetno je da je standardna devijacija najmanja kada se koristi EO-ERWCA algoritam, što govori da je za ovaj algoritam karakteristična najveća konzistencija dobijenih rezultata pri likom većeg broja ponovnog pokretanja algoritma (u ovom radu svi algoritmi su pokrenuti 30 puta).

### 3.2 Predlog nove strukture regulatora za potpunu šemu sistema za regulaciju pobude sinhronog generatora

U prethodnom dijelu ove disertacije izvršen je optimalni dizajn različitih tipova regulatora kod sistema za regulaciju napona sinhronog generatora. Pri tome je korišćena uprošćena šema sistema za regulaciju napona, koja osim regulatora obuhvata pojačavač, pobudnicu, generator i senzor. Sve prethodno pomenute komponente (pojačavač, pobudnica, generator i senzor) se u dostupnoj literaturi dominantno modeluju sistemom prvog reda, tj. prenosnom funkcijom koja se sastoji samo od pojačanja i vremenske konstante, shodno relaciji (1.50), kao što je pokazano u [3 – 27, 29 – 44, 46, 47]. Nešto složeniji model sinhronog generatora, tj. model trećeg reda, primijenjen je kod sistema za

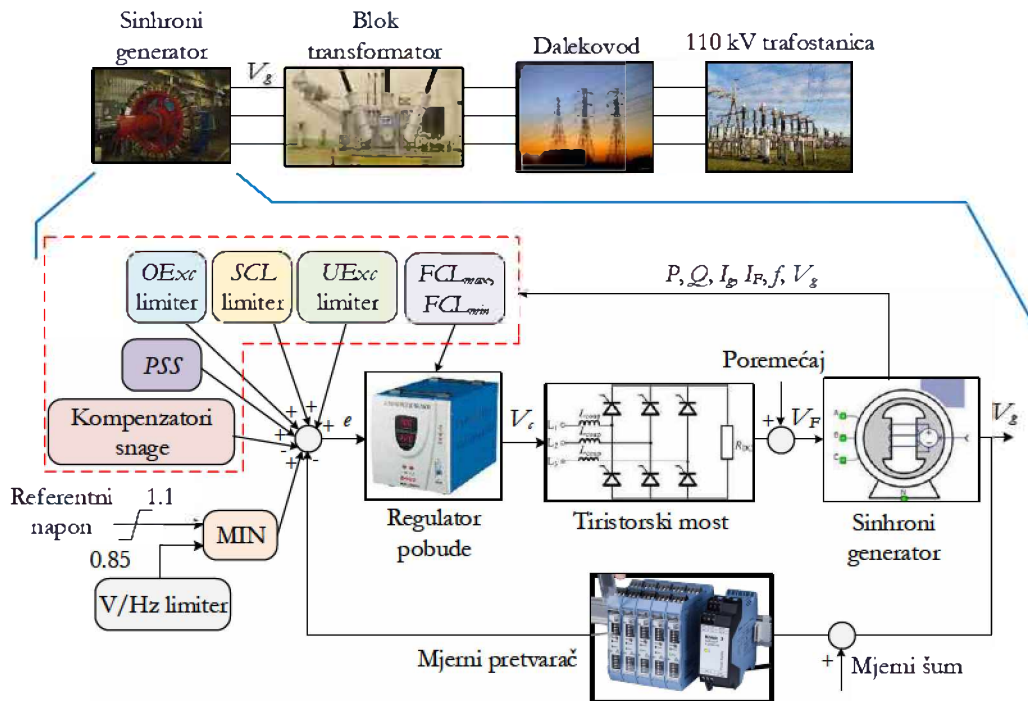


regulaciju napona u [28]. Međutim, bitno je naglasiti da je sinhroni generator, u oba slučaja, modelovan kao linearni sistem, što se takođe može reći i za sve ostale komponente sistema za regulaciju napona. Ovakvo modelovanje komponenti, a posebno sinhronog generatora, ne može biti dovoljno precizno i pouzdano, uzimajući u obzir činjenicu da je generator izrazito nelinearan.

U svhu istraživanja u okviru ove doktorske disertacije razvijen je simulacioni model kompletnog sistema za regulaciju pobude sinhronog generatora. Simulacioni model je razvijen koristeći tehničku dokumentaciju dobijenu iz HE Perućica. Preciznije, u datoj tehničkoj dokumentaciji detaljno je opisana struktura pobudnog sistema sinhronog generatora snage od 40 MVA. Takođe, u pomenutoj dokumentaciji opisan je način modelovanja svih komponenti sistema za regulaciju pobude. Ovako razvijeni simulacioni model omogućava dobijanje znatno preciznijih i tačnijih odziva u odnosu na slučaj kada se koristi uprošćeni model. Dodatno, u istraživanju koje je sprovedeno u okviru ove disertacije, predložen je novi tip regulatora koji do sada nije bio primijenjivan kod sistema za regulaciju pobude. Parametri ovog regulatora određeni su primjenom adaptivne modifikacije postojećeg AVOA algoritma (detalji su dati u Poglavlju 2). Takođe, predložena je i nova vrsta kriterijumske funkcije, koja osim odziva na promjenu referentne vrijednosti napona, uzima u obzir i djelovanje sistema na pojave poremećaja i mjernih šumova.

### 3.2.1 Simulacioni model sistema za regulaciju pobude

Simulacioni model sistema za regulaciju pobude, predložen u ovoj disertaciji, razvijen je na bazi realnog sinhronog generatora snage od 40 MVA iz HE „Perućica“. Tehnička dokumentacija pobudnog sistema ovog generatora, u kojoj je dat detaljan opis strukture samog sistema, kao i načina modelovanja pojedinih komponenti, poslužila je za razvoj pomenutog simulacionog modela. Za regulaciju pobude sinhronog generatora u HE „Perućica“ primijenjen je *Thyristron* pobudni sistem, koji pripada grupi statičkih sistema samopobude. Osim samog generatora i njegovog pobudnog sistema, simulacije uključuju model blok transformatora, prenosnog dalekovoda i 110 kV trafostanice. Blok dijagram simulacionog modela prikazan je na slici 3.2.1, pri čemu donji dio slike prikazuje detaljnu strukturu sistema za regulaciju pobude sinhronog generatora, dok gornji dio slike ilustruje dio prenosnog sistema do trafostanice naponskog nivoa 110 kV. Takođe, u Tabeli 3.2.1 dati su kataloški podaci generatora, transformatora, dalekovoda i trafostanice.



Slika 3.2.1 Blok dijagram simulacionog modela

Tabela 3.2.1 Kataloški podaci generatora, transformatora, dalekovoda i trafostanice

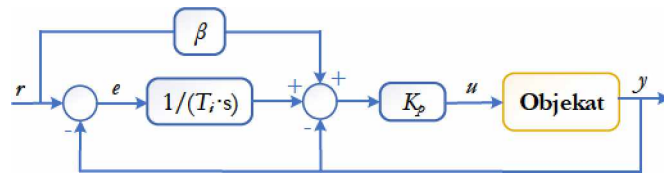
Sinhroni generator					
Simbol	Opis	Vrijednost	Simbol	Opis	Vrijednost
$S_n$	Nominalna snaga	40 MVA	$X_d''$	Subtranzijentna reaktansa po $d$ -osi	0.32 pu
$V_n$	Nominalni napon statora	10.5 kV	$X_q$	Sinhrona reaktansa po $q$ -osi	0.77 pu
$I_n$	Nominalna struja statora	2.2 kA	$X_q''$	Subtranzijentna reaktansa po $q$ -osi	0.28 pu
$f_n$	Nominalna frekvencija	50 Hz	$R_s$	Otpornost namotaja statora	72 mΩ
$pf$	Nominalni faktor snage	0.95	$R_F$	Otpornost namotaja pobude	245.3 mΩ
$V_F$	Nominalni napon pobude	180 V	$T_d'$	Tranzijentna vremenska konstanta kratkog spoja po $d$ -osi	1.44 s
$I_F$	Nominalna struja pobude	550 A	$T_d''$	Subtranzijentna vremenska konstanta kratkog spoja po $d$ -osi	0.136 s
$n_n$	Nominalna brzina	375 rpm	$T_{d\phi}'$	Tranzijentna vremenska konstanta otvorenog kola po $d$ -osi	6.31 s
$X_{\sigma}$	Rasipna reaktansa statora	0.14 pu	$T_{d\phi}''$	Subtranzijentna vremenska konstanta otvorenog kola po $d$ -osi	0.15 s
$X_d$	Sinhrona reaktansa po $d$ -osi	1.455 pu	$T_q''$	Subtranzijentna vremenska konstanta kratkog spoja po $q$ -osi	0.07 s
$X_d'$	Tranzijentna reaktansa po $d$ -osi	0.347 pu	$T_{q\phi}''$	Subtranzijentna vremenska konstanta otvorenog kola po $q$ -osi	0.22 s
Blok transformator					
Simbol	Opis	Vrijednost	Simbol	Opis	Vrijednost
$S_m$	Nominalna snaga	40 MVA	$R_{\sigma 2}$	Otpornost namotaja sekundara	0.003 pu
$V_{n1}$	Nominalni napon primara	10.5 kV	$L_{\sigma 2}$	Induktivnost namotaja sekundara	0.044 pu

$V_d$	Nominalni napon sekundara	121 kV	$R_m$	Otpornost grane magnećenje	300 pu
$R_{d1}$	Otpornost namotaja primara	0.003 pu	$L_m$	Induktivnost magnećenja	300 pu
$L_{r1}$	Induktivnost namotaja primara	0.044 pu			
<b>Prenosni dalekovod</b>					
Simbol	Opis	Vrijednost	Simbol	Opis	Vrijednost
$l$	Dužina	32.6 km	$L'$	Induktivnost voda po fazi	1.3 mH/km
$R'$	Otpornost voda po fazi	0.121 $\Omega$ /km	$C'$	Kapacitivnost voda po fazi	10 nF/km
<b>Trafostanica</b>					
Simbol	Opis	Vrijednost	Simbol	Opis	Vrijednost
$V_s$	Nominalni napon	110 kV	$P_{3sc}$	Snaga trofaznog kratkog spoja	3306 MW
$X/R$	$X/R$ odnos	10			

Kratka analiza blok dijagrama sistema za regulaciju pobude sa slike 3.2.1 započinje od sumatora. Na osnovu algebarske sume referentnog napona, izmjenog napona sa krajeva SG, kao i signala iz limitera i dodatnih funkcionalnih blokova koji su detaljno opisani u Poglavlju 1, formira se signal greške označen sa  $e$ . Na osnovu signala greške i zakona upravljanja, regulator pobude definiše upravljački signal  $V_d$ . Prema dostupnoj dokumentaciji, regulator pobude je modelovan kao PI regulator čiji su parametri  $K_p=24$  i  $T_i=1$ . Upravljački signal se zatim konvertuje u ugao kašnjenja paljenja tiristora  $\alpha$ , čija se vrijednost održava između  $5^\circ$  i  $165^\circ$ . Definisanjem ugla  $\alpha$  vrši se uključivanje tiristora ispravljačkog mosta, a vrijednost ovog ugla definiše izlazni napon tiristorskog mosta, odnosno napon pobude  $V_F$ . Pobudni napon se dovodi na namotaj pobude sinhronog generatora sa ciljem da izlazni napon generatora  $V_g$  dostigne referentnu vrijednost. Izlazni napon generatora se, pomoću mjernog pretvarača, dovodi do sumatora. U pomenutom simulacionom modelu, sinhroni generator je modelovan modelom sedmog reda, koji je detaljno opisan u Poglavlju 1.

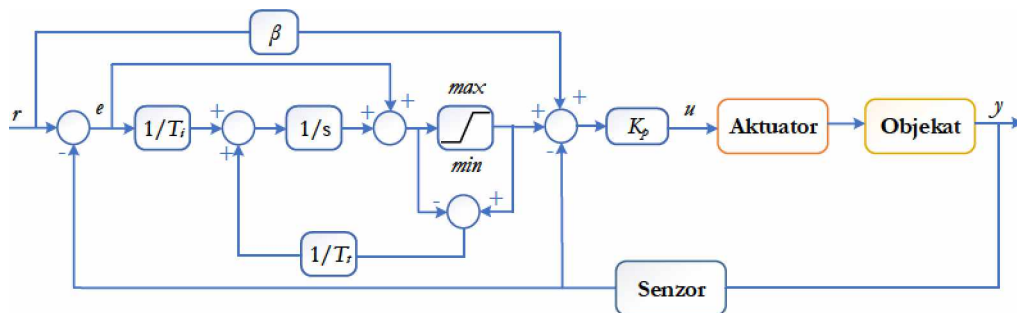
### 3.2.2 Opis predloženog regulatora

U radu [106] autori predlažu robusni metod za određivanje parametara PI regulatora sa dva stepena slobode, tzv. 2-DOF (*two-degree-of-freedom*) PI regulatora ili  $PI_2$  regulatora. U pomenutom radu,  $PI_2$  regulator je korišćen za sisteme drugog reda za inverznim odzivom (*inverse response second-order processes*). Blok dijagram sistema automatskog upravljanja sa ovim tipom regulatora prikazan je na slici 3.2.2 [106]. Osim već uvedenih parametara  $K_p$  i  $T_i$ , ovaj regulator posjeduje i treći parametar označen sa  $\beta$ , koji služi za skaliranje referentnog signala.



Slika 3.2.2 Blok dijagram sistema automatskog upravljanja sa PI<sub>2</sub> regulatorom

U ovoj disertaciji predložen je novi tip regulatora za primjenu kod sistema za regulaciju pobude sinhronog generator. Predloženi regulator se bazira na prethodno prikazanom PI<sub>2</sub> regulatoru, sa dodatkom *anti-windup* mehanizma za sprečavanje zasićenja integratora. Blok dijagram sistema automatskog upravljanja sa zatvorenom povratnom spregom sa predloženim regulatorom dat je na slici 3.2.3.



Slika 3.2.3 Blok dijagram sistema automatskog upravljanja sa predloženim PI<sub>2</sub> regulatorom sa *anti-windup*-om

### 3.2.3 Rezultati simulacija

U ovom dijelu prikazani su rezultati dobijeni optimizacijom parametara regulatora korišćenjem potpune i pouzdane šeme sistema za regulaciju pobude, koja je data na slici 3.2.1. S obzirom na to da opisana šema sistema za regulaciju pobude nije primijenjivana u dostupnoj literaturi, u istraživanju sprovedenom u okviru ove disertacije izvršena je optimizacija parametara drugih regulatora koji se najčešće koriste u praksi u realnim hidroelektranama. Na taj način dobijeni su rezultati koji služe za sprovođenje komparativne analize predloženog PI<sub>2</sub> regulatora sa *anti-windup* zaštitom. Konkretno, za poređenje su korišćeni PI regulator, PI sa *anti-windup*, realni PID i realni PID sa *anti-windup* zaštitom. Optimalno dizajniranje pomenutih regulatora izvršeno je pomoću predloženog adaptivnog AVOA algoritma (A-AVOA), koji je detaljno opisan u Poglavlju 2. S obzirom na računarsku složenost simulacija, veličina populacije A-AVOA algoritma je 20, dok je maksimalni broj iteracija 30. Ograničenja optimizacionih varijabli, tj. parametara različitih regulatora, data su u Tabeli 3.2.2.

Tabela 3.2.2 Ograničenja optimizacionih varijabli

Parametar	$K_p$	$T_i$	$\beta$	$K_d$	$N$
Donja granica	1	0.1	0.1	0.01	100
Gornja granica	50	10	3	1	1000

Osim novog tipa regulatora, u ovoj disertaciji je predložena i nova multi-objektivna kriterijumska funkcija:

$$f = w_1 \cdot f_1 + w_2 \cdot f_2 + w_3 \cdot f_3, \quad (3.5)$$

gdje su  $w_1$ ,  $w_2$  i  $w_3$  težinski koeficijenti, koji imaju vrijednosti  $w_1=1$ ,  $w_2=300$  i  $w_3=70$ . Pojedini članovi u prethodno definisanoj kriterijumskoj funkciji imaju sljedeća značenja:

- Član  $f_1$  se odnosi na optimizaciju odziva napona generatora kada postoji step smetnja na referentnu vrijednost napona:

$$f_1 = (1 - e^{-\beta}) \cdot \left( Ess + \frac{OS}{90} \right) + e^{-\beta} \cdot (t_s - t_r), \beta = 1, \quad (3.6)$$

gdje  $t_r$ ,  $t_s$ ,  $OS$  i  $Ess$  predstavljaju vrijeme uspona, vrijeme smirenja, preskok i grešku u stacionarnom stanju prilikom prelaznog procesa koji nastaje usljed promjene referentne vrijednosti napona;

- Drugi član, označen sa  $f_2$ , ima funkciju da elimiše uticaj poremećaja na napon pobude i da obezbijedi da napon generatora što prije ponovo dostigne referentnu vrijednost:

$$f_2 = \int e_d^2(t) \cdot dt, \quad (3.7)$$

pri čemu je  $e_d$  signal greške, tj. razlika između referentnog napona i napona generatora dok traje poremećaj na pobudni napon;

- Treći dio kriterijumske funkcije, koji je označen sa  $f_3$ , utiče na minimizaciju efekta mjernog šuma na odziv napona generatora:

$$f_3 = \Delta V_g = V_{gmax} - V_{gmin}, \quad (3.8)$$

gdje  $V_{gmax}$  i  $V_{gmin}$  označavaju maksimalnu i minimalnu vrijednost napona generatora tokom postojanja mjernog šuma.

Proces određivanja optimalnih parametara regulatora sproveden je na sljedeći način:

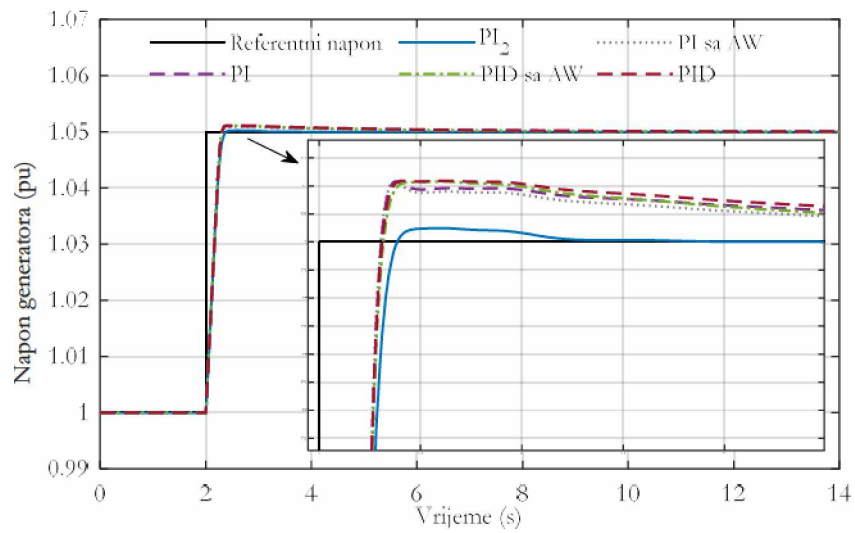
- U početku referentna vrijednost napona je podešena na nominalnu vrijednost, tj. 1 pu;
- U trenutku  $t=2$  s referentna vrijednost napona poraste na 1.05 pu (drugim riječima, step smetnja amplitude 0.05 pu je dodata na referentnu vrijednost napona);
- Nakon toga, u trenutku  $t=17$  s dodata je step smetnja amplitude 0.5 pu na pobudni napon generatora;
- Finalno, u trenutku  $t=32$  s dodan je mjerni šum, koji traje do kraja simulacije.

Pod prethodno opisanim radnim uslovima u sistemu i koristeći predloženu kriterijumsku funkciju i navedene parametre algoritma, izvršena je optimizacija parametara predloženog PI<sub>2</sub> regulatora, PI regulatora sa i bez *anti-windup* zaštite, kao i realnog PID regulatora, sa i bez *anti-windup*-a. Optimalne vrijednosti parametara svih regulatora, kao i dobijene vrijednosti kriterijumske funkcije, date su u Tabeli 3.2.3.

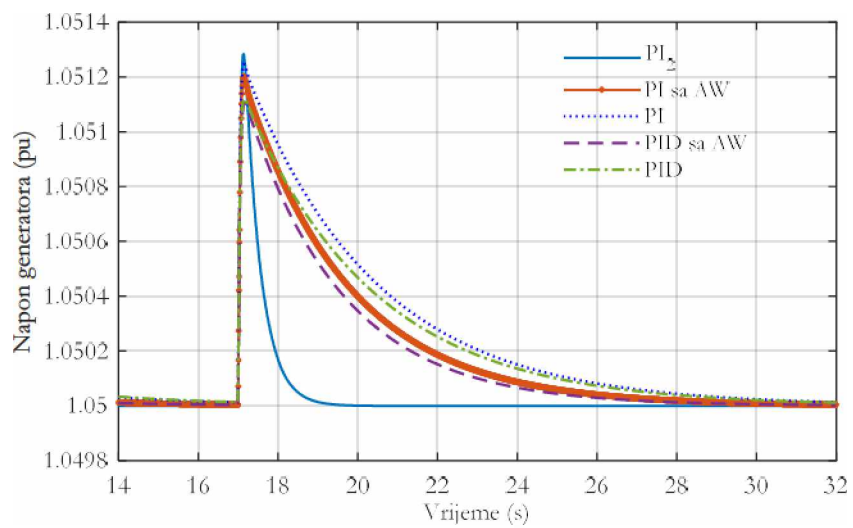
Tabela 3.2.3 Optimalne vrijednosti parametara regulatora

	Predloženi PI <sub>2</sub>	PI with AW	PI	PID with AW	PID
$K_p$	19.343103336	46.8650230447	45.3941712400	49.5163300771	49.9999999891
$T_i$	0.2301765921	2.60208862249	3.21833129844	2.41379326278	3.20655434664
$\beta$	0.3818072185	/	/	/	/
$K_d$	/	/	/	0.46016532371	0.35087016208
$N$	/	/	/	1000	430.600540183
$f$	<b>0.1802898316</b>	0.23155476864	0.24865924679	0.22474481384	0.24085885323

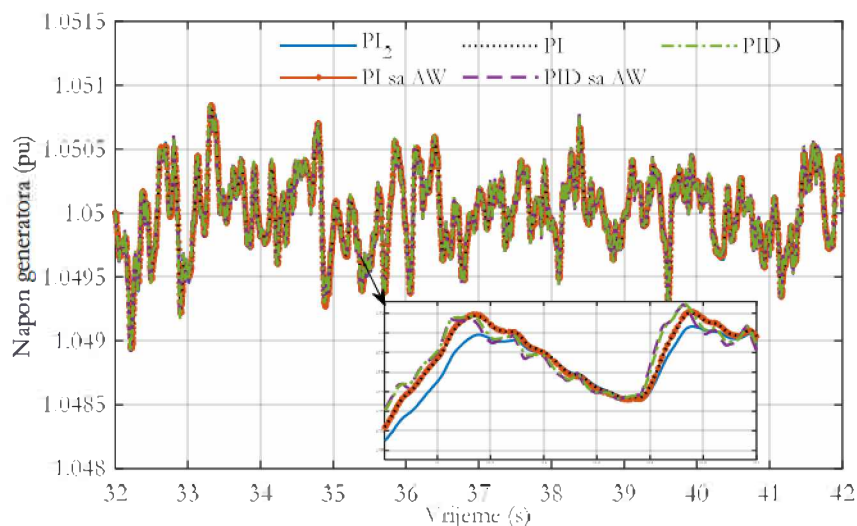
Na osnovu prikazanih vrijednosti kriterijumske funkcije, uzimajući u obzir da se najmanja vrijednost dobija za predloženi PI<sub>2</sub> regulator, jasno je da je ovaj tip regulatora podesniji za primjenu kod sistema za regulaciju pobude u odnosu na ostale regulatore. Osim numeričkih rezultata datih u prethodnoj tabeli, takođe je izvršeno i grafičko poređenje odziva napona generatora kada se primijenjuju svi pomenuti regulatori sa prethodno određenim parametrima. Odzivi napona pri opisanim uslovima u sistemu su grafički odvojeno prikazani po segmentima, pri čemu su na slici 3.2.4 prikazani djelovi odziva koji odgovoravaju step promjeni referentnog napona, na slici 3.2.5 su djelovi odziva u slučaju poremećaja na napon pobude, dok su na slici 3.2.6 prikazani djelovi odziva kada je prisutan mjerni šum.



Slika 3.2.4 Poređenje djelova odziva napona u slučaju step promjene referentnog napona



Slika 3.2.5 Poređenje djelova odziva napona u slučaju poremećaja na napon pobude



Slika 3.2.6 Poređenje djelova odziva napona u slučaju postojanja mjernog šuma

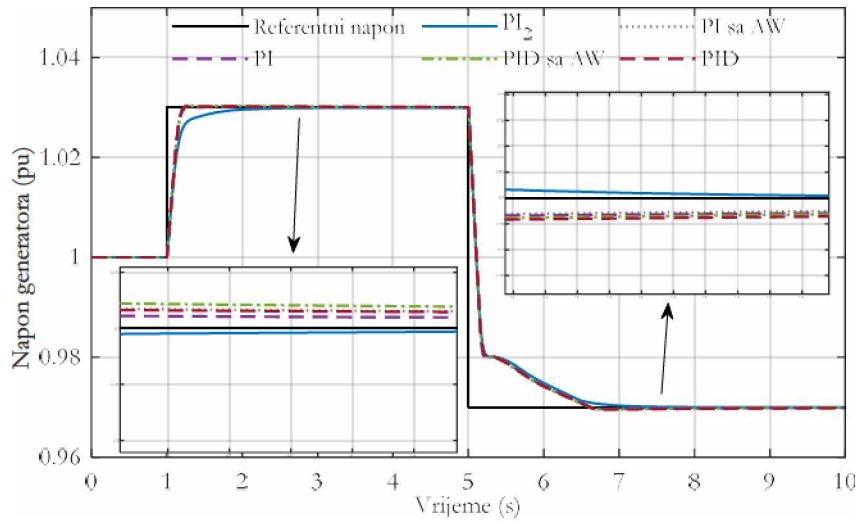
Na osnovu prikazanih grafika, jasno je da primjena predloženog  $PI_2$  regulatora dovodi do najboljih performansi sistema za regulaciju pobude i to za sva tri razmatrana kriterijuma – praćenje referentnog napona, sposobnosti suzbijanja poremećaja na pobudni napon, kao i suzbijanje mjernog šuma.

Nakon optimizacije parametara regulatora pri određenim uslovima u sistemu, neophodno je ispitati ponašanje sistema sa prethodno određenim parametrima pri nekim drugim radnim uslovima. U tom cilju, koristeći već određene parametre svih regulatora, sprovedena je simulaciona analiza pri iznijenjenim radnim uslovima:

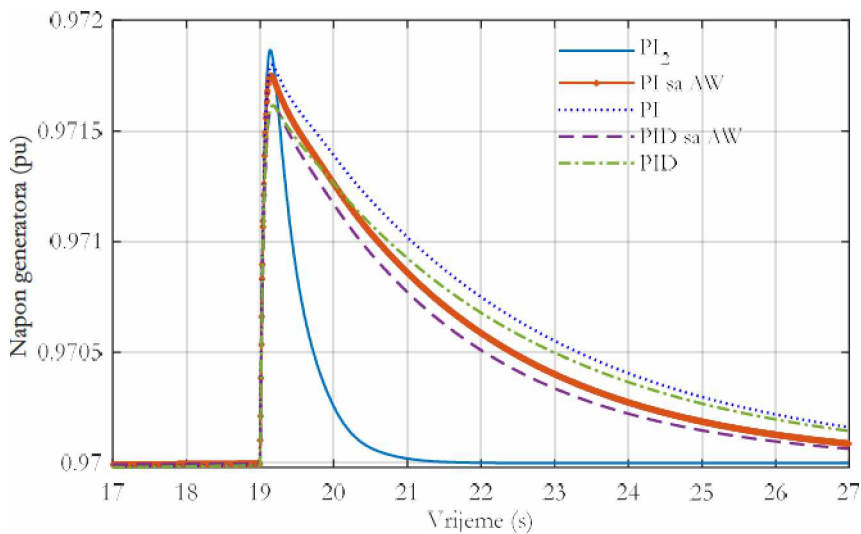
- Na početku simulacije referentna vrijednost napona je podešena na 1 pu;
- U trenutku  $t=1$  s na referentnu vrijednost napona dodaje se step signal amplitude 0.03 pu, odnosno referentna vrijednost napona se poveća na 1.03 pu;
- U trenutku  $t=5$  s referentna vrijednost napona opadne na 0.97 pu;
- U trenutku  $t=19$  s počinje da djeluje step smetnja amplitude 0.7 pu na pobudni napon.

Odziv napona na krajevima generatora, pri opisanim radnim uslovima, dobijen je primjenom svakog od pomenutih regulatora. Grafičko poređenje odziva dato je na slikama 3.2.7 i 3.2.8, pri čemu prva slika prikazuje segment simulacionog odziva kada dolazi do promjene referentne vrijednosti napona, dok druga slika ilustruje segment kada djeluje poremećaj na pobudni napon generatora.





Slika 3.2.7 Poređenje djelova odziva napona u slučaju step promjena referentnog napona



Slika 3.2.8 Poređenje djelova odziva napona u slučaju poremećaja na napon pobude

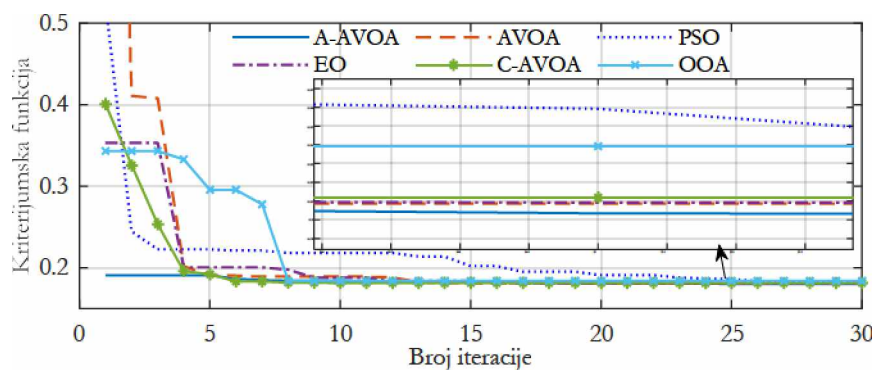
Prethodno prikazani rezultati ilustruju robusnost dobijenog sistema, tj. sposobnost da se sistem za već određenim parametrima regulatora prilagodi nekim drugim radnim uslovima. Na osnovu prikazanih rezultata, evidentno je da sistem sa predloženim  $PI_2$  regulatorom značajno bolje prati referentni signal u odnosu na slučajeve kada se primjenjuju ostali regulatori. Takođe, superiornost predloženog regulatora u odnosu na ostale često korišćene regulatore ilustrovana je i u slučaju pojave poremećaja na pobudni napon, jer tada sistem za predloženim regulatorom najbrže uklanja efekat poremećaja i postiže da napon generatora ponovo dostigne referentnu vrijednost.

U cilju dokazivanja prednosti i ispitivanja performansi adaptivnog AVOA, tj. A-AVOA algoritma koji je predložen u ovom radu, sprovedena je odgovarajuća komparativna analiza. Naime, pod identičnim uslovima, tj. korišćenjem kriterijumske funkcije (3.5) i istih podešavanje algoritma (veličina populacije 20 i maksimalni broj iteracija 30), izvršena je optimizacija parametara predloženog  $PI_2$  regulatora primjenom PSO algoritma, EO algoritma, zatim algoritma optimizacije pomoću orlova (*Osprey Optimization Algorithm* – OOA), originalnog AVOA algoritma i haotične modifikacija AVOA algoritma, tj. C-AVOA algoritma. Drugim riječima, performanse predloženog algoritma upoređene su sa svim pomenutim algoritmima i to sa dva aspekta – kvaliteta rezultata i konvergencijskih karakteristika. Najprije, kvalitet rezultata mjeri se dobijenom vrijednošću kriterijumske funkcije na kraju optimizacionog procesa, kao što je prikazano u Tabeli 3.2.4.

Tabela 3.2.4 Optimalne vrijednosti kriterijumske funkcije za svaki algoritam

Algoritam	A-AVOA	AVOA	PSO	EO	C-AVOA	OOA
$f$	0.180289831	0.180837295	0.183331	0.180896195	0.18118904	0.183933589

S aspekta dobijene finalne vrijednosti kriterijumske funkcije, jasno je da je predloženi A-AVOA algoritam superiorniji u poređenju sa ostalim algoritmima, jer obezbjeđuje najmanju vrijednost kriterijumske funkcije. Nakon toga, dato je poređenje istih algoritama s aspekta brzine konvergencije. Odgovarajuće konvergencijske karakteristike date su na slici 3.2.9.



Slika 3.2.9 Konvergencijske krive algoritama prilikom optimizacije parametara predloženog  $PI_2$  regulatora

Finalno, poređenje konvergencijskih karakteristika pokazuje da predloženi adaptivni AVOA algoritam brže dostiže optimalnu vrijednost, tj. brže konvergira ka optimalnom rješenju u odnosu na ostale algoritme koji su korišćeni za svrhu poređenja.

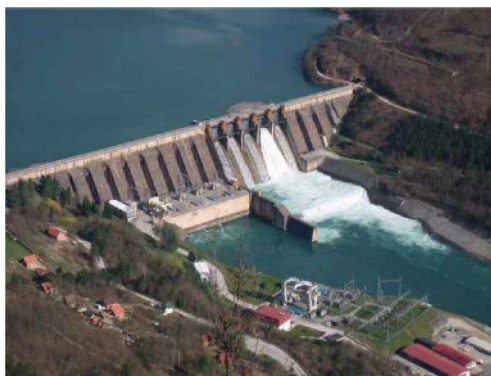
# Poglavlje 4

## Modifikacija standardnih procedura za određivanje parametara sinhronih mašina

U četvrtom poglavlju ove disertacije predložene su modifikacije standardnih metoda za određivanje parametara sinhronne mašine. U IEEE standardu [53], jedan od najpoznatijih testova za određivanje parametara sinhronne mašine jeste test trofaznog kratkog spoja sinhronog generatora iz praznog hoda. Prema standardizovanim procedurama, na osnovu talasnog oblika struje armature generatora tokom kratkog spoja, određenim grafičkim metodama mogu se proračunati neki parametri same mašine. U ovoj disertaciji predloženo je određivanje parametara sinhronne mašine na osnovu eksperimentalno snimljenih talasnih oblika struje pobude i struje armature tokom kratkog spoja. U cilju određivanja parametara mašine korišćeni su metaheuristički algoritmi. Preciznije, u literaturi se mogu naći matematički izrazi kojima se definiše talasni oblik struja pobude i armature. U ovim izrazima figurišu brojni parametri sinhronne mašine, čije je određivanje predmet istraživanja opisan u ovom poglavlju. U istraživanju sprovedenom u ovoj disertaciji, za računanje talasnog oblika struje pobude i struje armature najprije su iskorišćeni približni analitički izrazi, a zatim i kompletni, tačni izrazi kod kojih nije zanemarena vrijednost nijednog parametra.

### 4.1 Opis korišćene eksperimentalne postavke i procedure

U ovoj disertaciji eksperimentalni test ogleđa kratkog spoja, koji je neophodan za proces estimacije parametara generatora, izvršen je na sinhronom generatoru snage od 109.6 MVA koji se nalazi u HE „Bajina Bašta“ u Srbiji. Izgled ove hidroelektrane prikazan je na slici 4.1.1. Takođe, na slici 4.1.2 prikazani su rotor i stator razmatranog generatora.



Slika 4.1.1 Izgled HE „Bajina Bašta“



Slika 4.1.2 a) Rotor b) stator razmatranog generatora u HE „Bajina Bašta“

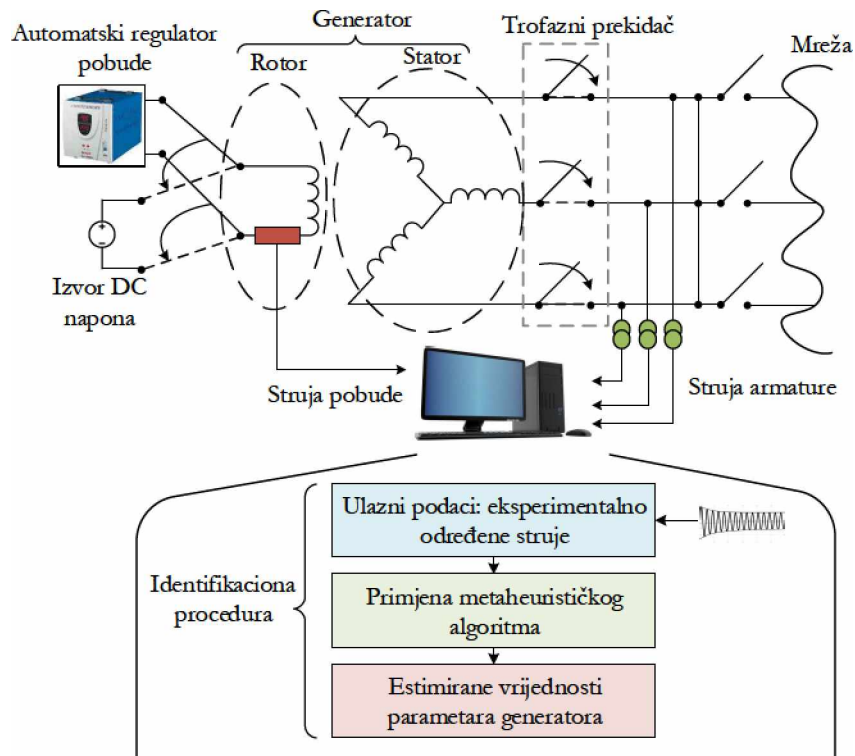
Osnovni nazivni podaci generatora, kao i glavne konstrukcione karakteristike, prikazani su u Tabeli 4.1.1.

Tabela 4.1.1 Konstrukcione karakteristike i nazivni podaci generatora

Parametar	Vrijednost	Parametar	Vrijednost
Spoljašnji prečnik statora	9480 mm	Nominalna snaga	109.6 MVA
Unutrašnji prečnik statora	8796 mm	Nominalni napon	15.65 kV
Širina vazdušnog procjepa	24.55~24.76 mm	Nominalna struja	4043.3 A
Prečnik osovine	970 mm	Faktor snage	0.95
Prečnik rotora	1600 mm	Frekvencija	50 Hz
Visina kućišta	1450 mm	Nominalna brzina	136.4 min <sup>-1</sup>
Dužina krajnjeg namotaja	458 mm (vrh)	Maksimalna vrijednost brzine	245 min <sup>-1</sup>
	478 mm (dno)	Nominalni pobudni napon	288 V
Broj žljebova statora	462	Nominalna pobudna struja	1251 A
Broj polova	44	Klasa izolacije	F
Broj navojaka po fazi	77	Masa statora	150 t
Gustina struje	3.18 A/m <sup>2</sup> (stator)	Masa rotora	310 t
	2.45 A/m <sup>2</sup> (rotor)		

Kao što je poznato iz opšte literature o sinhronim mašinama, ukoliko bi se trofazni kratki spoj dogodio pri nominalnoj vrijednosti napona na krajevima generatora, kroz namotaj

statora bi protекla struja kratkog spoja koja bi imala ogromne vrijednosti (mnogostruko puta veće od nominalne vrijednosti) i koja bi dovela do oštećenja statorskog namotaja. Stoga, prilikom izvođenja eksperimenata na realnom sinhronom generatoru, napon na krajevima generatora prije kratkog spoja je podešen na niže vrijednosti od nominalne – 20%, 30% ili 50% nominalne vrijednosti. Blok dijagram eksperimentalne postavke i procedure za estimaciju parametara generatora prikazan je na slici 4.1.3.



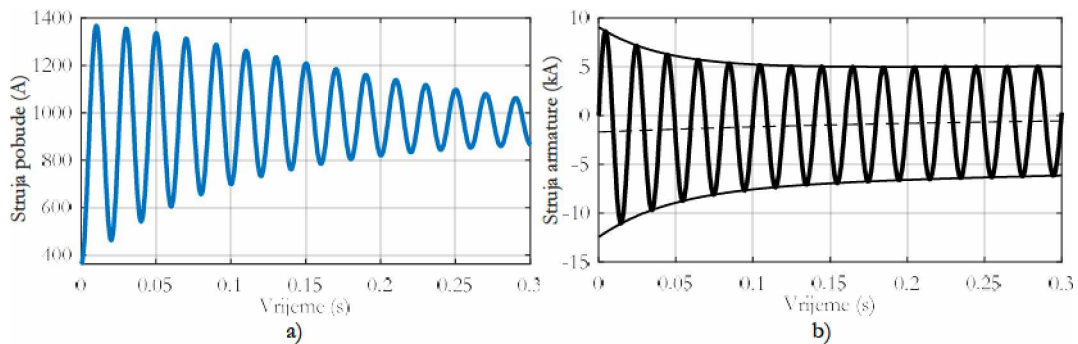
Slika 4.1.3 Blok dijagram eksperimentalne postavke i procedure za estimaciju parametara generatora

Prije izvođenja oglеda kratkog spoja, generator radi u praznom hodu, tj. odvojen je od mreže. Podešavajući pobudnu struju definiše se određena vrijednost napona na krajevima generatora. Istovremenim zatvaranjem trofaznog prekidača vrši se kratko spajanje trofaznog namotaja na statoru i na taj način se dovodi generator u kratak spoj. Za vrijeme trajanja ovog oglеda, vrši se snimanje talasnih oblika struje pobude i struje armature. Nakon završetka oglеda kratkog spoja, eksperimentalno snimljene struje pobude i armature predstavljaju ulazne podatke za identifikacionu proceduru, tj. ekstrakciju parametara sinhronog generatora.

U dostupnoj literaturi mogu se naći matematički izrazi pomoću kojih se opisuju struja pobude i struja armature tokom kratkog spoja. Pomenuti izrazi u sebi sadrže parametre

sinhronog generatora. Primjenom metaheurističkih algoritama vrši se tzv. *curve fitting*, tj. određivanje onih vrijednosti parametara generatora, tako da se talasni oblici struja koji su dobijeni računskim putem što bolje poklope sa eksperimentalno snimljenim talasnim oblicima struja. U cilju dobijanja talasnih oblika struja računskim putem, najprije su iskorišćeni približni analitički izrazi za struju pobude i struju armature, koji zanemaruju određene parametre generatora. Takođe, u cilju određivanja većeg broja parametara generatora, razmatrani su precizniji matematički izrazi za struje pobude i armature, koji se baziraju na inverznoj Laplasovoj transformaciji i kod kojih se ne uvode nikakve matematičke aproksimacije niti zanemarivanja pojedinih parametara generatora.

Tipični talasni oblici struje pobude i struje armature sinhronog generatora tokom testa trofaznog kratkog spoja dati su na slici 4.1.4.



Slika 4.1.4 Tipični talasni oblici struje a) pobude b) armature tokom trofaznog kratkog spoja

## 4.2 Estimacija parametara sinhronog generatora korišćenjem približnih analitičkih izraza

U dostupnoj literaturi koja se bavi teorijom sinhronih mašina, mogu se pronaći pojednostavljeni, približni, analitički izrazi za struju pobude i struju armature sinhronog generatora tokom trajanja trofaznog kratkog spoja [88]. U okviru ove doktorske disertacije, najprije je izvršena estimacija parametara sinhronog generatora bazirana na primjeni približnih analitičkih izraza, kako za struju pobude, tako i za struju armature.

### 4.2.1 Estimacija parametara sinhronog generatora korišćenjem približnog analitičkog izraza za struju pobude

Na osnovu modela sinhronog generatora koji je opisan u Poglavlju 1, približan izraz za struju pobude tokom opisanog ogleada trofaznog kratkog spoja je:

$$i_F(t) = i_{F0} + i_{F0} \cdot \frac{X_d - X_d'}{X_d'} \cdot \left[ e^{-\frac{t}{T_d'}} - \left( 1 - \frac{T_{kd}}{T_d''} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T_d''}} - \frac{T_{kd}}{T_d''} \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) \right], \quad (4.1)$$

pri čemu pojedini članovi u prethodnom izrazu imaju sljedeća značenja:

- $i_{F0}$  je vrijednost pobudne struje uoči kratkog spoja i ovaj podatak se smatra poznatim,
- $X_d$  je sinhrona reaktansa generatora po  $d$ -osi,
- $X_d'$  je tranzijenta reaktansa generatora po  $d$ -osi,
- $T_d'$  je tranzijentna vremenska konstanta kratkog spoja po  $d$ -osi,
- $T_d''$  je subtranzijentna vremenska konstanta kratkog spoja po  $d$ -osi,
- $T_a$  je vremenska konstanta namotaja armature,
- $T_{kd}$  je vremenska konstanta prigušnog namotaja po  $d$ -osi,
- $\omega_0$  je brzina obitanja rotora tokom kratkog spoja (smatra se da je konstantna i jednaka sinhronoj brzini).

Veze između parametara generatora koji figurišu u formuli (4.1) i parametara ekvivalentnih kola sinhronog generatora sa slika 1.4.3 i 1.4.4 date su sljedećim relacijama:

$$X_d = X_{AD} + x_d, \quad (4.2)$$

$$X_d' = x_d + \frac{X_{AD} \cdot x_F}{X_{AD} + x_F}, \quad (4.3)$$

$$T_d' = \frac{1}{\omega \cdot R_F} \cdot \left( x_F + \frac{X_{AD} \cdot x_d}{X_{AD} + x_d} \right), \quad (4.4)$$

$$T_d'' = \frac{1}{\omega \cdot R_D} \cdot \left( x_D + \frac{X_{AD} \cdot x_d \cdot x_F}{X_{AD} \cdot x_d + X_{AD} \cdot x_F + x_d \cdot x_F} \right), \quad (4.5)$$

$$T_a = \frac{x_d}{\omega \cdot R_a}, \quad (4.6)$$

$$T_{kd} = \frac{x_D}{\omega \cdot R_D}, \quad (4.7)$$

gdje  $\omega$  predstavlja sinhronu brzinu, dok su sa  $X$  označene pojedine reaktanse koje odgovaraju induktivnostima sa ekvivalentnih kola sa slika 1.4.3 i 1.4.4, odnosno:

- $X_{AD} = \omega \cdot L_{AD}$  – reaktansa magnećenja namotaja statora po  $d$ -osi,

- $x_d = \omega \cdot l_d$  – reaktansa rasipanja namotaja statora po  $d$ -osi,
- $x_F = \omega \cdot l_F$  – reaktansa rasipanja pobudnog namotaja,
- $x_D = \omega \cdot l_D$  – reaktansa rasipanja puigušnog namotaja po  $d$ -osi.

U sklopu istraživanja koja su sprovedena u sklopu ove disertacije i publikovana u [73], predložen je adaptivni BWO (A-BWO) algoritam za estimaciju parametara sinhronog generatora. Parametri generatora su estimirani sa ciljem da se postigne minimalno odstupanje talasnog oblika pobudne struje dobijene računskim putem od eksperimentalno izmjerene pobudne struje. U skladu sa tim, kriterijumska funkcija je data sljedećom relacijom:

$$f = \frac{\sum_{k=1}^N (i_{F,eks}(k) - i_{F,raz}(k))^2}{\sum_{k=1}^N i_{F,eks}(k)^2}, \quad (4.8)$$

gdje  $N$  predstavlja broj mjerenja (broj mjernih tačaka),  $i_{F,eks}$  je eksperimentalno dobijena pobudna struja, dok  $i_{F,raz}$  označava pobudnu struju koja je proračunata korišćenjem relacije (4.1). Estimacija parametara je izvršena za slučaj kada napon na krajevima generatora uoči kratkog spoja iznosi 20% nominalnog napona. U ovom slučaju, maksimalni broj iteracija algoritma je podešen na 50, dok je veličina populacije 30. U Tabeli 4.2.1 data su ograničenja optimizacionih varijabli, tj. parametara sinhronog generatora.

Tabela 4.2.1 Donja i gornja granica optimizacionih varijabli

Parametar	$X_d(\Omega)$	$X_d'(\Omega)$	$T_d'(s)$	$T_d''(s)$	$T_a(s)$	$T_{kd}(s)$
Donja granica	2	0.7	2	0.04	0.2	0.02
Gornja granica	2.5	0.8	2.5	0.05	0.3	0.04

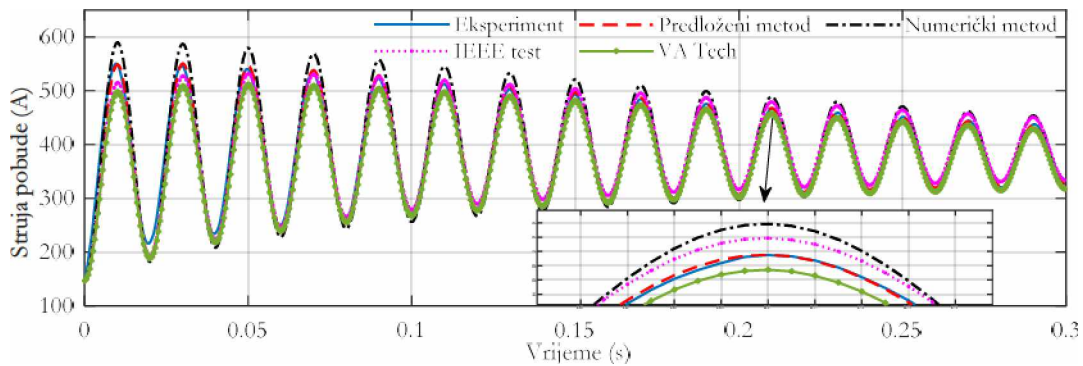
Estimacija parametara korišćenjem prethodno opisanih podešavanja algoritma sprovedena je primjenom originalnog BWO algoritma, kao i predloženog modifikovanog A-BWO algoritma. Proračunati parametri upoređeni su sa parametrima koji su dobijeni primjenom numeričke metode u [71], zatim sa parametrima koji su dobijeni primjenom standardnih IEEE testova, kao i sa parametrima koji su dati u kataloškim podacima kompanije *VA Tech*. U Tabeli 4.2.2 prikazane su vjiednosti parametara generatora koje su dobijene primjenom pomenutih metoda, kao i odgovarajuće vjiednosti kriterijumske funkcije.



Tabela 4.2.2 Vrijednosti parametara i kriterijumske funkcije za različite metode

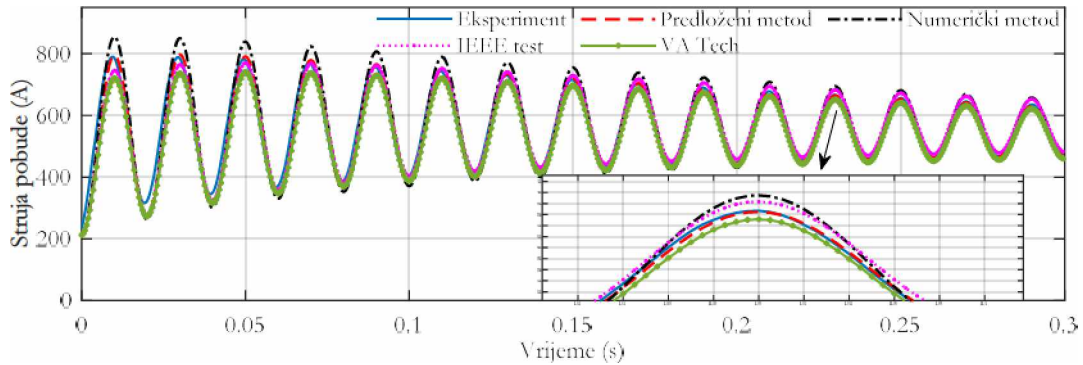
Metod	A-BWO	BWO	Numerički [71]	IEEE testovi	VA Tech
$X_d (\Omega)$	2.1518	2.1586	2.1474	2.1474	2.1005
$X_d' (\Omega)$	0.7652	0.7668	0.7489	0.7441	0.7597
$T_d' (s)$	2.199	2.1821	2.065	2.31	2.073
$T_d'' (s)$	0.0422	0.0419	0.041	0.0466	0.0457
$T_a (s)$	0.2279	0.2302	0.248	0.263	/
$T_{kd} (s)$	0.0315	0.031	0.033	0.03	/
$f$	$4.86 \cdot 10^{-4}$	$4.87 \cdot 10^{-4}$	$14.25 \cdot 10^{-4}$	$13.76 \cdot 10^{-4}$	$14.92 \cdot 10^{-4}$

Takođe, na slici 4.2.1 dato je grafičko poređenje talasnih oblika eksperimentalno dobijene struje pobude sa talasnim oblicima struje pobude proračunate korišćenjem parametara iz prethodne tabele. S obzirom na to da u katalogima kompanije *VA Tech* nisu date vrijednosti za parametre  $T_a$  i  $T_{kd}$ , za svrhu simulacije iskorišćene su vrijednosti dobijene pomoću IEEE testova.

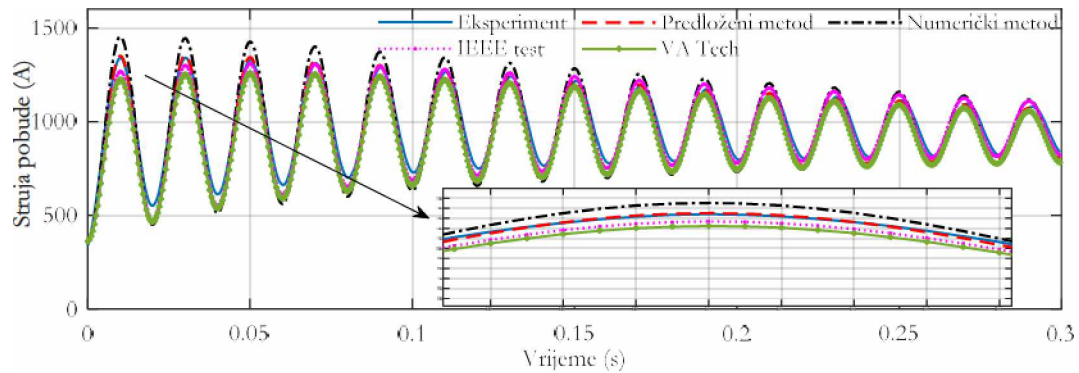


Slika 4.2.1 Grafičko poređenje talasnih oblika pobudne struje prilikom ogleđa kratkog spoja (pri naponu generatora koji iznosi 20% nominalne vrijednosti)

U cilju utvrđivanja tačnosti određenih parametara pri drugim radnim uslovima, iskorišćeni su eksperimentalno dobijeni talasni oblici struje pobude u slučajevima kada napon generatora uoči kratkog spoja iznosi 30% i 50% nominalnog napona. Naime, primjenom parametara iz prethodne tabele, izračunata je struja pobude za slučajeve kada je vrijednost napona generatora prije kratkog spoja 30% i 50% nominalne vrijednosti. Na slikama 4.2.2 i 4.2.3 prikazano je grafičko poređenje talasnih oblika pobudnih struja koje su dobijene računskim putem sa eksperimentalno snimljenim strujama pobude.



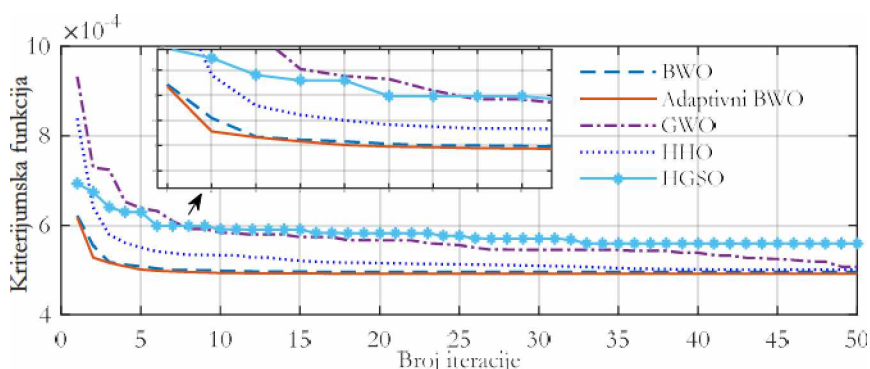
Slika 4.2.2 Grafičko poređenje talasnih oblika pobudne struje prilikom ogleđa kratkog spoja (pri naponu generatora koji iznosi 30% nominalne vrijednosti)



Slika 4.2.3 Grafičko poređenje talasnih oblika pobudne struje prilikom ogleđa kratkog spoja (pri naponu generatora koji iznosi 50% nominalne vrijednosti)

Na bazi prethodno prikazanih rezultata, jasno se može uočiti da se talasni oblik struje pobude koji je izračunat primjenom parametara određenih pomoću predloženog A-BWO algoritma najbolje poklapa sa eksperimentalno snimljenim talasnim oblikom pobudne struje. Shodno tome, zaključuje se da je predloženi modifikovani metod za estimaciju parametara sinhronog generatora superiorniji u odnosu na ostala tu metoda korišćena za poređenje.

Osim toga, sprovedeno je i poređenje predloženog A-BWO algoritma sa originalnim BWO algoritmom [94], kao i sa HHO algoritmom [107], HGSO (*Henry Gas Solubility Optimization*) algoritmom [108] i GWO algoritmom [95]. Pomenuti algoritmi su primijenjeni za estimaciju parametara sinhronog generatora, pri čemu su podešavanja svih algoritama identična, kako bi poređenje bilo validno – kriterijumska funkcija je data relacijom (4.8), veličina populacije je 30, a maksimalni broj iteracija je 50. Na slici 4.2.4 prikazane su konvergenzijske krive svih prethodno pomenutih algoritama.



Slika 4.2.4 Konvergenzijske krive algoritama prilikom estimacije parametara sinhronog generatora pomoću struje pobude

Na osnovu prikazanog poređenja konvergenzijskih krivih jasna je prednost predloženog algoritma u odnosu na ostale posmatrane algoritme. Naime, predloženi A-BWO algoritam konvergira brže ka optimalnom rješenju od ostala 4 algoritma.

#### 4.2.2 Estimacija parametara sinhronog generatora korišćenjem približnog analitičkog izraza za struju armature

Analogno aproksimativnom izrazu za struju pobude, polazeći od matematičkog modela sinhronog generatora koji je detaljno prikazan u Poglavlju 1, dobija se sljedeći približni izraz za struju armature tokom oglada trofaznog kratkog spoja:

$$i_a(t) = U_m \cdot \left[ \frac{1}{X_d} + \left( \frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T_d'}} + \left( \frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T_d''}} \right] \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + \lambda) - \frac{U_m}{2} \cdot \left( \frac{1}{X_d''} + \frac{1}{X_q''} \right) e^{-\frac{t}{T_s}} \cdot \cos(\lambda) - \frac{U_m}{2} \cdot \left( \frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_q''} \right) e^{-\frac{t}{T_s}} \cdot \cos(2 \cdot \omega_0 \cdot t + \lambda). \quad (4.9)$$

Parametri sinhronog generatora koji figurišu u prethodnoj relaciji, a koji nisu bili spomenuti u relaciji (4.1), su sljedeći:

- $U_m$  je amplituda faznog napona statora prije kratkog spoja,
- $X_d''$  je subtranzijentna reaktansa generatora po  $d$ -osi,
- $X_q''$  je subtranzijentna reaktansa generatora po  $q$ -osi,
- $\lambda$  je ugao između faze A i direktne ose u trenutku kada se dogodi kratak spoj.

Veze između subtranzijentnih reaktansi  $X_d''$  i  $X_q''$  i parametara ekvivalentnih kola sinhronog generatora date su sljedećim relacijama:

$$X_d'' = x_d + \frac{X_{AD} \cdot x_F \cdot x_D}{X_{AD} \cdot x_d + X_{AD} \cdot x_F + x_d \cdot x_F}, \quad (4.10)$$

$$X_q'' = x_q + \frac{X_{AQ} \cdot x_Q}{X_{AQ} + x_Q}, \quad (4.11)$$

pri čemu su  $x_q$ ,  $X_{AQ}$  i  $x_Q$  reaktanse koje odgovaraju induktivnostima koje figurišu u ekvivalentnom kolu sinhronog generatora po  $q$ -osi (slika 1.4.4), odnosno:

- $x_q = \omega \cdot l_q$  – reaktansa rasipanja namotaja statora po  $q$ -osi,
- $X_{Aq} = \omega \cdot L_{Aq}$  – reaktansa magnećenja namotaja statora po  $q$ -osi,
- $x_Q = \omega \cdot l_Q$  – reaktansa rasipanja prigušnog namotaja po  $q$ -osi.

U okviru istraživanja koje je prezentovano u radu [74], predložena je haotična modifikacija EO algoritma (C-EO algoritam) u cilju estimacije parametara sinhronog generatora. Preciznije, parametri generatora su estimirani tako da se postigne što bolje poklapanje između struje armature koja je dobijena računskim putem i eksperimentalno snimljene struje armature generatora tokom oglada trofaznog kratkog spoja. U cilju estimacije parametara sinhronog generatora korišćenjem predloženog C-EO algoritma i eksperimentalno snimljene struje armature, predložena su dva pristupa. Za oba pristupa podešavanja metaheurističkog C-EO algoritma su identična – maksimalni broj iteracija je 50, a veličina populacije je 30. Ograničenja optimizacionih varijabli, tj. parametara generatora, data su u Tabeli 4.2.3. Granice parametara generatora su postavljene u opsegu  $\pm 10\%$  od vrijednosti parametara generatora određenih pomoću standardnih IEEE testova.

Tabela 4.2.3 Donja i gornja granica optimizacionih varijabli

Parametar	$X_d$ ( $\Omega$ )	$X_d'$ ( $\Omega$ )	$X_d''$ ( $\Omega$ )	$X_q''$ ( $\Omega$ )	$T_d'$ (s)	$T_d''$ (s)	$T_a$ (s)
<b>Donja granica</b>	1.926	0.669	0.377	0.377	2.07	0.041	0.236
<b>Gornja granica</b>	2.37	0.818	0.4615	0.4615	2.541	0.051	0.2895

Takođe, za oba pristupa je zajedničko to da je za svrhu estimacije parametara iskorišćen slučaj kada je napon generatora uoči kratkog spoja 50% nominalnog napona. Ostala dva slučaja, kada napon generatora prije kratkog spoja ima vrijednosti 20% i 30% nominalnog napona, iskorišćena su za verifikaciju estimiranih parametara.

Prvi predloženi pristup bazira se na estimaciji parametara generatora sa ciljem poklapanja eksperimentalnog i računski određenog talasnog oblika ukupne struje armature

tokom kratkog spoja (relacija (4.9)). Stoga, kriterijumska funkcija za prvi predloženi pristup ( $f_1$ ) data je sljedećom relacijom:

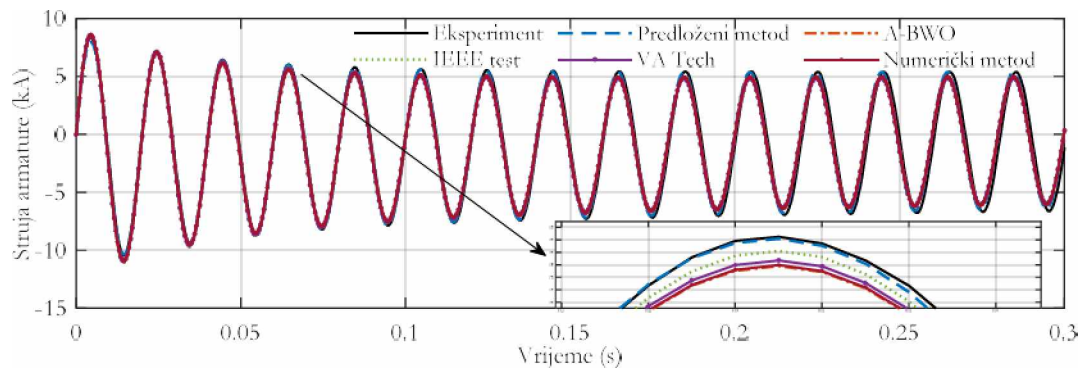
$$f_1 = \frac{\sum_{k=1}^N (i_{a,ekz}(k) - i_{a,rac}(k))^2}{\sum_{k=1}^N i_{a,ekz}(k)^2}, \quad (4.12)$$

gdje je  $i_{a,ekz}$  eksperimentalno dobijena struja armature generatora tokom kratkog spoja, dok je  $i_{a,rac}$  odgovarajuća struja armature dobijena računskim putem, pomoću relacije (4.9). U cilju poređenja predloženog metoda sa ostalim metodama iz literature, odabrani su rezultati dobijeni pomoću A-BWO algoritma [73] (predstavljani u prethodnom potpoglavlju), numeričkog algoritma [71], IEEE testova i rezultati dobijeni iz kataloga kompanije *VA Tech*. U Tabeli 4.2.4 prikazane su vrijednosti parametara generatora i odgovarajuće vrijednosti kriterijumske funkcije  $f_1$ , za svaki od prethodno pomenutih metoda.

**Tabela 4.2.4** Vrijednosti parametara i kriterijumske funkcije za različite metode

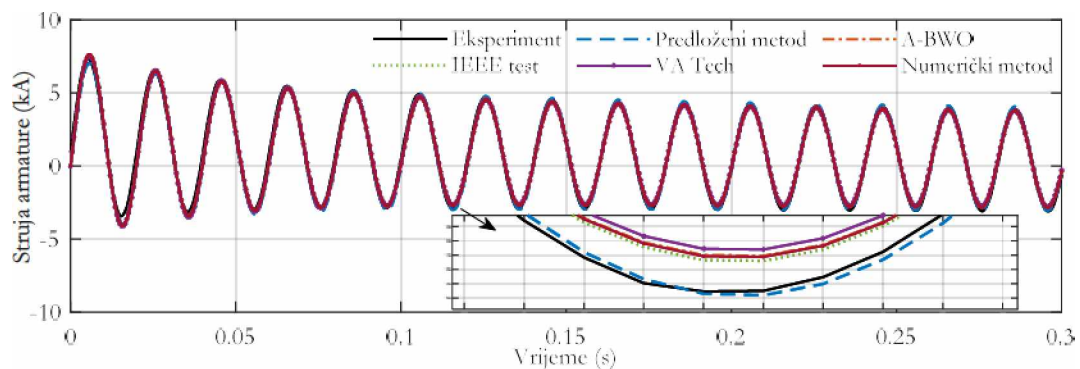
Metod	C-EO	A-BWO	Numerički [71]	IEEE testovi	<i>VA Tech</i>
$X_g(\Omega)$	2.1573	2.1518	2.1474	2.1474	2.1005
$X_g'(\Omega)$	0.6989	0.7652	0.7489	0.7441	0.7597
$X_g''(\Omega)$	0.4605	/	/	0.4192	0.4246
$X_d''(\Omega)$	0.4545	/	/	/	/
$T_d'(s)$	2.1649	2.1990	2.065	2.3100	2.0730
$T_d''(s)$	0.0490	0.0422	0.041	0.0466	0.0457
$T_a(s)$	0.2767	0.2279	0.248	0.2630	/
$f_1$	0.0141	0.019	0.0177	0.0165	0.018

S obzirom na to da u katalogima kompanije *VA Tech* nije date vrijednost parametra  $T_a$ , za svrhu simulacije iskorišćena je vrijednost dobijena pomoću IEEE testova. Identična napomena važi i za subtranzijentnu reaktansu  $X_d''$ . Takođe, s obzirom na to da nijedan od metoda korišćenih za poređenje ne omogućava određivanje subtranzijentne reaktanse  $X_g''$ , usvojeno je da je vrijednost ove reaktanse identična kao i  $X_d''$ . Na slici 4.2.5 dato je grafičko poređenje struje armature dobijene eksperimentalnim putem, kao i računskim putem primjenom analitičkog izraza (4.9) i parametara prikazanih u Tabeli 4.2.4.

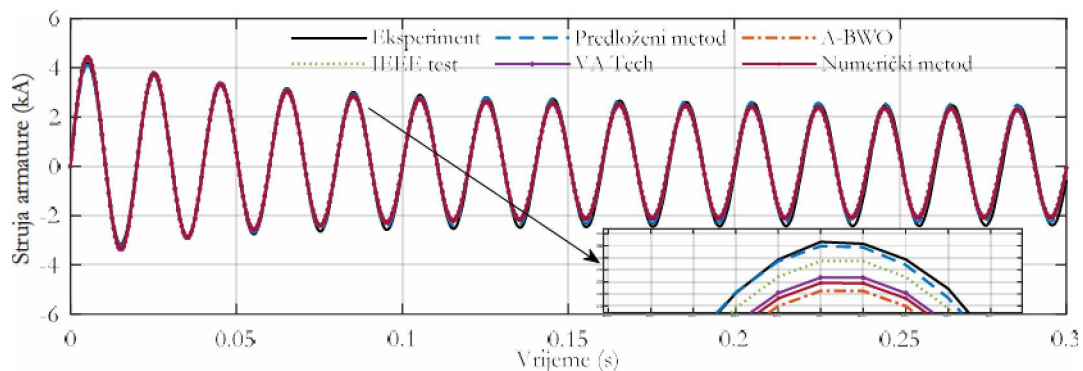


Slika 4.2.5 Grafičko poređenje talasnih oblika struje armature prilikom ogleđa kratkog spoja (pri naponu generatora koji iznosi 50% nominalne vrijednosti)

Radi verifikacije dobijenih rezultata, talasni oblici struje armature tokom kratkog spoja su izračunati korišćenjem analitičkog izraza (4.9) i primjenom parametara iz prethodne tabele, za slučajeve kada je napon na krajevima generatora prije ogleđa kratkog spoja 20% i 30% nominalne vrijednosti. Na slikama 4.2.6 i 4.2.7 prikazano je grafičko poređenje talasnih oblika struje armature koji su dobijeni računskim putem sa odgovarajućim eksperimentalno utvrđenim talasnim oblicima.



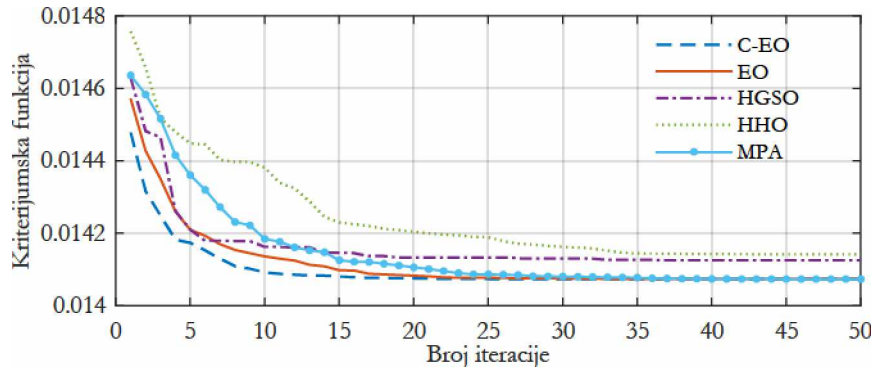
Slika 4.2.6 Grafičko poređenje talasnih oblika struje armature prilikom ogleđa kratkog spoja (pri naponu generatora koji iznosi 20% nominalne vrijednosti)



Slika 4.2.7 Grafičko poređenje talasnih oblika struje armature prilikom oglada kratkog spoja (pri naponu generatora koji iznosi 30% nominalne vrijednosti)

Na osnovu dobijenih vrijednosti kriterijumske funkcije, kao i na osnovu poređenja talasnih oblika struje armature, jasno se uočava da je najbolje poklapanje izračunatih i eksperimentalnih talasnih oblika struje armature dobijeno kada se primijene parametri određeni predloženim pristupom. Stoga, može se zaključiti da je predloženi metod bolji od ostalih metoda koji su primijenjeni za svrhu poređenja.

Takođe, osim prethodnog, izvršeno je poređenje predloženog C-EO algoritma sa nekoliko drugih metaheurističkih algoritama koji se mogu naći u dostupnoj literaturi – originalnim EO algoritmom [91], zatim HHO algoritmom [107], HGSO algoritmom [108] i algoritmom morskih predatora (MPA – *Marine Predator Algorithm*) [109]. Svi pomenuti algoritmi su primijenjeni za estimaciju parametara sinhronog generatora pomoću pristupa koji je prethodno opisan, sa identičnim podešavanjima parametara za sve algoritme – veličina populacije je 30, maksimalni broj iteracija je 50, a kriterijumska funkcije je data izrazom (4.12). Na slici 4.2.8 dato je poređenje konvergencijskih krivih za sve prethodno pomenute algoritme. Sa prikazane slike jasno je vidljivo da predloženi C-EO algoritam najbrže konvergira ka optimalnom rješenju. Na osnovu toga, zaključuje se da predloženi C-EO algoritam pokazuje superiornije performanse od ostalih algoritama korišćenih za komparativnu analizu.



Slika 4.2.8 Konvergenzijske krive algoritama prilikom estimacije parametara sinhronog generatora pomoću struje armature – prvi pristup

Drugi pristup bazira se na dekompoziciji struje armature na dvije komponente – asimetričnu i periodičnu komponentu, kao što je detaljno opisano u [88]. Naime, ukupna struja armature tokom kratkog spoja može se razložiti na asimetričnu komponentu  $i_{asim}(t)$  i periodičnu komponentu  $i_{per}(t)$ . Približni analitički izrazi za računanje ove dvije komponente su [88]:

$$i_{asim}(t) = -\frac{U_m}{2} \cdot \left( \frac{1}{X_d''} + \frac{1}{X_q''} \right) e^{-\frac{t}{T_s}} \cdot \cos(\lambda), \quad (4.13)$$

$$i_{per}(t) = U_m \cdot \left[ \frac{1}{X_d} + \left( \frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T_d'}} + \left( \frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T_d''}} \right] \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + \lambda) - \frac{U_m}{2} \cdot \left( \frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_q''} \right) e^{-\frac{t}{T_s}} \cdot \cos(2 \cdot \omega_0 \cdot t + \lambda). \quad (4.14)$$

Takođe, na osnovu eksperimentalno dobijenog oscilograma struje armature, moguće je datu struju razložiti na pomenute dvije komponente. Naime, prvo je potrebno nacrtati gornju i donju anvelopu talasnog oblike struje armature (slika 4.1.4 b)). Nakon toga, asimetrična komponenta se dobija kao kriva koja predstavlja sredinu između donje i gornje anvelope (isprekidana crna linija na slici 4.1.4 b)). Periodična komponenta se dobija vrlo jednostavno, oduzimanjem asimetrične komponente od ukupne struje armature.

Stoga, drugi pristup za estimaciju parametara generatora korišćenjem struje armature zasnovan je na simultanom poklapanju (*curve fitting*) asimetrične komponente (izračunate pomoću izraza (4.13) sa eksperimentalno snimljenom) i periodične komponente. (izračunate



pomoću izraza (4.14) sa eksperimentalno snimljenom). Kriterijumska funkcija je definisana na sljedeći način:

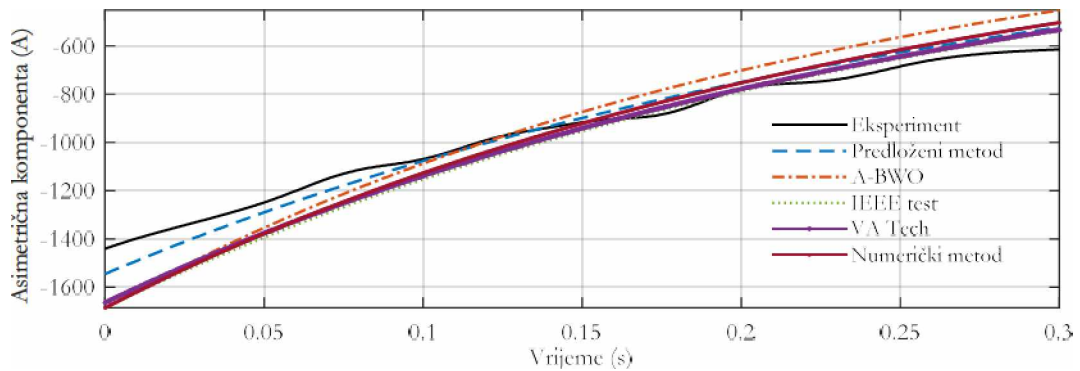
$$f_2 = \frac{\sum_{k=1}^N (i_{asim,eks}(k) - i_{asim,rac}(k))^2}{\sum_{k=1}^N i_{asim,eks}(k)^2} + \frac{\sum_{k=1}^N (i_{per,eks}(k) - i_{per,rac}(k))^2}{\sum_{k=1}^N i_{per,eks}(k)^2}, \quad (4.15)$$

gdje su  $i_{asim,eks}$  i  $i_{per,eks}$  eksperimentalno dobijene asimetrična i periodična komponenta, dok su  $i_{asim,rac}$  i  $i_{per,rac}$  asimetrična i periodična komponenta dobijene računskim putem. Koristeći identična podešavanja algoritma i granice parametara (definisane u Tabeli 4.2.3), izvršena je estimacija parametara generatora koristeći predloženi C-EO algoritam i kriterijumsku funkciju  $f_2$ . Za svrhu komparativne analize, iskorišćeni su isti metodi kao i kod prvog pristupa. U Tabeli 4.2.5 prikazane su vrijednosti parametara generatora i odgovarajuće vrijednosti kriterijumske funkcije  $f_2$ .

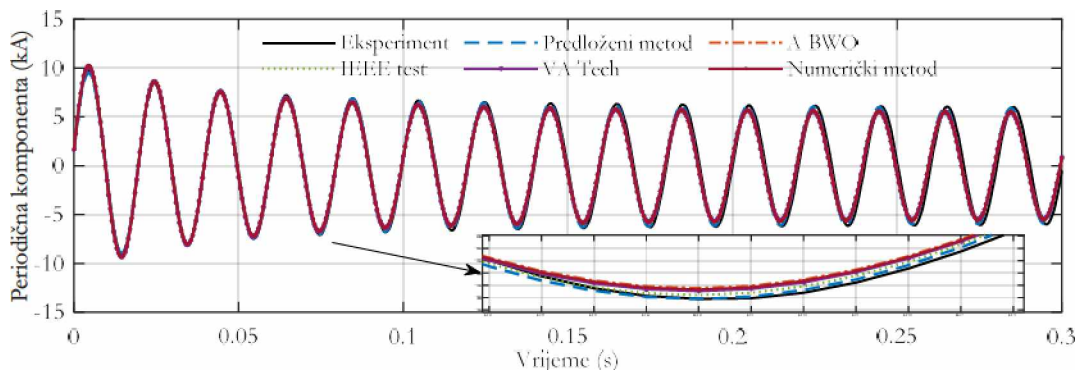
Tabela 4.2.5 Vrijednosti parametara i kriterijumske funkcije za različite metode

Metod	C-EO	A-BWO	Numerički [71]	IEEE testovi	VA Tech
$X_d(\Omega)$	2.3622	2.1518	2.1474	2.1474	2.1005
$X_d'(\Omega)$	0.6949	0.7652	0.7489	0.7441	0.7597
$X_d''(\Omega)$	0.4611	/	/	0.4192	0.4246
$X_q''(\Omega)$	0.4611	/	/	/	/
$T_d'(s)$	2.0790	2.1990	2.065	2.3100	2.0730
$T_d''(s)$	0.0485	0.0422	0.041	0.0466	0.0457
$T_a(s)$	0.2893	0.2279	0.248	0.2630	/
$f_2$	0.0171	0.0317	0.0279	0.027	0.0266

Na slikama 4.2.9 i 4.2.10 prikazane su aperiodična i simetrična komponenta struje armature tokom kratkog spoja, za slučaj kada je napon na krajevima generatora prije kratkog spoja jednak 50% nominalne vrijednosti. Na pomenutim slikama dato je grafičko poređenje eksperimentalnih talasnih oblika sa talasnim oblicima komponenti struje armature koje su dobijene računskim putem, primjenom parametara iz prethodne tabele.

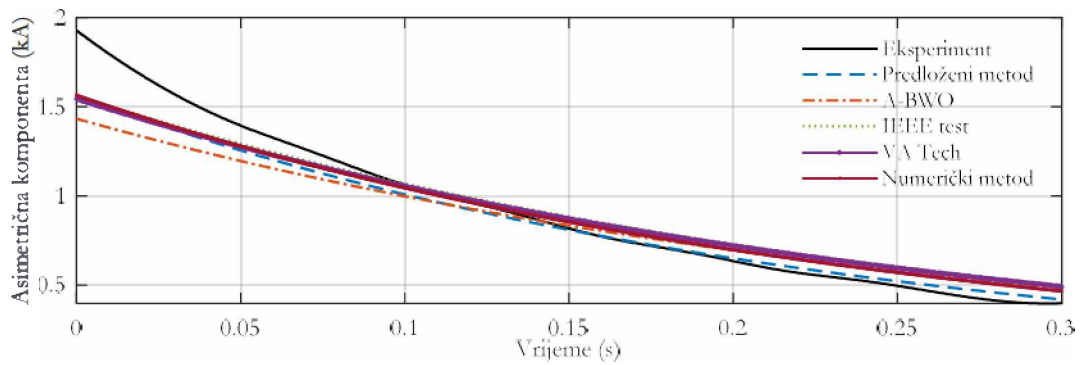


Slika 4.2.9 Grafičko poređenje talasnih oblika asimetrične komponente struje armature prilikom ogleđa kratkog spoja (pri naponu generatora koji iznosi 50% nominalne vrijednosti)

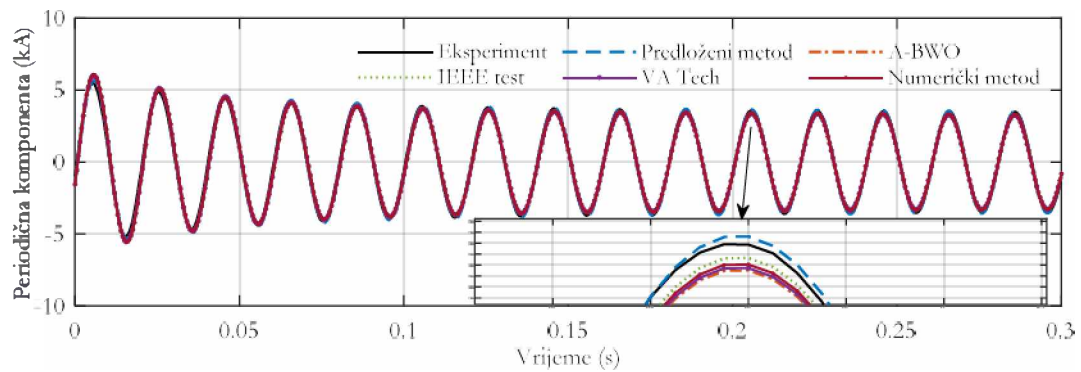


Slika 4.2.10 Grafičko poređenje talasnih oblika periodične komponente struje armature prilikom ogleđa kratkog spoja (pri naponu generatora koji iznosi 50% nominalne vrijednosti)

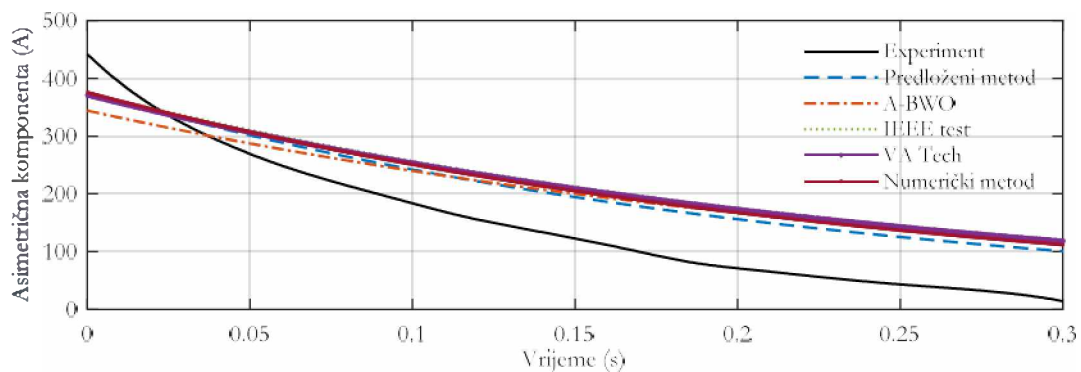
Nakon estimacije parametara, neophodno je izvršiti verifikaciju tako određenih parametara pri drugim radnim uslovima. Naime, koristeći prethodno estimirane parametre, talasni oblici asimetrične i periodične komponente struje armature su izračunati za slučajeve kada napon generatora uoči kratkog spoja iznosi 20% i 30% nominalne vrijednosti. Na slikama 4.2.11 – 4.2.14 prikazano je grafičko poređenje izračunatih talasnih oblika aperiodične i simetrične komponente struje armature sa odgovarajućim eksperimentalno utvrđenim talasnim oblicima.



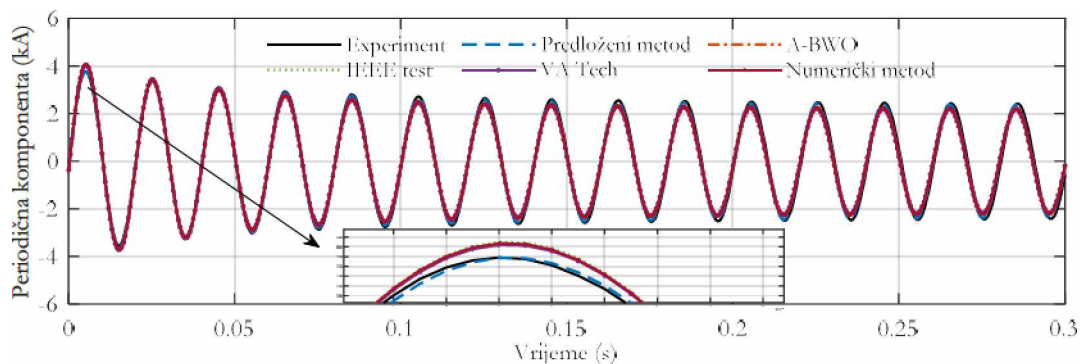
Slika 4.2.11 Grafičko poređenje talasnih oblika asimetrične komponente struje armature prilikom ogleđa kratkog spoja (pri naponu generatora koji iznosi 30% nominalne vrijednosti)



Slika 4.2.12 Grafičko poređenje talasnih oblika periodične komponente struje armature prilikom ogleđa kratkog spoja (pri naponu generatora koji iznosi 30% nominalne vrijednosti)



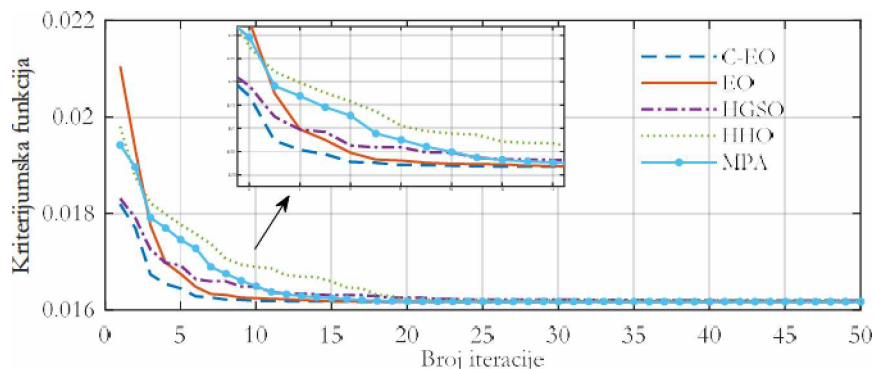
Slika 4.2.13 Grafičko poređenje talasnih oblika asimetrične komponente struje armature prilikom ogleđa kratkog spoja (pri naponu generatora koji iznosi 20% nominalne vrijednosti)



Slika 4.2.14 Grafičko poređenje talasnih oblika periodične komponente struje armature prilikom ogleđa kratkog spoja (pri naponu generatora koji iznosi 20% nominalne vrijednosti)

Na osnovu prezentovanih rezultata, kako numeričkih (vrijednosti kriterijumske funkcije) tako i grafičkih, zaključuje se da je i drugi pristup za estimaciju parametara generatora korišćenjem struje armature superiorniji od ostalih metoda za identifikaciju parametara, koji su korišćeni u cilju poređenja.

Na kraju, predloženi C-EO algoritam je upoređen sa istim metaheurističkim algoritmima kao i kod prvog pristupa – originalnim EO algoritmom, HGSO algoritmom, HHO algoritmom i MPA algoritmom. Kako bi poređenje bilo validno, svi algoritmi su primijenjeni za estimiranje parametara sinhronog generatora koristeći drugi predloženi pristup i sa identičnim podešavanjima – veličina populacije 30, maksimalni broj iteracija 50, a kriterijumska funkcija je data relacijom (4.15). Na slici 4.2.15 prikazane su konvergenzijske krive svih prethodno pomenutih algoritama. Sa prikazanog grafika jasno je da predloženi C-EO algoritam najbrže konvergira, odnosno dostiže optimalno rješenje za najmanji broj iteracija. Stoga, zaključuje se da je i kod drugog pristupa predloženi C-EO algoritam bolji od svih ostalih algoritama koji su iskorišćeni za svrhu poređenja.



Slika 4.2.15 Konvergenzijske krive algoritama prilikom estimacije parametara sinhronog generatora pomoću struje armature – drugi pristup

### 4.3 Estimacija parametara sinhronog generatora korišćenjem potpunih izraza za struju pobude i struju armature

U ovom potpoglavlju predložen je modifikovani, poboljšani metod za identifikaciju parametara sinhronog generatora koji se bazira na ogledu trofaznog kratkog spoja. U prethodnom potpoglavlju parametri generatora su estimirani korišćenjem približnih analitičkih izraza za struju pobude i struju armature. Kod poboljšanog metoda, koji je razvijen u ovoj disertaciji, približni izrazi za struju pobude i struju armature zamijenjeni su potpunim i preciznim izrazima, koji su definisani u Laplasovom s-domenu. Estimacija parametara sinhronog generatora izvršena je pomoću hibridnog EO-GWO algoritma, čiji opis je detaljno dat u Poglavlju 2.

U cilju izvođenja izraza za struju pobude i struju armature tokom kratkog spoja, najprije se polazi od naponskih jednačina za namotaje sinhronog generatora (1.47). Naime, primjenom Laplasove transformacije na pomenuti sistem jednačina, dobija se sljedeći sistem jednačina zapisan u matricnoj formi:

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ -V_F \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_r + s \cdot L_d & \omega \cdot L_q & s \cdot L_{AD} & s \cdot L_{AD} & \omega \cdot L_{AQ} \\ -\omega \cdot L_d & R_r + s \cdot L_q & -\omega \cdot L_{AD} & -\omega \cdot L_{AD} & s \cdot L_{AQ} \\ s \cdot L_{AD} & 0 & R_F + s \cdot L_F & s \cdot L_{AD} & 0 \\ s \cdot L_{AD} & 0 & s \cdot L_{AD} & R_D + s \cdot L_D & 0 \\ 0 & s \cdot L_{AQ} & 0 & 0 & R_Q + s \cdot L_Q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_F \\ I_D \\ I_Q \end{bmatrix}. \quad (4.16)$$

Ukoliko se iz prethodnog sistema jednačina eliminišu struje  $I_F$ ,  $I_D$  i  $I_Q$ , sistem od 5 jednačina se svodi na sistem od dvije jednačine:

$$\begin{bmatrix} V_d - s \cdot G(s) \cdot V_F \\ V_q + \omega \cdot G(s) \cdot V_F \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_r + s \cdot L_d(s) & \omega \cdot L_q(s) \\ -\omega \cdot L_d(s) & R_r + s \cdot L_q(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix}, \quad (4.17)$$

gdje je  $L_d(s)$  operatorska induktivnost po  $d$ -osi,  $L_q(s)$  operatorska induktivnost po  $q$ -osi i  $G(s)$  operatorska prenosna funkcija:

$$L_d(s) = l_a + \left( \frac{1}{L_{AD}} + \frac{1}{\frac{R_F}{s} + L_F} + \frac{1}{\frac{R_D}{s} + L_D} \right)^{-1}, \quad (4.18)$$

$$L_d(s) = l_a + \left( \frac{1}{L_{AQ}} + \frac{1}{\frac{R_Q}{s} + L_Q} \right)^{-1}, \quad (4.19)$$

$$G(s) = \frac{(R_s + s \cdot L_d) \cdot L_{AD} - s \cdot L_{AD}^2}{(R_F + s \cdot L_F) \cdot (R_s + s \cdot L_d) - s \cdot L_{AD}^2}. \quad (4.20)$$

Nakon faktorizacije polinoma i uvođenja vremenskih konstanti generatora, navedene prenosne funkcije se mogu zapisati u alternativnom obliku:

$$L_d(s) = L_d \cdot \frac{(1 + s \cdot T_d') \cdot (1 + s \cdot T_d'')}{(1 + s \cdot T_{d0}') \cdot (1 + s \cdot T_{d0}'')}, \quad (4.21)$$

$$L_q(s) = L_q \cdot \frac{1 + s \cdot T_q''}{1 + s \cdot T_{q0}''}, \quad (4.22)$$

$$G(s) = \frac{1 + s \cdot T_{kd}}{(1 + s \cdot T_{d0}') \cdot (1 + s \cdot T_{d0}'')} \cdot \frac{L_{AD}}{R_F}. \quad (4.23)$$

Veze između vremenskih konstanti  $T_d'$ ,  $T_d''$  i  $T_{kd}$  i parametara zamjenskih šema sinhronog generatora date su u prethodnom potpoglavlju, dok se za ostale vremenske konstante te veze definišu shodno sljedećim relacijama:

$$T_{d0}' = \frac{L_F}{R_F}, \quad (4.24)$$

$$T_{d0}'' = \frac{1}{R_D} \cdot \left( L_D + \frac{l_F \cdot L_{AD}}{l_F + L_{AD}} \right), \quad (4.25)$$

$$T_q'' = \frac{1}{R_Q} \cdot \left( l_Q + \frac{L_{AQ} \cdot l_a}{L_{AQ} + l_a} \right), \quad (4.26)$$

$$T_{q0}'' = \frac{L_Q}{R_Q}. \quad (4.27)$$

U cilju dalje analize, neophodno je izvesti izraze za operatorske oblike magnetnog obuhvatanja po  $d$ -osi  $\Psi_d(s)$  i po  $q$ -osi  $\Psi_q(s)$ . Naime, na osnovu zamjenskih šema sinhronog

generatora po  $d$ -osi i po  $q$ -osi sa slika 1.4.3 i 1.4.4, naponi  $v_d$  i  $v_q$  u  $s$ -domenu mogu se zapisati na sljedeći način:

$$V_d(s) = -\left(R_s \cdot I_d(s) + s \cdot \psi_d(s) + \omega \cdot \psi_q(s)\right), \quad (4.28)$$

$$V_q(s) = -\left(R_s \cdot I_q(s) + s \cdot \psi_q(s) - \omega \cdot \psi_d(s)\right). \quad (4.29)$$

Nakon upoređivanja prethodnih relacija sa relacijom (4.17), operatorski izrazi za magnetna obuhvatanja su:

$$\psi_d(s) = L_d \cdot I_d(s) + G(s) \cdot V_F(s), \quad (4.30)$$

$$\psi_q(s) = L_q \cdot I_q(s). \quad (4.31)$$

Na bazi prethodno sprovedene analize, izvedeni su potpuni izrazi pomoću kojih se računaju struja pobude i struja armature (izrazi dobijeni bez zanemarivanja nekog od parametara generatora). Nakon toga, primjenom predloženog EO-GWO algoritma, estimirani su parametri sinhronog generatora. Prilikom estimacije, postavljen je kriterijum minimizacije kvadrata greške, tj. odstupanja izračunate struje od eksperimentalno izmjerene struje.

#### 4.3.1 Estimacija parametara sinhronog generatora korišćenjem potpunog izraza za struju armature

U cilju određivanja potpunog izraza za struju armature tokom oglada trofaznog kratkog spoja, neophodno je analizirati stanje mašine neposredno prije kratkog spoja. S obzirom na to da je prije kratkog spoja generator radio u režimu praznog hoda, direktna i poprečna komponenta struje statora  $i_d$  i  $i_q$  su jednake 0. Takođe, uoči kratkog spoja generator je radio u ustaljenom režimu, tako da su izvodi magnetnih obuhvatanja takođe jednaki 0. Stoga, naponske jednačine za namotaje po  $d$ -osi i po  $q$ -osi u režimu praznog hoda su:

$$\begin{cases} v_{d0} = 0 \\ v_{q0} = \omega \cdot L_{AD} \cdot i_F = U_m \end{cases}, \quad (4.32)$$

gdje indeks 0 označava da se radi o režimu praznog hoda.

Nakon što se zatvori trofazni prekidač i kratkospoji trofazni namotaj statora, jasno je da su naponi  $v_d$  i  $v_q$  jednaki 0. Na osnovu ovako opisanih promjena napona, prvi izvod napona  $v_d$  i  $v_q$  po vremenu dat je sljedećom relacijom:

$$\begin{cases} \frac{dv_d}{dt} = 0 \\ \frac{dv_q}{dt} = -U_m \end{cases} \quad (4.33)$$

Sa druge strane, prvi izvodi napona  $v_d$  i  $v_q$  mogu se dobiti i diferenciranjem naponskih jednačina koje opisuju ekvivalentna kola sa slika 1.4.3 i 1.4.4:

$$0 = \frac{dv_d}{dt} = - \left( R_s \cdot \frac{di_d}{dt} + \frac{d^2\psi_d}{dt^2} + \omega \cdot \frac{d\psi_q}{dt} \right), \quad (4.34)$$

$$-U_m = \frac{dv_q}{dt} = - \left( R_s \cdot \frac{di_q}{dt} + \frac{d^2\psi_q}{dt^2} - \omega \cdot \frac{d\psi_d}{dt} \right). \quad (4.35)$$

Nakon primjene Laplasove transformacije na izraze (4.34) i (4.35) i uvištavanjem izraza za operatorske oblike magnetnih obuhvatanja (4.30) i (4.31), dobija se sljedeći sistem jednačina zapisan u matricnoj formi:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{U_m}{s} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_s + s \cdot L_d(s) & \omega \cdot L_q(s) \\ -\omega \cdot L_d(s) & R_s + s \cdot L_q(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

Rješavanjem prethodnog sistema jednačina dolazi se do izraza za struje  $I_d$  i  $I_q$  u s-domenu:

$$I_d(s) = - \frac{\omega \cdot U_m}{s \cdot L_d(s) \cdot \left[ s^2 + \omega^2 + s \cdot R_s \cdot \left( \frac{1}{L_d(s)} + \frac{1}{L_q(s)} \right) \right] + \frac{R_s}{L_d(s) \cdot L_q(s)}}, \quad (4.37)$$

$$I_q(s) = \frac{R_s + s \cdot L_d(s)}{\omega \cdot L_q(s)} \cdot I_d(s). \quad (4.38)$$

Primjenom inverzne Laplasove transformacije ( $L^{-1}$ ) na prethodne izraze dobijaju se relacije za struje  $i_d$  i  $i_q$  u vremenskom domenu:

$$i_d(t) = L^{-1} \{ I_d(s) \}, \quad (4.39)$$

$$i_q(t) = L^{-1} \{ I_q(s) \}. \quad (4.40)$$

Finalno, struja armature u režimu kratkog spoja može se izračunati koristeći sljedeću relaciju:



$$i_a(t) = i_d(t) \cdot \cos(\omega \cdot t + \lambda) + i_q(t) \cdot \sin(\omega \cdot t + \lambda). \quad (4.41)$$

Predloženi metod za estimaciju parametara zasnovan je na upotrebi potpunog izraza za struju armature i primjeni novog hibridnog metaheurističkog EO-GWO algoritma [75]. Ovaj algoritam je iskorišćen za estimaciju parametara generatora sa ciljem da se postigne minimalno odstupanje računski dobijenog talasnog oblika struje armature od odgovarajuće eksperimentalno snimljene struje. Za izračunavanje struje armature primijenjena je prethodno opisana procedura, bazirana na računanju komponenti struje u s-domenu. Estimacija parametara izvršena je za slučaj kada napon na krajevima generatora uoči kratkog spoja iznosi 50% nominalnog napona. Ostala dva slučaja, kada je napon generatora prije kratkog spoja podešen na 20% i 30% nominalne vrijednosti, iskorišćena su za validaciju dobijenih parametara. S obzirom na to da je cilj estimacije postići minimalno odstupanje između talasnih oblika dobijenih računskim i eksperimentalnim putem, kriterijumska funkcija  $f_{data}$  je izrazom (4.12). Veličina populacije i maksimalni broj iteracija su jednaki i iznose 30. U Tabeli 4.2.6 data su donja i gornja granica parametara generatora.

Tabela 4.2.6 Donja i gornja granica parametara generatora

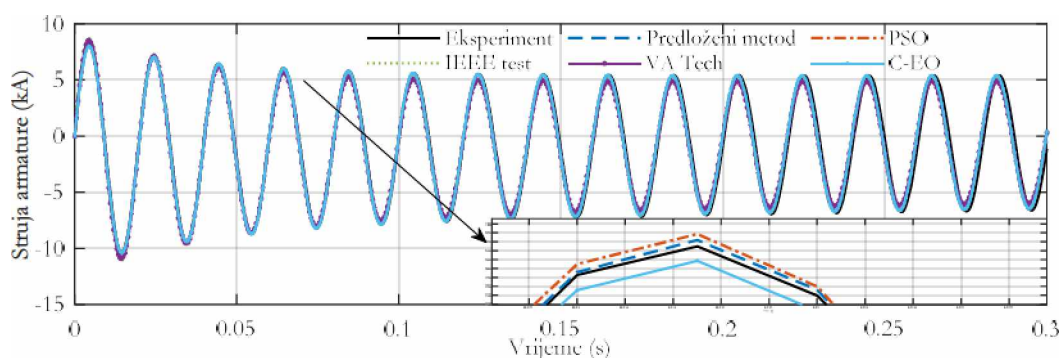
Parametar	$X_{AD}(\Omega)$	$T_{kd}(s)$	$T_{d0}'(s)$	$T_{d0}''(s)$	$R_a(\Omega)$	$X_d(\Omega)$	$T_d'(s)$	$T_d''(s)$	$X_g(\Omega)$	$R_f(\Omega)$	$T_g''(s)$	$T_{g0}''(s)$
<b>Donja granica</b>	1.2	0.025	6.5	0.06	0.004	1.9	2	0.04	1.3	0.001	0.2	1
<b>Gornja granica</b>	2.3	0.045	8.5	0.08	0.009	3	3	0.07	1.8	0.01	0.4	2

Za svrhu poređenja razmatran je rad [110], u kojem je postojeći PSO algoritam iskorišćen za estimaciju parametara generatora na osnovu potpunog izraza za struju armature, koji je izveden i u ovoj disertaciji. Takođe, dobijeni rezultati su upoređeni sa rezultatima koji su dobijeni metodom estimacije parametara pomoću približnog izraza za struju armature primjenom C-EO algoritma, koji je opisan u prethodnom potpoglavlju, kao i u radu [74]. Dodatno, parametri generatora dobijeni na osnovu IEEE testova i kataloških podataka kompanije *VA Tech* iskorišćeni su za poređenje sa parametrima koji su dobijeni predloženim metodom. U Tabeli 4.2.7 prikazane su vrijednosti parametara generatora dobijene predloženim metodom i ostalim metodama koji se koriste za poređenje. U istoj tabeli date su i odgovarajuće vrijednosti kriterijumske funkcije.

Tabela 4.2.7 Vrijednosti parametara i kriterijumske funkcije za različite metode

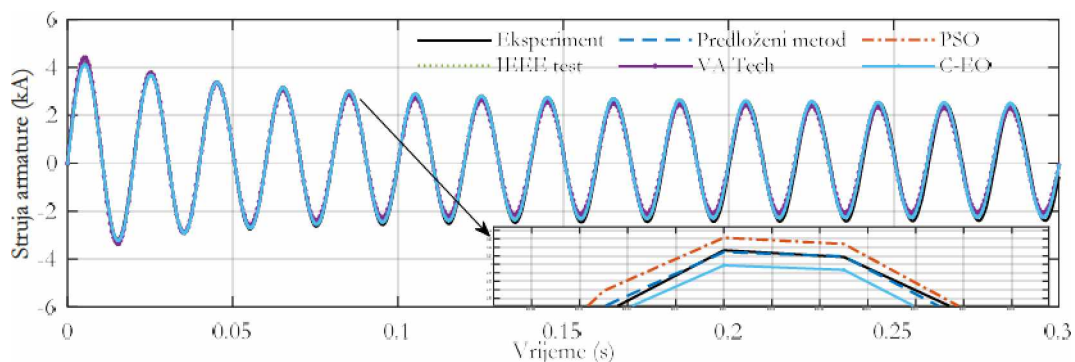
Metod	EO-GWO	PSO	IEEE testovi	VA Tech	C-EO
$T_{d'} (s)$	7.1787	7.1277	7.14	6.1	6.6824
$T_{d''} (s)$	0.0757	0.0733	0.0753	0.0793	0.0744
$R_a (m\Omega)$	5.1985	4.9	6.82	6.82	/
$X_d (\Omega)$	1.9874	2.3622	2.1475	2.1006	2.1573
$T_d' (s)$	2.5347	2.079	2.31	2.15	2.1649
$T_d'' (s)$	0.0496	0.0491	0.0466	0.0471	0.049
$X_q (\Omega)$	1.7856	2	1.3848	1.5642	0.4545
$T_{d''} (s)$	0.2548	0.3412	/	/	/
$T_{d''} (s)$	1.0009	1.5	/	/	/
$f_i$	0.01402	0.01425	0.01648	0.01798	0.0141

Korišćenjem parametara iz prethodne tabele izračunati su talasni oblici struje armature. Tako dobijeni talasni oblici upoređeni su sa odgovarajućim eksperimentalno snimljenim talasnim oblikom struje armature. S obzirom na to da pojedini metodi ne omogućavaju određivanje nekih parametara, za proračun talasnih oblika struje armature iskorišćen je približni izraz (4.9). Na slici 4.2.16 dato je grafičko poređenje talasnih oblika struje armature (eksperimentalno snimljenih i proračunatih), za slučaj kada napon generatora prije kratkog spoja iznosi 50% nominalnog.

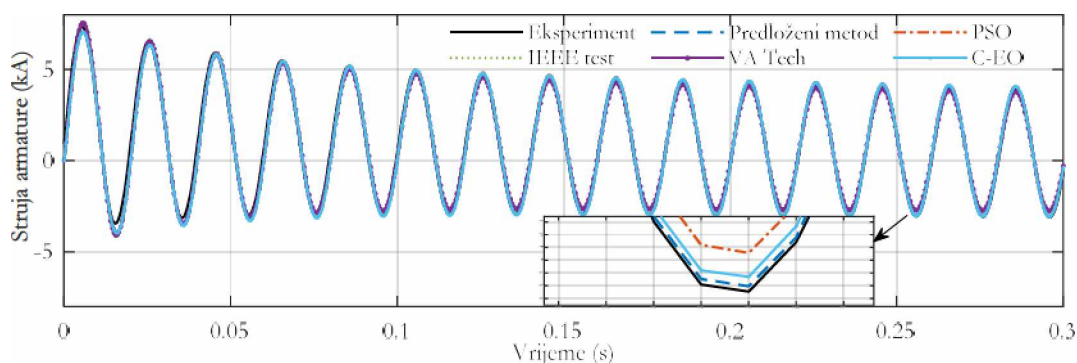


Slika 4.2.16 Grafičko poređenje talasnih oblika struje armature prilikom ogleđa kratkog spoja (pri naponu generatora koji iznosi 50% nominalne vrijednosti)

Kako bi se verificovali dobijeni rezultati, prethodno određeni parametri generatora iskorišćeni su za proračun talasnih oblika struje pobude za slučajeve kada je napon na krajevima generatora 20% i 30% nominalnog. Grafička poređenja sa odgovarajućim eksperimentalnim rezultatima data su na slikama 4.2.17 i 4.2.18.



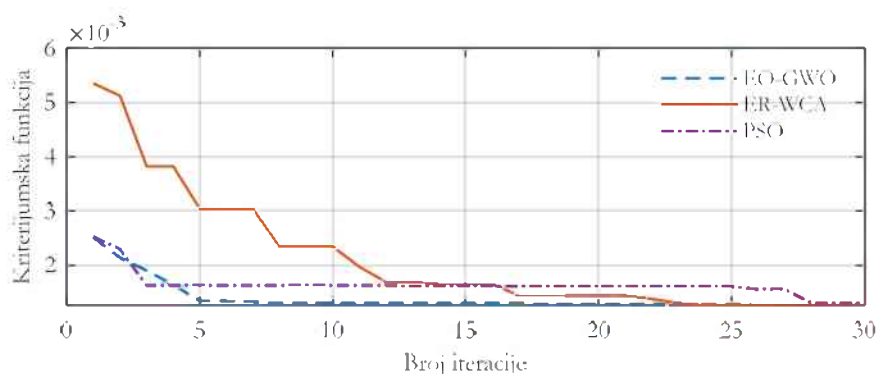
Slika 4.2.17 Grafičko poređenje talasnih oblika struje armature prilikom oglada kratkog spoja (pri naponu generatora koji iznosi 20% nominalne vrijednosti)



Slika 4.2.18 Grafičko poređenje talasnih oblika struje armature prilikom oglada kratkog spoja (pri naponu generatora koji iznosi 30% nominalne vrijednosti)

Na osnovu prikazanih numeričkih rezultata iz Tabele 4.2.7, kao i prikazanih grafičkih poređenja talasnih oblika struje pobude, evidentno je da primjena parametara određenih predloženim metodom dovodi do najvećeg stepena poklapanja sa eksperimentalno dobijenim rezultatima. Stoga, zaključuje se da je predloženi metod superiorniji i podesniji za primjenu od ostalih metoda korišćenih za poređenje.

Takođe, izvršena je i komparativna analiza predloženog EO-GWO algoritma za ER-WCA [97] i PSO algoritmom [111]. Svi algoritmi su primijenjeni pod istim uslovima – kriterijumska funkcija je (4.12), veličina populacije i maksimalni broj iteracija iznose 30. Sa konvergenijskih karakteristika, koje su date na slici 4.2.19, jasno je da predloženi EO-GWO algoritam brže konvergira ka optimalnom rješenju od ostala dva algoritma.



Slika 4.2.19 Konvergenijske krive algoritama prilikom estimacije parametara sinhronog generatora pomoću struje armature (potpun izraz)

### 4.3.2 Estimacija parametara sinhronog generatora korišćenjem potpunog izraza za struju pobude

Kako bi se odredio potpun izraz za struju pobude u režimu kratkog spoja, najprije je potrebno odrediti struju pobude neposredno prije nego što se izvrši ogled kratkog spoja. Na osnovu relacije (4.32), struja pobude neposredno prije kratkog spoja, označena sa  $i_{F0}$ , data je sljedećom relacijom:

$$i_{F0} = \frac{U_m}{\omega \cdot L_{AD}} \quad (4.42)$$

Ukupna struja pobude tokom kratkog spoja dobija se sabiranjem struje pobude prije kratkog spoja  $i_{F0}$  sa strujom  $i_{F1}$ , koja predstavlja komponentu struje pobude usljed kratkog spoja. Do izraza za struju  $i_{F1}$  najlakše se dolazi uvrštavanjem jednakosti  $v_F=0$  u sistem jednačina (4.16) i eliminacijom struje  $i_D$ :

$$I_{F1}(s) = I_d(s) \cdot \frac{s \cdot L_{AD} \cdot (1 + s \cdot T_{kd})}{R_F \cdot (1 + s \cdot T_{d0}') \cdot (1 + s \cdot T_{d0}'')} \quad (4.43)$$

Vremenski izraz za struju pobude  $i_{F1}(t)$  dobija se primjenom inverzne Laplasove transformacije na prethodni izraz:

$$i_{F1}(t) = L^{-1} \{ I_{F1}(s) \}. \quad (4.44)$$

Konačno, ukupna struja pobude u režimu kratkog spoja data je sljedećom relacijom:

$$i_F(t) = i_{F0} + i_{F1}(t). \quad (4.45)$$

U ovoj disertaciji je predložen metod za estimaciju parametara sinhronog generatora, koji se bazira na potpunom izrazu za struju pobude kratkog spoja. Naime, predloženi hibridni EO-GWO algoritam je upotrijebljen u cilju određivanja optimalnih vrijednosti parametara generatora, tako da struja pobude koja je izračunata primjenom potpunog izraza bude što približnija eksperimentalno snimljenoj struji pobude. Kao i u prethodnom dijelu, za estimaciju parametara je korišćen slučaj kada je napon generatora prije kratkog spoja 50% nominalne vrijednosti, dok su ostala dva slučaja (kada je napon generatora prije kratkog spoja 20% i 30% nominalnog) iskorišćena za verifikaciju dobijenih parametara. Kriterijumska funkcija data je izrazom (4.8), dok su parametri algoritma podešeni tako da veličina populacije i maksimalni broj iteracija iznose 30. Ograničenja optimizacionih varijabli su data u Tabeli 4.2.6.

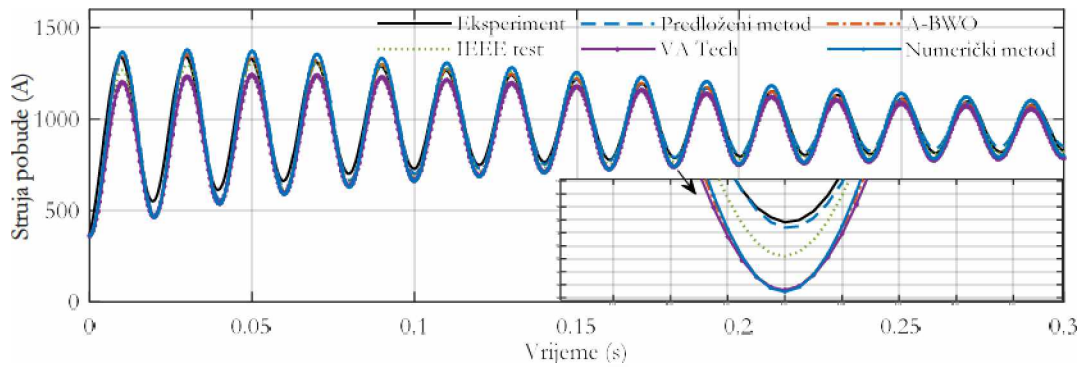
U cilju poređenja rezultata dobijenih predloženim metodom, preuzeti su rezultati dobijeni:

- Metodom koja se bazira na približnom izrazu za struju pobude i A-BWO algoritmu (primijenjena u [73], kao i u prethodnom potpoglavlju),
- Standardnim IEEE testovima,
- Iz kataloške dokumentacije kompanije *VA Tech*,
- Numeričkim metodom prezentovanim u [71].

U Tabeli 4.2.8 prikazani su parametri generatora dobijeni prethodno navedenim metodama identifikacije, kao i odgovarajuće vrijednosti kriterijumske funkcije. Osim numeričkog poređenja, u nastavku je izvršeno i grafičko poređenje talasnih oblika struje pobude. Naime, na slici 4.2.20 dato je poređenje talasnih oblika struje pobude dobijene eksperimentalnim putem sa talasnim oblicima struje pobude dobijene pomoću potpunog izraza, primjenom parametara iz Tabele 4.2.8, pri čemu je napon na krajevima generatora prije kratkog spoja jednak 50% nominalne vrijednosti. Za slučaj kada se koriste parametri dobijeni predloženim metodom, struja pobude je izračunata koristeći precizan model koji je opisan u ovom potpoglavlju. Za ostale metode, s obzirom na to da se njihovom primjenom ne mogu estimirati pojedini parametri, talasni oblik struje pobude izračunat je primjenom približnog izraza (4.1).

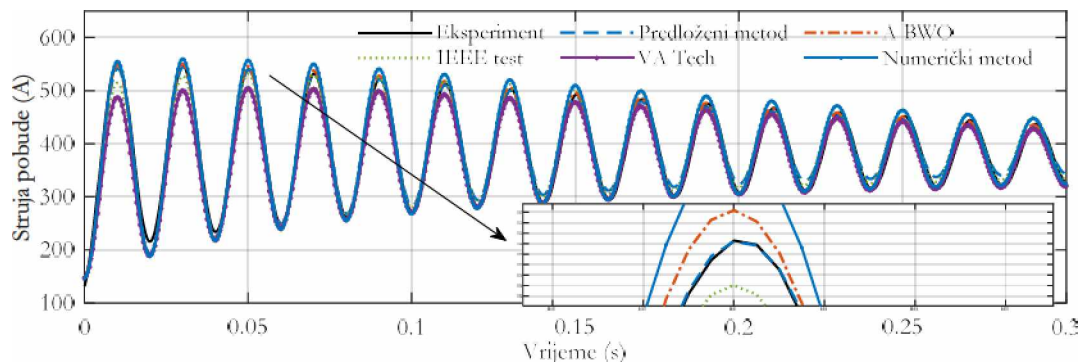
Tabela 4.2.8 Vrijednosti parametara i kriterijumske funkcije za različite metode

Metod	EO-GWO	A-BWO	IEEE testovi	VA Tech	Numerički metod
$X_{AD}(\Omega)$	1.5004	/	1.584	1.643	/
$T_{\omega}(s)$	0.0292	0.0315	0.03	/	0.033
$T_{d'}(s)$	7.4447	6.1837	7.14	6.1	5.9214
$T_{d''}(s)$	0.0685	/	0.0753	0.0793	/
$R_s(m\Omega)$	5.7	/	6.82	6.82	/
$X_d(\Omega)$	2.3073	2.1518	2.1475	2.1006	2.1475
$T_d'(s)$	2.4907	2.199	2.31	2.15	2.065
$T_d''(s)$	0.0403	0.0422	0.0466	0.0471	0.041
$X_q(\Omega)$	1.5079	/	1.3848	1.5642	/
$R_F(\Omega)$	0.0056	/	0.0029	0.0029	/
$T_q''(s)$	0.2208	/	/	/	/
$T_{d0}''(s)$	1.1546	/	/	/	/
$f$	0.01402	0.01425	0.01648	0.01798	0.0141

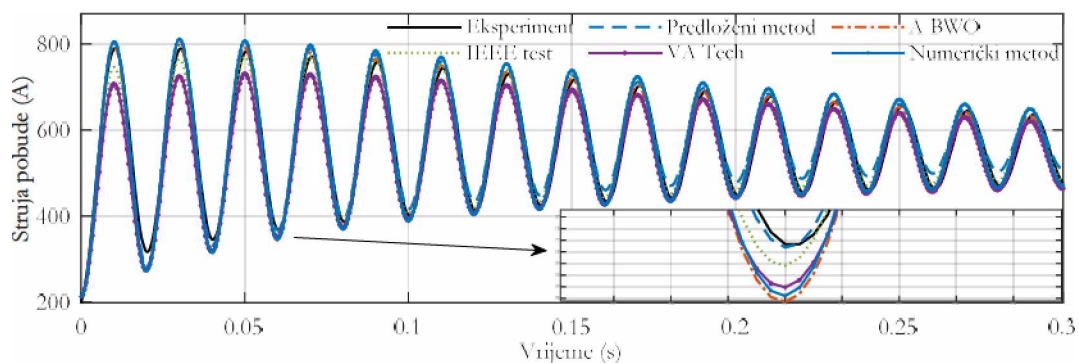


Slika 4.2.20 Grafičko poređenje talasnih oblika struje pobude prilikom ogleđa kratkog spoja (pri naponu generatora koji iznosi 50% nominalne vrijednosti)

Tačnost estimiranih parametara je verifikovana za druga dva slučaja – kada je napon na krajevima generatora uoči kratkog spoja 20% i 30% nominalne vrijednosti. Primijenjujući vrijednosti parametara iz prethodne tabele, računskim putem su dobijeni talasni oblici struje pobude prilikom kratkog spoja. Na slikama 4.2.21 i 4.2.22 prikazano je poređenje talasnih oblika struje pobude dobijenih računskim i eksperimentalnim putem. Posmatrajući sve prikazane grafike, kao i vrijednosti kriterijumske funkcije iz Tabele 4.2.8, jasno je da je predloženi metod za estimaciju parametara pouzdaniji, tačniji i precizniji u poređenju sa ostalim izabranim metodama. Dodatno, kao što se može vidjeti u prethodnoj tabeli, primjena predloženog metoda omogućava određivanje većeg broja parametara od ostalih metoda korišćenih za svrhu poređenja.



Slika 4.2.21 Grafičko poređenje talasnih oblika struje pobude prilikom ogleđa kratkog spoja (pri naponu generatora koji iznosi 20% nominalne vrijednosti)

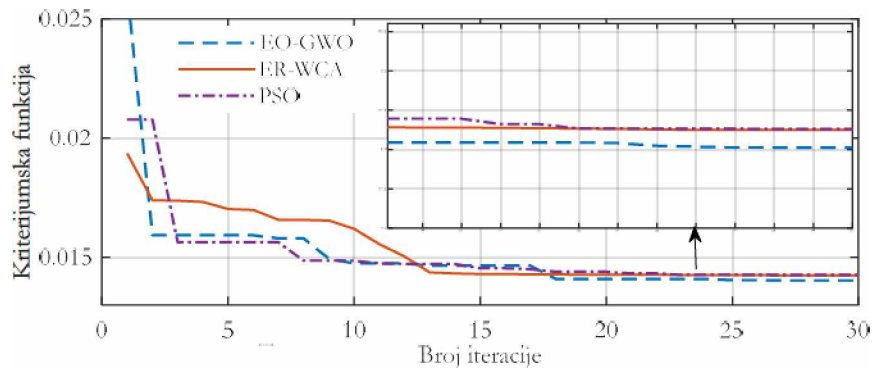


Slika 4.2.22 Grafičko poređenje talasnih oblika struje pobude prilikom ogleđa kratkog spoja (pri naponu generatora koji iznosi 30% nominalne vrijednosti)

Na kraju, izvršeno je i poređenje predloženog EO-GWO algoritma sa ER-WCA algoritmom i PSO algoritmom, sa aspekta brzine konvergencije i kvaliteta dobijenih rezultata. Sva tri algoritma su primijenjena sa ciljem minimizacije kriterijumske funkcije date izrazom (4.8), pri čemu su veličina populacije i maksimalni broj iteracija podešeni na 30. Na slici 4.2.23 prikazane su konvergenjske krive pomenutih algoritama. Posmatrajući dati grafik, jasno se mogu izvesti dva zaključka:

- Predloženi EO-GWO algoritam konvergira brže, tj. u najmanjem broju iteracija, ka optimalnom rješenju,
- Vrijednost kriterijumske funkcije je najmanja kada se primjeni predloženi EO-GWO algoritam.

Na osnovu toga, jasno je da je EO-GWO algoritam superiorniji od ER-WCA i PSO algoritma za estimaciju parametara sinhronog generatora primjenom potpunog izraza za pobudnu struju.



Slika 4.2.23 Konvergenzijske krive algoritama prilikom estimacije parametara sinhronog generatora pomoću struje pobude (potpun izraz)



# Poglavlje 5

## **Predlog novog pristupa za određivanja parametara komponenti sistema za regulaciju napona sinhronog generatora**

U ovom poglavlju predložen je novi pristup za određivanje parametara komponenti sistema za regulaciju napona. Sistem za regulaciju napona predstavljen je uprošćenim šemama, pri čemu su analizirani slučajevi kada je generator modelovan sistemom prvog i trećeg reda. Predloženi pristup se bazira na jednostavnoj testnoj proceduri, koja obuhvata snimanje odziva napona generatora u slučaju dodavanja step smetnje na referentnu vrijednost napona. S obzirom na to da je step smetnja male amplitude, predložena testna procedura je vrlo praktična i bezbjedna za sprovođenje. Parametri sistema za regulaciju napona, kao i pojedini parametri sinhronog generatora, određeni su primjenom metaheurističkog EO algoritma. Kriterijum prilikom određivanja parametara je minimizacija greške između odziva napona generatora dobijenog primjenom uprošćenih šema i snimljenog naponskog odziva (eksperimentalno snimljenog ili dobijenog na osnovu simulacionog modela). Predloženi pristup je testiran primijenjujući pouzdan simulacioni model sistema za regulaciju pobude sinhronog generatora u HE „Perućica“, kao i koristeći eksperimentalno snimljene rezultate iz HE „Piva“.

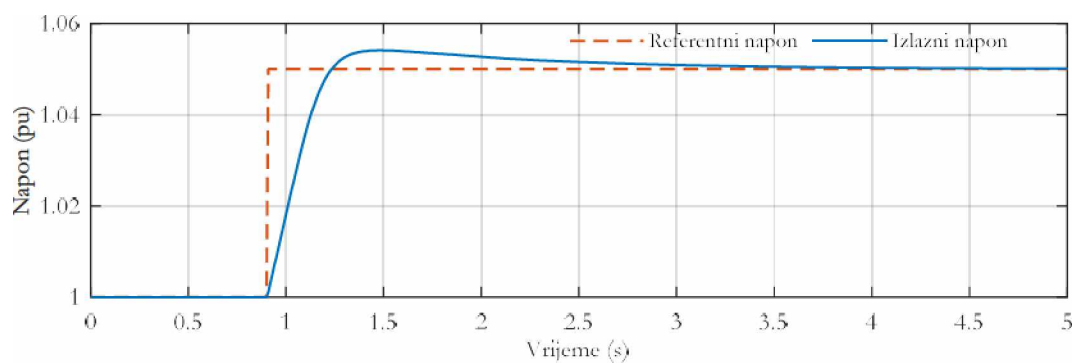
### **5.1 Estimacija parametara komponenti sistema za regulaciju napona koristeći simulacioni model**

U ovom potpoglavlju analiziran je simulacioni model sistema za regulaciju pobude sinhronog generatora snage od 40 MVA, koji je detaljno opisan u Potpoglavlju 3.2.1. Pomenuti simulacioni model, razvijen na osnovu tehničke dokumentacije, služi za dobijanje odziva napona generatora koji se može smatrati izuzetno preciznim i pouzdanim.

U ovoj disertaciji predložen je pristup estimacije parametara uprošćenih šema za regulaciju napona sinhronog generatora sa slika 1.6.1 i 1.6.3. Nepoznati parametri su estimirani primjenom metaheurističkog EO algoritma, pri čemu je cilj minimizovati kvadrat

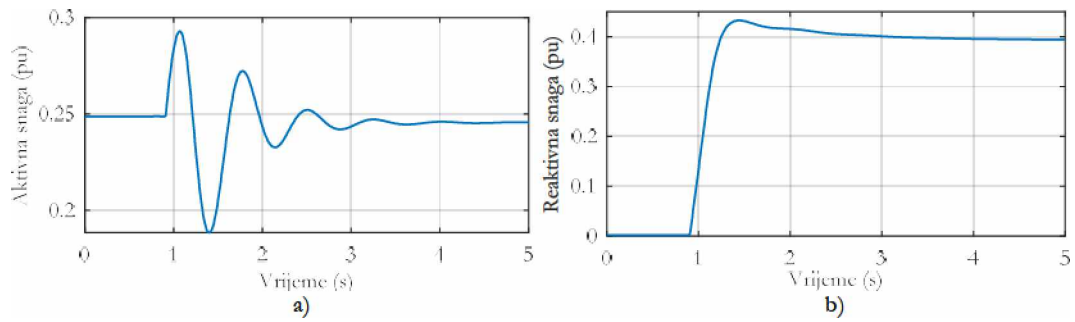
greške između napona generatora dobijenog iz simulacionog modela i napona generatora koji je dobijen na osnovu uprošćenih šema sistema za regulaciju napona.

Predložena testna procedura je veoma praktična i jednostavna za izvođenje. U opštem slučaju, predložena testna procedura se sprovodi tako što se napon generatora, kao i aktivna i reaktivna snaga, podeše na odgovarajuće referentne vrijednosti. Nakon određenog vremenskog intervala, dodaje se step smetanja male amplitude na referentnu vrijednost napona generatora. Tada dolazi do porasta napona na izlazu generatora, kao i reaktivne snage generatora, dok aktivna snaga zadržava istu vrijednost kao i prije uvođenja step smetnje. Konkretno, prilikom ispitivanja koja su sprovedena u ovoj disertaciji, referentna vrijednost napona u početku simulacije jednaka je referentnoj vrijednosti, tj. iznosi 1 pu. Nakon nekog vremena, na referentni napon dodaje se step smetnja vrijednosti 5% nominalnog napona, odnosno 0.05 pu, tako da nova referentna vrijednost napona iznosi 1.05 pu. Takođe, vrijednosti aktivne i reaktivne snage koju generator predaje mreži podešene su na 0.25 pu i 0 pu, respektivno. U toku ovakvog režima rada neophodno je snimiti izlazni napon generatora. Na osnovu snimljenog odziva napona generatora, estimirani su parametri uprošćenih šema sistema za regulaciju napona sinhronih generatora. Referentna vrijednost napona, kao i snimljeni odziv napona generatora, prikazani su na slici 5.1.1.

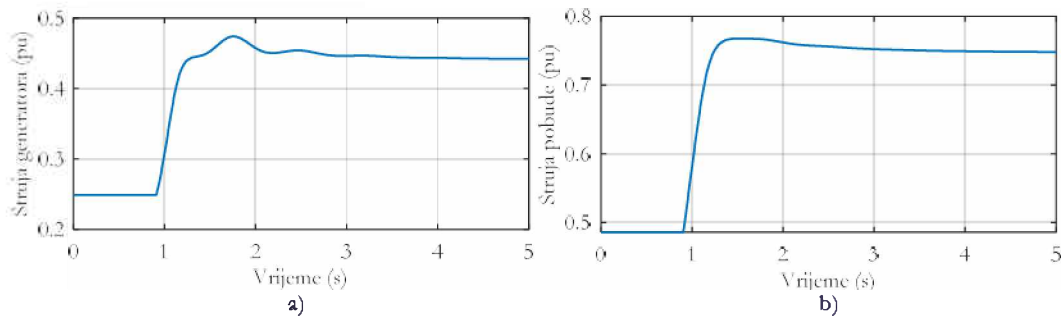


Slika 5.1.1 Referentni napon i izlazni napon generatora prilikom predložene testne procedure

Takođe, na slici 5.1.2 prikazani su odzivi aktivne i reaktivne snage generatora tokom opisanog radnog režima, dok su na slici 5.1.3 prikazani odzivi struje statora i pobudne struje generatora.

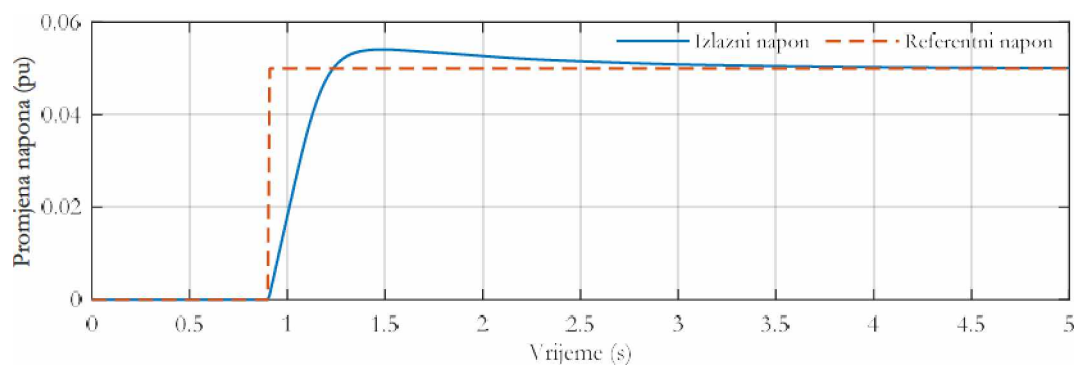


Slika 5.1.2 Odzivi a) aktivne i b) reaktivne snage generatora



Slika 5.1.3 Odzivi a) struje generatora i b) pobudne struje generatora

Na slici 5.1.4 prikazani su odzivi promjene referentnog napona i promjene napona generatora prilikom predložene testne procedure.



Slika 5.1.4 Promjena referentnog i izlaznog napona generatora prilikom predložene testne procedure

### 5.1.1 Estimacija parametara prvog uprošćenog modela sistema za regulaciju napona

Najprostiji model sistema za regulaciju napona, koji je ujedno najčešće korišćen u dostupnoj literaturi, prikazan je na slici 1.6.1. Prema pomenutoj uprošćenju šemi, pojačavač, pobudnica, generator i senzor su modelovani prenosnim funkcijama prvog reda. Drugim riječima, svaka od pomenutih komponenti predstavljena je odgovarajućim pojačanjem  $K$  i vremenskom konstantom  $T$ . S obzirom na to da je pomenuti simulacioni model razvijen na

osnovu tehničke dokumentacije iz HE „Perućica“, regulator pobude je modelovan kao PI regulator, čiji su parametri  $K_p=24$  i  $T_i=1$ , shodno opisu simulacionog modela iz Potpoglavlja 3.2.1.

Koristeći odzive sa slike 5.1.4, koji su dobijeni primjenom pouzdanog simulacionog modela, estimirani su parametri najprostijeg modela sistema za regulaciju napona. Za estimaciju je korišćen EO algoritam, pri čemu veličina populacije algoritma iznosi 50, dok je maksimalni broj iteracija jednak 100. U Tabeli 5.1.1 date su donja i gornja granica za sve parametri koji su estimirani.

**Tabela 5.1.1** Donja i gornja granica estimiranih parametara

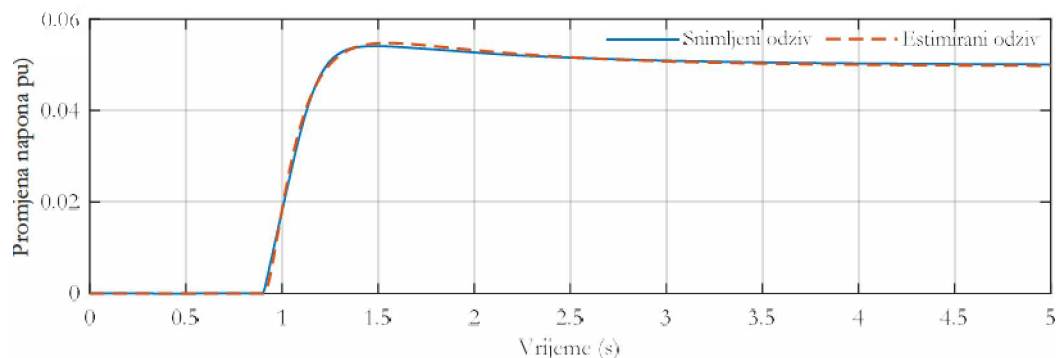
Parametar	$K_A$	$T_A$	$K_E$	$T_E$	$K_G$	$T_G$	$K_S$	$T_S$
Donja granica	0.1	0.0005	1	0.01	0.7	5	0.7	0.02
Gornja granica	10	0.01	5	0.05	1.3	15	1.3	0.08

Primjenom pomenutog EO algoritma i prethodno navedenih podešavanja, izvršena je estimacija nepoznatih parametara najprostijeg modela sistema za regulaciju napona sinhronog generatora. Estimirane vrijednosti su date u Tabeli 5.1.2.

**Tabela 5.1.2** Rezultati estimacije parametara

Parametar	$K_A$	$T_A$	$K_E$	$T_E$	$K_G$	$T_G$	$K_S$	$T_S$
Vrijednost	1.59	0.00055	1.00012	0.025	0.71	5.0001	1.006	0.0209

U cilju verifikacije dobijenih rezultata, primjenom uprošćenog modela sistema za regulaciju napona sa parametrima iz prethodne tabele dobijen je odziv promjene napona generatora na promjenu referentnog napona sa slike 5.1.4. Tako dobijeni estimirani odziv upoređen je sa odzivom sa slike 5.1.4, koji je dobijen primjenom simulacionog modela. Na slici 5.1.5 prikazano je odgovarajuće grafičko poređenje dobijenih odziva.



**Slika 5.1.5** Grafičko poređenje dobijenih odziva promjene napona generatora

Prethodno prikazano grafičko poređenje jasno ukazuje na veliki stepen poklapanja naponskog odziva koji je estimiran primjenom uprošćenog modela sistema za regulaciju napona i odziva napona generatora koji je dobijen primjenom simulacionog modela.

### 5.1.2 Estimacija parametara drugog uprošćenog modela sistema za regulaciju napona

U ovom poglavlju je izvršena estimacija parametara drugog uprošćenog modela sistema za regulaciju napona, koji je neznatno složeniji od prethodno razmatranog. Pomenuti model se od prethodno razlikuje po sljedećem:

- pojačavač i pobudnica su objedinjeni i predstavljeni jednom funkcijom prenosa prvog reda, koja se sastoji od pojačanja  $K_A$  i vremenske konstante  $T_A$ ;
- generator je predstavljen modelom trećeg reda, tj. *Heffron-Phillips*-ovim modelom, koji je detaljno opisan u potpoglavlju 1.6.

Primjenom odziva prikazanih na slici 5.1.4 izvršena je estimacija parametara drugog uprošćenog modela sistema za regulaciju napona. Primjenom *Heffron-Phillips*-ovog modela sinhronog generatora, shodno relacijama koje su date u Potpoglavlju 1.6, moguće je estimirati pojedine parametre sinhronog generatora –  $X_d, X_d', X_q$  i  $T_d'$ . Mogućnost estimacije realnih fizičkih parametara sinhronog generatora predstavlja značajnu prednost primjene modela trećeg reda generatora u odnosu na model prvog reda. Sumarno, drugi uprošćeni model sistema za regulaciju napona, kod kojeg se primjenjuje model generatora trećeg reda, opisan je sa 19 parametara (prikazanih u relacijama (1.51) – (1.61)). Pomenuti parametri su estimirani primjenom EO algoritma, pri čemu su podešavanja algoritma identična kao u prethodnom slučaju – veličina populacije je 50, a maksimalni broj iteracija je 100. U Tabeli 5.1.3 prikazana su donja i gornja ograničenja parametara drugog uprošćenog modela sistema za regulaciju napona.

Tabela 5.1.3 Donja i gornja granica estimiranih parametara

<b>Parametar</b>	$K_A$	$T_A$	$K_f$	$T_f$	$R_s$	$X_d'$	$X_q$	$X_d$	$V_b$	$\delta$
<b>Donja granica</b>	15	0.008	0.7	0.02	0.1	0.3	0.1	0.7	0.95	0
<b>Gornja granica</b>	30	0.0018	1.3	0.08	10	0.4	0.3	0.8	1.05	45
<b>Parametar</b>	$E_{fd}$	$I_{fd}$	$V_{fd}$	$V_{fd}'$	$V_{fd}''$	$X_d$	$T_d'$	$H$	$K_D$	
<b>Donja granica</b>	0.5	0	0.2	0.2	1	1.4	3	0.003	0	
<b>Gornja granica</b>	1.5	0.2	1	1	1.05	1.5	14	0.008	0.0001	

Parametri koji definišu drugi razmatrani uprošćeni model sistema za regulaciju napona estimirani su primjenom EO algoritma, koristeći prethodno definisana podešavanja algoritma. Rezultati estimacije dati su u Tabeli 5.1.4.

**Tabela 5.1.4** Rezultati estimacije parametara

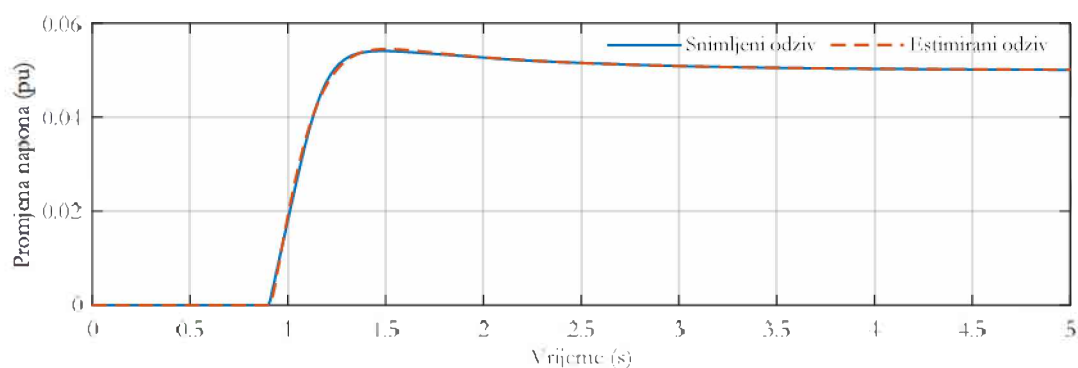
Parametar	$K_A$	$T_A$	$K_S$	$T_S$	$R_e$	$X_d'$	$X_e$	$X_g$	$V_b$	$\delta$
Vrijednost	27.32	0.0122	0.9997	0.06	0.16	0.3532	0.2268	0.7692	0.957	7.2176
Parametar	$E_{\phi}$	$I_{\phi}$	$V_{\phi}$	$V_{\phi 0}$	$V_{\phi 0}$	$X_d$	$T_{\phi}'$	$H$	$K_D$	
Vrijednost	1.3194	0.00056	0.2062	0.2128	1.0399	1.49	6.1688	0.00302	$8.3032 \cdot 10^{-6}$	

Kao što je ranije već pomenuto, velika prednost primjene modela generatora trećeg reda je mogućnost estimacije određenih parametara generatora –  $X_d$ ,  $X_d'$ ,  $X_g$  i  $T_{\phi}'$ . U Tabeli 5.1.5 dato je poređenje estimiranih vrijednosti pomenutih parametara pomoću predloženog pristupa i kataloških vrijednosti parametara dobijenih iz tehničke dokumentacije.

**Tabela 5.1.5** Poređenje estimiranih i kataloških vrijednosti parametara generatora

Parametar	$X_d$	$X_d'$	$X_g$	$T_{\phi}'$
Estimirana vrijednost	1.49	0.3532	0.7692	6.1688
Kataloška vrijednost	1.455	0.347	0.77	6.31

Koristeći drugi uprošćeni model sistema za regulaciju napona i primijenjujući dobijene parametre iz Tabele 5.1.4, dobijen je odziv promjene napona generatora kada je ulaz u sistem promjena referentnog napona prikazana na slici 5.1.4. Na slici 5.1.6 prikazano je poređenje tako dobijenog odziva sa odgovarajućim odzivom dobijenim korišćenjem simulacionog modela. Na osnovu prikazanog grafičkog poređenja odziva, evidentno je da se estimirani odziv korišćenjem uprošćenog modela u velikoj mjeri poklapa sa odzivom koji je dobijen na osnovu simulacionog modela.



**Slika 5.1.6** Grafičko poređenje dobijenih odziva promjene napona generatora

## 5.2 Estimacija parametara komponenti sistema za regulaciju napona koristeći eksperimentalno snimljene rezultate

U ovom potpoglavlju doktorske disertacije izvršena je estimacija nekih parametara sinhronog generatora snage od 120 MVA iz HE „Piva“ primjenom pristupa predloženog u ovoj disertaciji. Parametri su estimirani koristeći eksperimentalno snimljene rezultate, shodno eksperimentalnoj postavci koja je opisana u nastavku.

Naime, eksperimentalni testovi su sprovedeni na realnom sinhronom generatoru snage od 120 MVA koji se nalazi u HE „Piva“. Pobudni sistem ovog generatora je *UNITROL 6000* i pripada grupi statičkih pobudnih sistema. Izgled hidroelektrane „Piva“ prikazan je na slici 5.2.1, dok su na slici 5.2.2 prikazani sinhroni generator koji je korišćen u eksperimentima, kao i njegov pobudni sistem.



Slika 5.2.1 Izgled HE „Piva“



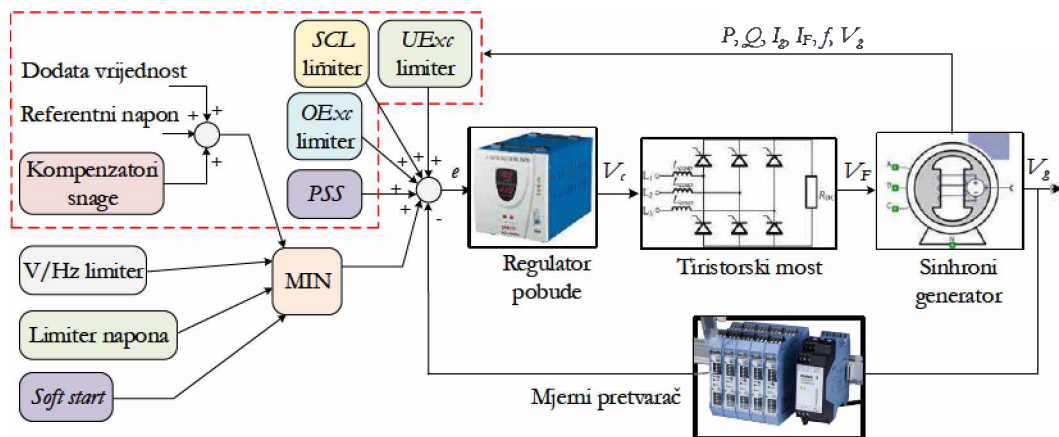
Slika 5.2.2 a) Sinhroni generator b) pobudni sistem u HE „Piva“

Takođe, u Tabeli 5.2.1 dati su osnovni kataloški podaci posmatranog generatora.

Tabela 5.2.1 Kataloški podaci generatora

Simbol	Opis	Vrijednost	Simbol	Opis	Vrijednost
$S_n$	Nominalna snaga	120 MVA	$X_d''$	Subtranzijentna reaktansa po $d$ -osi	0.207 pu
$V_n$	Nominalni napon statora	15.75 kV	$X_q$	Sinhrona reaktansa po $q$ -osi	0.686 pu
$I_n$	Nominalna struja statora	4.389 kA	$R_s$	Otpornost namotaja statora	0.004 pu
$f_n$	Nominalna frekvencija	50 Hz	$R_F$	Otpornost namotaja pobude	0.14 pu
$pf$	Nominalni faktor snage	0.95	$T_d'$	Tranzijentna vremenska konstanta kratkog spoja po $d$ -osi	3 s
$V_F$	Nominalni napon pobude	2350 V	$T_d''$	Subtranzijentna vremenska konstanta kratkog spoja po $d$ -osi	0.07 s
$I_F$	Nominalna struja pobude	1180 A	$T_{\phi}'$	Tranzijentna vremenska konstanta otvorenog kola po $d$ -osi	6.79 s
$X_d$	Sinhrona reaktansa po $d$ -osi	1.05 pu	$T_e$	Vremenska konstanta namotaja armature	0.28 s
$X_d'$	Tranzijentna reaktansa po $d$ -osi	0.37 pu			

Blok šema sistema za regulaciju pobude sinhronog generatora na kojem su sprovedeni eksperimenti data je na slici 5.2.3. Kao regulator pobude korišćen je *lead-lag* kompenzator, čiji blok dijagram je prikazan na slici 1.2.12 (u sklopu Potpoglavlja 1.2). Parametri regulatora su:  $T_{C2}=T_{B2}=0.1$  s,  $V_{max}=0.0912$ ,  $V_{min}=-0.0912$ ,  $T_{C1}=3.5$  s,  $T_{B1}=11.67$  s,  $KR=500$ ,  $V_{Rmax}=7.27$  i  $V_{Rmin}=-6.4$  pu. Takođe, limiter napona ima ulogu da ograniči maksimalnu vrijednost referentnog napona, a njegova podrazumijevana vrijednost je 110%.



Slika 5.2.3 Blok dijagram sistema za regulaciju pobude sinhronog generatora u HE „Piva“

Eksperimentalna testna procedura, koja je predložena u ovoj disertaciji, zasniva se na uvođenju step smetnje male amplitude na referentni napon. Konkretno, eksperiment započinje tako što se pobuda generatora podesi na neku konstantnu vrijednost, zavisno od



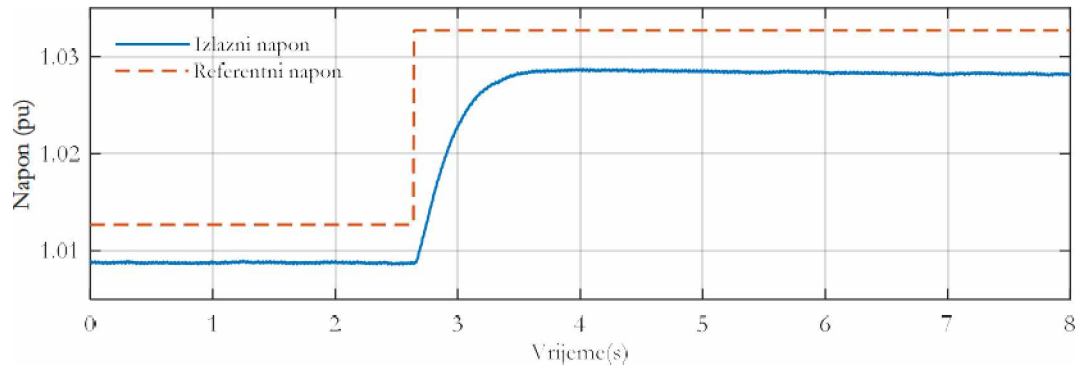
vrijednosti referentnog napona. Nakon toga, shodno blok dijagramu sa prethodne slike, regulator pobude definiše ugao kašnjenja paljenja tiristorskog mosta, a samim tim i izlazni jednosmjerni napon mosta. Izlazni napon mosta je ujedno pobudni napon sinhronog generatora, koji reguliše da vrijednost izlaznog napona generatora bude jednaka podešenoj referentnoj vrijednosti. Nakon uspostavljanja stacionarnog stanja, uvodi se step smetnja na referentni napon. Stoga, signal greške sada ima veću vrijednost, što dalje dovodi do korekcije ugla okidanja tiristora, a samim tim i do definisanja nove vrijednosti napona na izlazu tiristorskog mosta, odnosno pobudnog napona sinhronog generatora. Tako definisana vrijednost napona pobude dovodi do nove vrijednosti izlaznog napona, koja je jednaka novoj referentnoj vrijednosti napona. U toku prelaznog procesa koji nastaje zbog step promjene referentne vrijednosti napona, snimaju se odzivi napona pobude i napona na izlazu generatora.

Predložena eksperimentalna testna procedura ima brojne prednosti:

1. Step smetnja male amplitude na referentni napon sistema za regulaciju napona nema nikakav uticaj na ustaljeni radni režim sistema i ne ugrožava sigurnost rada nijedne komponente sistema. Predloženi eksperimentalni test je bezbjedan, praktičan i veoma lak za izvođenje.
2. Uvođenje step smetnje na referentni napon ne utiče na tokove aktivnih snaga.
3. Može se sprovesti dok generator radi priključen na mrežu, odnosno ne zahtijeva isključivanje generatora. Na taj način, ovakav test ne dovodi do ekonomskih gubitaka koji bi nastali usljed smanjenja proizvodnje električne energije.
4. Ne zahtijeva nikakvu dodatnu opremu osim one koja već postoji u samoj elektrani, što je čini veoma jednostavnom i lakom za sprovođenje. Štaviše, pomenuti test se sprovodi tokom svake revitalizacije i remonta generatora.
5. Može se izvesti u različitim radnim režimima generatora, odnosno dok generator radi priključen na mrežu, ali i dok radi u praznom hodu, tj. kada je isključen sa mreže.

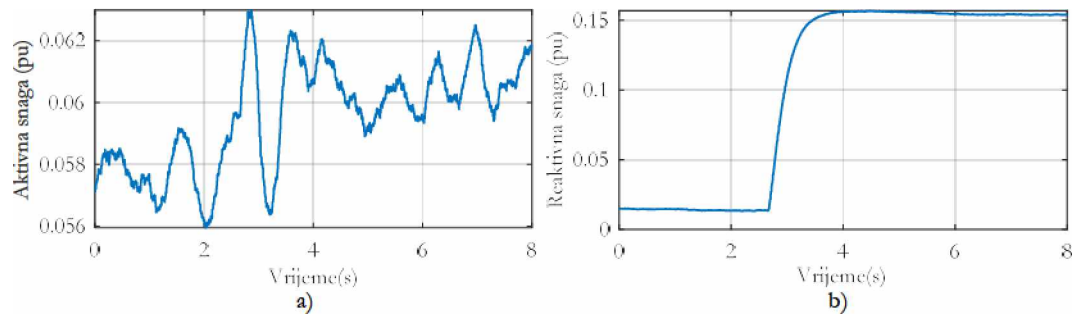
U cilju estimacije parametara uprošćenih modela sistema za regulaciju napona, sproveden je sljedeća eksperimentalna testna procedura – referentni napon generatora je u početku podešen na vrijednost koja iznosi 1.012 pu, a zatim se nakon nekoliko sekundi dodaje step smetnja na referentnu vrijednost napona koja iznosi 0.02 pu. U ovom radnom režimu, aktivna snaga koju proizvodi generator je podešena na 0.06 pu. Na slici 5.2.4

prikazani su eksperimentalno snimljeni odziv generatora, kao i odgovarajuća referentna vrijednost napona.

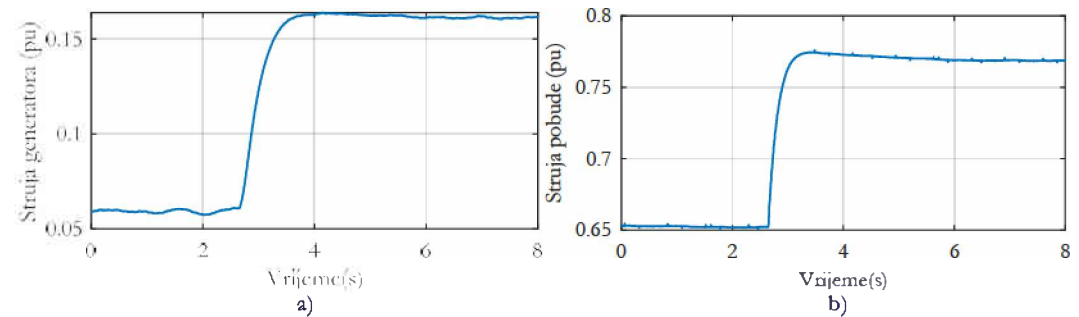


Slika 5.2.4 Referentni napon i izlazni napon generatora prilikom sprovedenog eksperimenta

Eksperimentalno snimljeni odzivi aktivne i reaktivne snage generatora dati su na slici 5.2.5, dok su na slici 5.2.6 prikazani odzivi struje generatora i struje pobude.

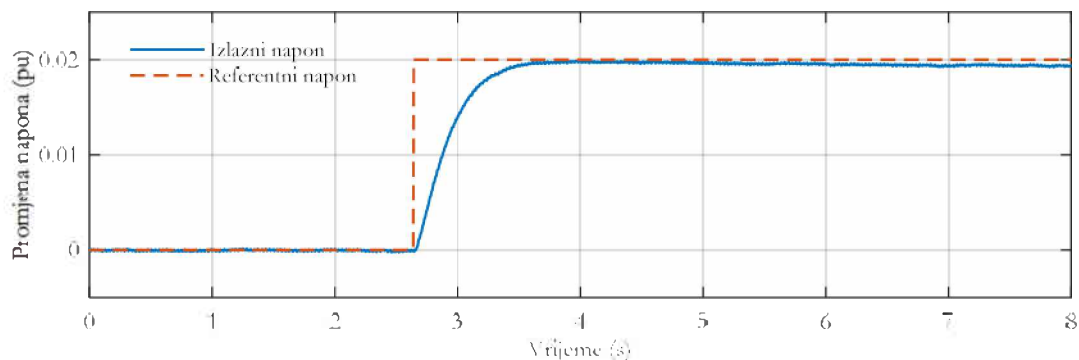


Slika 5.2.5 Eksperimentalno snimljeni odzivi a) aktivne i b) reaktivne snage generatora



Slika 5.2.6 Eksperimentalno snimljeni odzivi a) struje generatora i b) pobudne struje generatora

Takođe, na slici 5.2.7 prikazani su odzivi promjene referentnog napona i promjene napona generatora, koji se koriste prilikom estimacije parametara komponenti sistema za regulaciju napona.



Slika 5.2.7 Promjena referentnog i izlaznog napona generatora prilikom sprovedenog eksperimenta

### 5.2.1 Estimacija parametara prvog uprošćenog modela sistema za regulaciju napona

U ovom potpoglavlju estimirani su parametri prve uprošćene šeme sistema za regulaciju napona (slika 1.6.1), kod koje su sve komponente, izuzev regulatora, modelovane prenosnom funkcijom prvog reda. Shodno opisu eksperimentalne procedure, regulator je modelovan kao *lead-lag* kompenzator. Parametri pomenutog modela sistema za regulaciju napona estimirani su korišćenjem eksperimentalno snimljenih odziva sa slike 5.2.7. Za estimaciju je korišćen EO algoritam, pri čemu je podešeno da veličina populacije iznosi 50, a maksimalni broj iteracija 100. U Tabeli 5.2.2 prikazana su ograničenja optimizacionih varijabli, tj. parametara uprošćenog modela sistema za regulaciju napona.

Tabela 5.2.2 Donja i gornja granica estimiranih parametara

Parametar	$K_A$	$T_A$	$K_E$	$T_E$	$K_G$	$T_G$	$K_S$	$T_S$
Donja granica	0.1	0.0005	1	0.01	0.7	5	0.7	0.02
Gornja granica	10	0.01	5	0.05	1.3	15	1.3	0.08

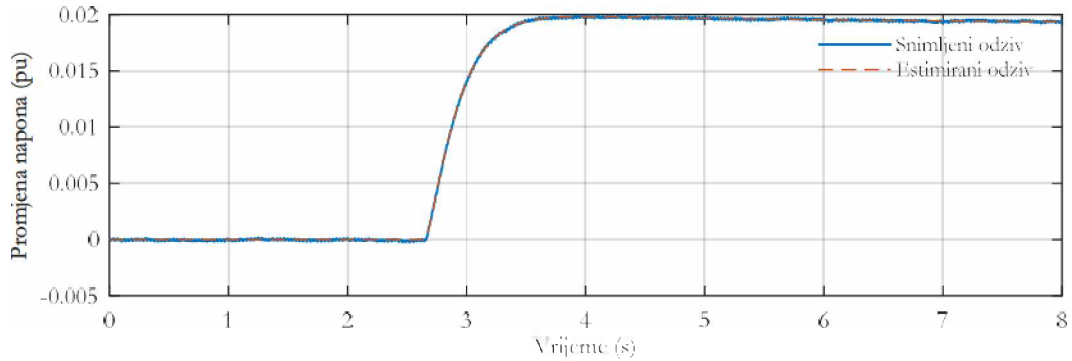
Primjenom EO algoritma, koristeći prethodno opisana podešavanja, izvršena je estimacija pojačanja i vremenskih konstanti pojačavača, pobudnice, generatora i senzora. Rezultati estimacije dati su u Tabeli 5.2.3.

Tabela 5.2.3 Rezultati estimacije parametara

Parametar	$K_A$	$T_A$	$K_E$	$T_E$	$K_G$	$T_G$	$K_S$	$T_S$
Vrijednost	0.100008	0.0083	2.3998	0.0206	0.7	9.3543	1.0322	0.0747

Nakon toga, primijenjujući prethodno određene parametre dobijen je odziv promjene napona generatora koristeći prvi uprošćeni model sistema za regulaciju napona. Referentni signal, koji predstavlja ulaz u sistem za regulaciju napona, prikazan je na slici 5.2.7. Na slici 5.2.8 prikazano je grafičko poređenje tako dobijenog odziv promjene napona

generatora i odgovarajućeg eksperimentalno snimljenog odziva. Na osnovu prikazanog grafičkog poređenja, jasno se zaključuje da se odziv dobijen pomoću uprošćenog modela, čiji parametri su određeni predloženim pristupom, veoma dobro poklapa sa eksperimentalno snimljenim odzivom.



Slika 5.2.8 Grafičko poređenje dobijenih odziva promjene napona generatora

## 5.2.2 Estimacija parametara drugog uprošćenog modela sistema za regulaciju napona

Koristeći eksperimentalno snimljene odzive sa slike 5.2.7 izvršena je estimacija parametara drugog uprošćenog modela sistema za regulaciju napona, kod kojeg je generator modelovan sistemom trećeg reda. Za estimaciju je korišćen EO algoritam sa prethodno podešenim parametrima – broj iteracija je 100, a veličina populacije 50. U Tabeli 5.2.4 prikazana su ograničenja optimizacionih varijabli, odnosno parametara sistema za regulaciju napona.

Tabela 5.2.4 Donja i gornja granica estimiranih parametara

Parametar	$K_A$	$T_A$	$K_S$	$T_S$	$R_e$	$X_d'$	$X_e$	$X_g$	$V_b$	$\delta$
Donja granica	15	0.01	0.7	0.015	0.08	0.35	0.1	0.6	0.95	0
Gornja granica	30	0.03	1.3	0.035	0.2	0.4	0.5	0.7	1.05	45
Parametar	$E_{\phi 0}$	$I_{\phi 0}$	$V_{\phi 0}$	$V_{\phi 0}$	$V_{\phi 0}$	$X_d$	$T_{\phi}'$	$H$	$K_D$	
Donja granica	0.5	0	0.2	0.05	1	1	6.5	0.002	0	
Gornja granica	1.5	0.01	0.4	0.5	1.05	1.1	7	0.005	0.0001	

Primjenom EO algoritma sa prethodno navedenim podešavanjima i ograničenjima datim u Tabeli 5.2.4, izvršena je estimacija pomenutih 19 parametara pomoću kojih je opisan drugi uprošćeni model sistema za regulaciju napona. Rezultati estimacije dati su u Tabeli 5.2.5.

Tabela 5.2.5 Rezultati estimacije parametara

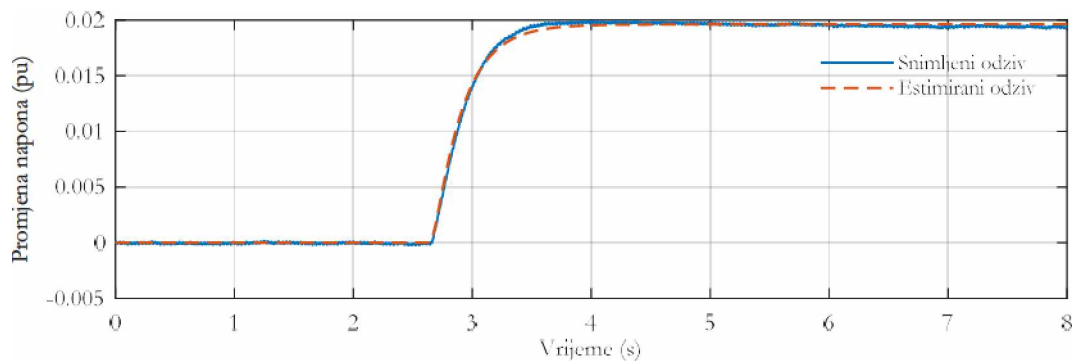
Parametar	$K_A$	$T_A$	$K_S$	$T_S$	$R_r$	$X_d'$	$X_r$	$X_q$	$V_b$	$\delta$
Vrijednost	15.93	0.0299	0.9882	0.0349	0.0985	0.3997	0.1284	0.6543	0.9621	0.0105
Parametar	$E_{\phi 0}$	$I_{\phi 0}$	$V_{\phi 0}$	$V_{\phi 0}'$	$V_{\phi 0}''$	$X_d$	$T_{d0}'$	$H$	$K_D$	
Vrijednost	1.3679	0.0002	0.3671	0.2493	1.0056	1	6.99	0.0036	8.8587·10 <sup>-6</sup>	

Analogno komparativnoj analizi koja je predstavljena u Potpoglavlju 5.1.2, važno je uporediti određene reaktanse i vremenske konstante generatora ( $X_d$ ,  $X_d'$ ,  $X_q$  i  $T_{d0}'$ ) koje su određene predloženim pristupom sa odgovarajućim kataloškim parametrima. Konkretno, u Tabeli 5.2.6 dato je poređenje estimiranih vrijednosti pomenutih parametara pomoću predloženog pristupa i kataloških vrijednosti parametara dobijenih na osnovu tehničke dokumentacije iz HE „Piva“.

Tabela 5.2.6 Poređenje estimiranih i kataloških vrijednosti parametara generatora

Parametar	$X_d$	$X_d'$	$X_q$	$T_{d0}'$
Estimirana vrijednost	1	0.3997	0.6543	6.99
Kataloška vrijednost	1.05	0.37	0.686	6.79

Finalno, sprovedena je komparativna analiza između uprošćenog modela sistema za regulaciju napona i eksperimentalnih rezultata. Naime, primjenom drugog uprošćenog modela sistema za regulaciju napona i parametara estimiranih predloženim pristupom, dobijen je odziv promjene napona generatora kada je ulaz u sistem promjena referentnog napona prikazana na slici 5.2.7. Odgovarajuće grafičko poređenje sa eksperimentalno snimljenim odzivom dato je na slici 5.2.9.



Slika 5.2.9 Grafičko poređenje dobijenih odziva promjene napona generatora

Na osnovu prethodno prikazanog grafičkog poređenja može se zaključiti da se odziv promjene napona generatora, koji je dobijen primjenom drugog uprošćenog modela čiji su

parametri estimirani predloženim pristupom, u velikoj mjeri poklapa se odgovarajućim eksperimentalno snimljenim odzivom. Takođe, na bazi numeričkih rezultata iz Tabele 5.2.6, jasno je da su vrijednosti parametara generatora, koje su dobijene predloženim pristupom, veoma bliske kataloškim vrijednostima parametara.

# Poglavlje 6

## Primjeri *black-box* modelovanja u sistemima za regulaciju pobude sinhronog generatora

U ovom poglavlju predstavljena je promjena *black-box* modelovanja kod sistema za regulaciju pobude sinhronog generatora. Među brojnim različitim *black-box* modelima i tehnikama vještačka inteligencije, u ovoj disertaciji je pokazano modelovanje pomoću vještakih neuralnih mreža. Konkretno, vještačke neuralne mreže su najprije primijenjene u cilju modelovanja relacije između napona pobude i napona na izlazu sinhronog generatora. Nakon toga, pokazana je i primjena vještačkih neuralnih mreža u cilju modelovanja veze između referentnog napona i izlaznog napona sinhronog generatora, čime je obuhvaćen kompletan sistem za regulaciju napona.

### 6.1 Opis eksperimentalne procedure

Kao što je detaljno prikazano u Potpoglavlju 2.2, proces obučavanja neuralne mreže predstavlja određivanje težinskih koeficijenata na osnovu ulazno-izlaznog seta podataka. U cilju dobijanja ulaznih i izlaznih podataka za obučavanje neuralne mreže, sprovedeni su eksperimentalni testovi na sinhronom generatoru snage od 120 MVA, koji se nalazi u HE „Piva“. Kao što je već rečeno, predložena eksperimentalna testna procedura ima veliki broj prednosti, među kojima su najvažnije jednostavnost izvođenja, praktičnost i sigurnost svih komponenti sistema za regulaciju pobude. U Potpoglavlju 5.2 detaljno je opisana eksperimentalna postavka iz HE „Piva“, kao i predložena eksperimentalna testna procedura.

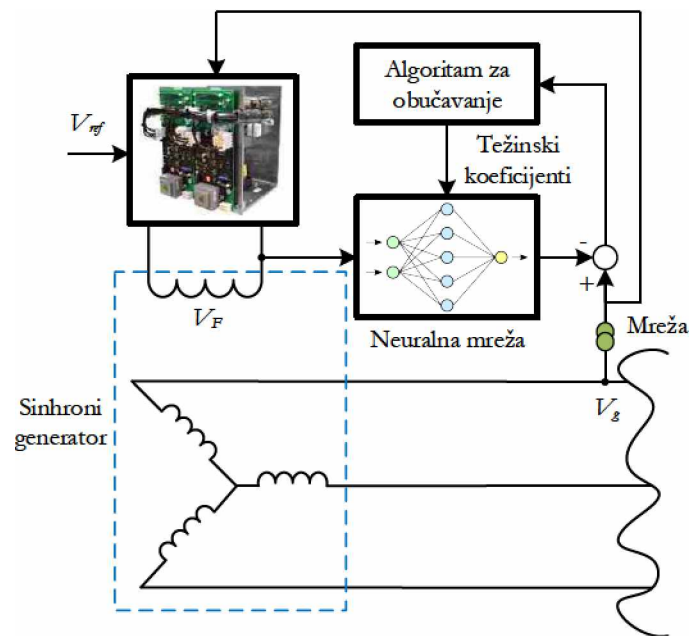
U ovoj disertaciji, kao i u radovima [76] i [82], predloženi su *black-box* modeli bazirani na neuralnim mrežama, koji imaju ulogu u modelovanju relacije između napona pobude i izlaznog napona generatora [76], kao i modelovanju veze između referentnog napona sistema za regulaciju pobude i izlaznog napona generatora [82]. Takođe, u cilju dobijanja adekvatnih ulaznih i izlaznih podataka za obučavanje neuralnih mreža, u ovoj disertaciji predložena je jednostavna eksperimentalna testna procedura (detaljno opisana u Potpoglavlju 5.2). U cilju dobijanja različitih podataka za obučavanje i validaciju neuralnih mreža, potrebno je sprovesti

veći broj eksperimentalnih testova. Početna vrijednost referentnog napona, amplituda step smetnja na referentni napon, kao i vremenski trenutak u kojem se dogodi step smetnja, treba da budu različiti za svaki eksperimentalni test. Takođe, eksperimentalni testovi treba da budu sprovedeni za različite vrijednosti parametara regulatora. Na ovaj način dobijen je veći broj setova ulazno-izlaznih podataka. Jedan set podataka je upotrijebljen za obučavanje neuralne mreže, dok su preostali setovi korišćeni za validaciju prethodno obučene neuralne mreže. Detaljnije informacije o sprovedenim eksperimentalnim testovima biće date u narednom dijelu.

## **6.2 Modelovanje veze između napona pobude i napona na krajevima sinhronog generatora primjenom neuralnih mreža**

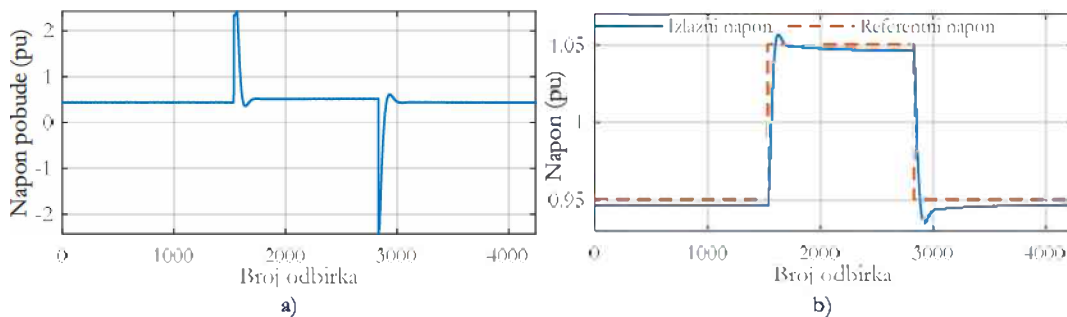
U ovom potpoglavlju, kao i u radu [76], predstavljeno je modelovanje relacije između napona pobude i napona na krajevima generatora primjenom neuralnih mreža, pri radu generatora u praznom hodu. U cilju dobijanja ulaznih i izlaznih podataka za obučavanje neuralne mreže, sprovedeni su eksperimentalni testovi opisani u prethodnom potpoglavlju. Eksperimentalno snimljeni napon pobude služi kao set ulaznih podataka, dok eksperimentalno snimljeni napon na krajevima generatora služi kao set izlaznih podataka. Preciznije, u cilju dobijanja podataka za obučavanje neuralne mreže, sproveden je sljedeći eksperiment: referentna vrijednost napona je u početku podešena na 0.95 pu, zatim se nakon određenog vremena poveća na 1.05 pu, da bi se nakon nekog vremena referentna vrijednost opet spustila na 0.95 pu. U toku rada generatora u opisanom radnom režimu, eksperimentalno su snimljeni napon pobude i napon na krajevima generatora, čime je dobijen ulazno-izlazni set podataka za obučavanje neuralne mreže. Kompletan blok dijagram predložene eksperimentalne procedure i procesa obučavanja neuralne mreže dat je na slici 6.2.1.





Slika 6.2.1 Blok dijagram predložene eksperimentalne procedure i procesa obučavanja neuralne mreže

Na slici 6.2.2 prikazani su eksperimentalno snimljeni napon pobude i napon na krajevima generatora, koji služe za obučavanje neuralnih mreža.



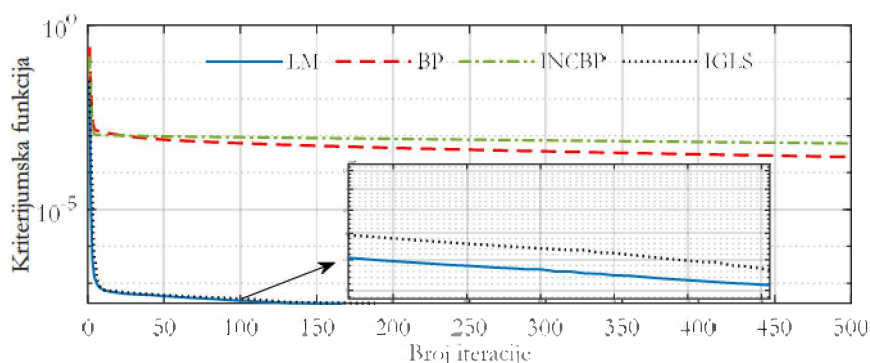
Slika 6.2.2 Eksperimentalno snimljeni a) napon pobude b) referentni napon i napon na krajevima generatora

Neuralna mreža, koja je upotrijebljena za modelovanje relacije između napona pobude i napona generatora, sastoji se od četiri neurona u ulaznom sloju (plus jedan neuron koji modeluje prag neurona), pet neurona u skrivenom sloju i jednog neurona u izlaznom sloju. Aktivaciona funkcija skrivenog sloja  $f$  je hiperbolični tangens, dok je aktivaciona funkcija izlaznog sloja  $F$  linearna funkcija. Takođe, primijenjena neuralna mreža ima tzv. ARX (*AutoRegression model with the eXogenous input*) strukturu, što znači da su ulazi u neuralnu mrežu prethodni odbirci ulaznog i izlaznog signala. S obzirom na to da neuralna mreža ima četiri ulazna neurona, ulazi u neuralnu mrežu u trenutku  $t$  su:  $u(t-1)$ ,  $u(t-2)$ ,  $y(t-1)$  i  $y(t-2)$ .

U cilju obučavanja neuralne mreže, primijenjeni su Levenberg-Marquardt algoritam, *backpropagation* (BP) algoritam, inkrementalni BP algoritam (INCBP), kao i generalizovani metod najmanjih kvadrata (*iterated generalized least squares*). Kriterijumska funkcija data je relacijom (2.59). Algoritam za obučavanje se zaustavlja kada je ispunjen neki od kriterijuma zaustavljanja:

1. kada se postigne maksimalni broj iteracija (podešen na 500),
2. kada vrijednost kriterijumske funkcije opadne ispod predefinisane minimalne vrijednosti (podešena na 0),
3. kada je promjena kriterijumske funkcije manja od  $10^{-7}$ , najveći element gradijenta manji od  $10^{-4}$  i najistaknutija promjena težinskog koeficijenta manja od  $10^{-3}$ .

Na slici 6.2.3 prikazane su konvergencijske krive sva četiri pomenuta algoritma dobijene prilikom obučavanja prethodno opisane neuralne mreže. Takođe, u Tabeli 6.2.1 prikazano je poređenje pomenutih algoritama s aspekta vremena potrebnog za izvršavanje, vrijednosti kriterijumske funkcije i potrebnog broja iteracija.



Slika 6.2.3 Konvergencijske krive algoritama za obučavanje neuralne mreže

Tabela 6.2.1 Međusobno poređenje algoritama za obučavanje neuralne mreže

Algoritam	LM	BP	INCBP	IGLS
Vrijeme (s)	<1	<1	35	~2
Vrijednost kriterijumske funkcije	$2.8765 \cdot 10^{-8}$	$2.652 \cdot 10^{-4}$	$6.1 \cdot 10^{-4}$	$2.88 \cdot 10^{-8}$
Broj iteracija	167	500	500	188

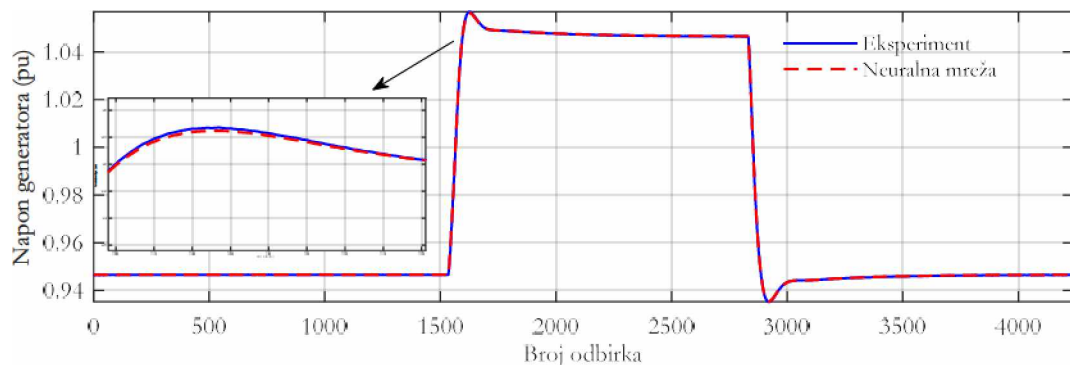
Na osnovu rezultata datih u prethodnoj tabeli, jasno je da LM algoritam pokazuje bolje performanse u odnosu na ostale algoritme za obučavanje neuralne mreže. Stoga, u nastavku su prikazani rezultati dobijeni primjenom ovog algoritma.

Obučavanjem neuralne mreže primjenom LM algoritma dobijene su sljedeće vrijednosti težinskih koeficijenata  $\mathbf{w}$  (između ulaznog i skrivenog sloja) i  $\mathbf{W}$  (između skrivenog i izlaznog sloja):

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} 0.255 & 0.191 & -2.9 \cdot 10^{-4} & -0.0157 & -0.079 \\ -0.36 & -0.209 & 0.001 & 0.002 & 0.19 \\ -0.03 & 0.003 & 0.1543 & 0.137 & -0.061 \\ -0.33 & -0.204 & 0.005 & -0.002 & 0.128 \\ 0.364 & 0.203 & -0.006 & 0.005 & -0.168 \end{bmatrix}, \quad (6.1)$$

$$\mathbf{W} = [0.446 \quad -0.588 \quad 0.041 \quad -0.543 \quad 0.582 \quad 0.202].$$

Na slici 6.2.4 prikazano je grafičko poređenje napona generatora dobijenog pomoću obučene neuralne mreže i odgovarajućeg eksperimentalno snimljenog napona generatora.



Slika 6.2.4 Grafičko poređenje eksperimentalno snimljenog napona generatora i odgovarajućeg napona dobijenog pomoću obučene neuralne mreže

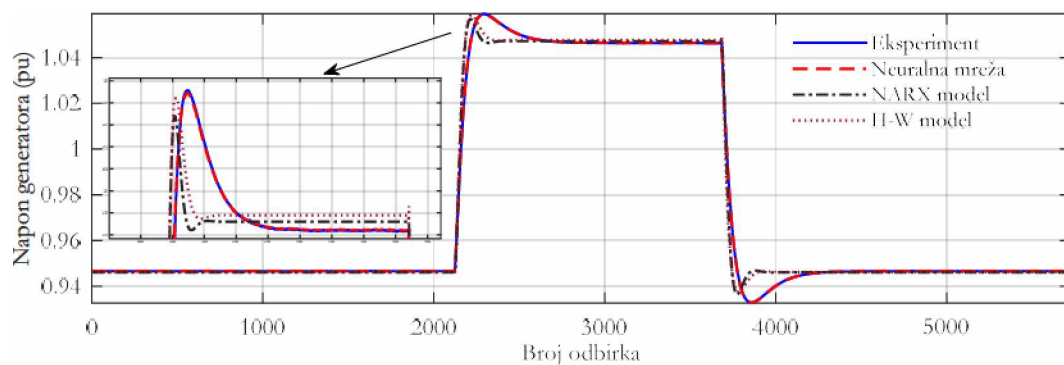
Nakon obučavanja neuralne mreže, neophodno je izvršiti testiranje, tj. validaciju dobijene neuralne mreže. Podaci za validaciju dobijeni su eksperimentalnim testovima pri različitim radnim uslovima u sistemu. Preciznije, sprovedena su četiri validaciona eksperimentalna testa, tokom kojih su snimljeni napon pobude i napon na krajevima generatora:

1. Validacioni test 1 – referentni napon ima iste vrijednosti kao priilikom obučavanja (najprije 0.95 pu, zatim 1.05 pu i na kraju opet 0.95 pu), ali su vrijednosti parametara regulatora smanjene za 50% u odnosu na nominalne.
2. Validacioni test 2 – referentni napon ima drugačije vrijednosti: u početku je podešen na nominalnu vrijednost, tj. 1 pu, zatim opadne na 0.97 pu i na kraju dostigne

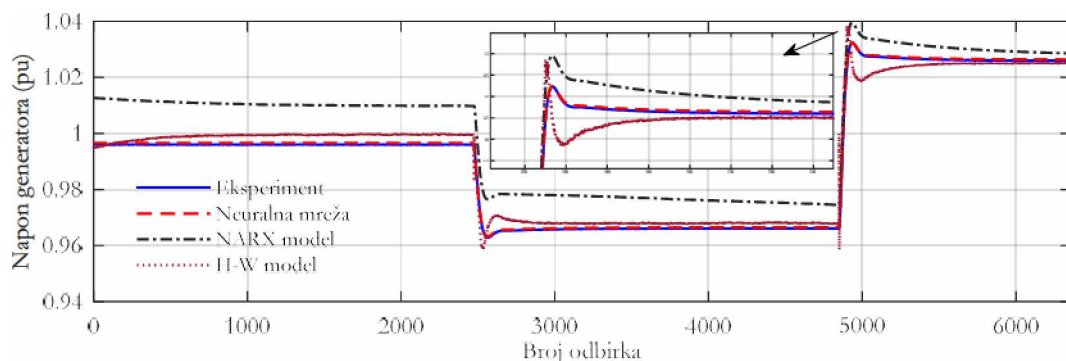
vrijednost 1.03 pu, pri čemu parametri regulatora imaju nominalne vrijednosti date u Potpoglavlju 6.1.

3. Validacioni test 3 – promjena referentnog napona je identična kao kod testa 1 (0.95 pu-1.05 pu-0.95 pu), parametri regulatora imaju nominalne vrijednosti, ali je brzina obrtanja smanjena na 90% nominalne brzine.
4. Validacioni test 4 – promjena referentnog napona je ista kao kod prethodnog testa, parametri regulatora su smanjeni za 50% i brzina obrtanja iznosi 90% nominalne brzine.

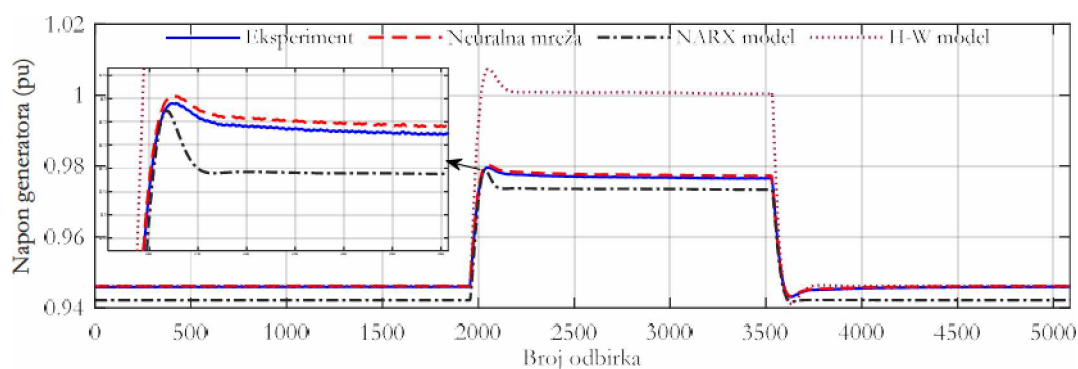
Prethodno obučena neuralna mreža primijenjena je za računanje napona na krajevima generatora prilikom četiri opisana radna režima. Validacija neuralne mreže sprovedena je poređenjem eksperimentalno snimljenog napona generatora sa naponom koji je izračunat primjenom neuralne mreže. U cilju poređenja sa predloženim modelom neuralne mreže, odabrani su drugi poznati modeli iz literature, kao što su NARX (*Nonlinear AutoRegression model with eXogenous input*) i H-W (*Hammerstein-Wiener*) modeli. Na slikama 6.2.5 – 6.2.8 prikazano je grafičko poređenje eksperimentalno snimljenog napona generatora sa odgovarajućim naponom koji je izračunat pomoću predloženog modela neuralne mreže, kao i pomoću pomenutih NARX i H-W modela, za sva četiri testa validacije.



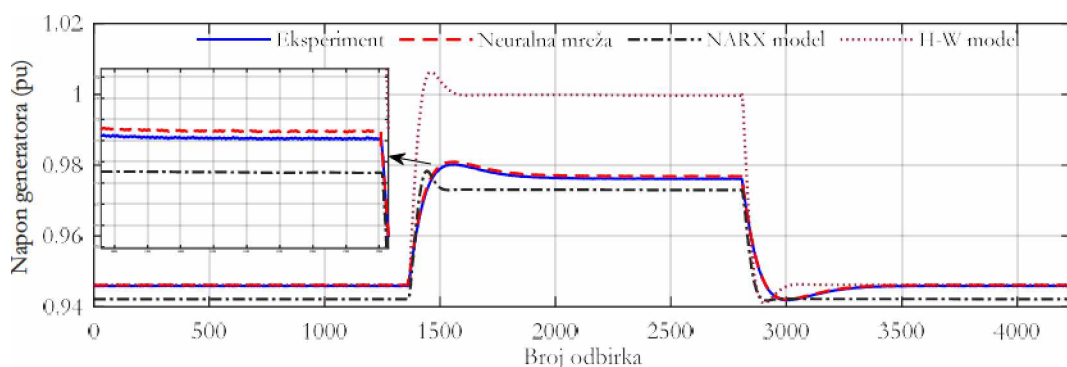
Slika 6.2.5 Poređenje odziva napona generatora – validacioni test 1



Slika 6.2.6 Poređenje odziva napona generatora – validacioni test 2



Slika 6.2.7 Poređenje odziva napona generatora – validacioni test 3



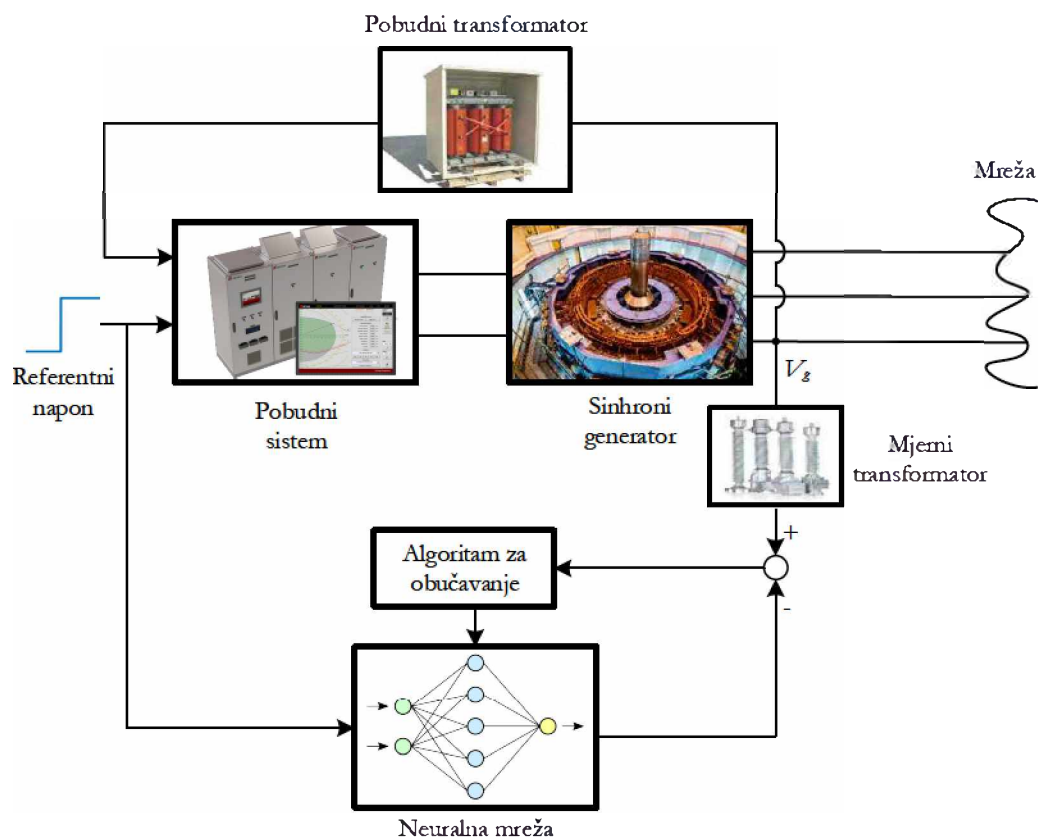
Slika 6.2.8 Poređenje odziva napona generatora – validacioni test 4

Sumarno, sprovedeni validacioni testovi služe za ispitivanje obučene neuralne mreže pri različitim radnim uslovima sistema za regulaciju pobude sinhronog generatora. Na osnovu prethodno prikazanih grafika, jasno je da se najveći stepen poklapanja sa eksperimentalno snimljenim naponom dobija primjenom predloženog modela neuralne mreže. Stoga, može se zaključiti da je model neuralne mreže precizniji i tačniji od ostala dva modela koja su primijenjena za poređenje.

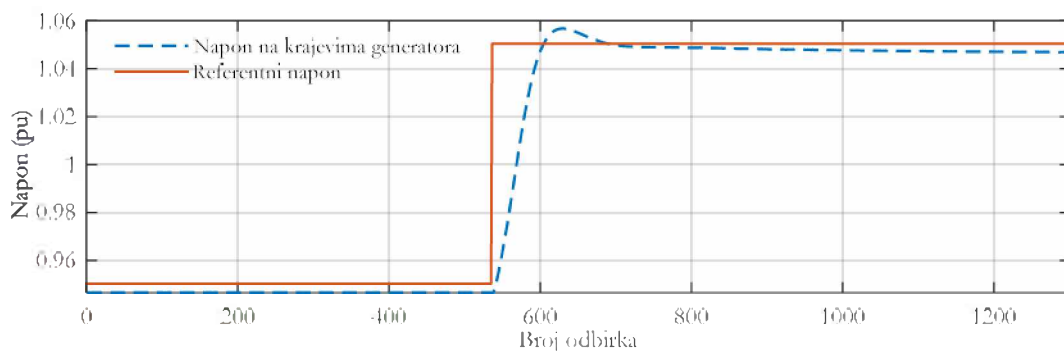
### 6.3 Modelovanje veze između referentnog napona i napona na krajevima sinhronog generatora primjenom neuralnih mreža

U okviru sprovedenog istraživanja koje je predstavljeno u radu [82], a koje predstavlja dio ove disertacije, predložen je model neuralne mreže za predstavljanje veze između referentnog napona sistema za regulaciju pobude i napona na krajevima sinhronog generatora u praznom hodu. Ovako predložen model obuhvata kompletan sistem za regulaciju pobude. Drugim riječima, predloženim modelom neuralne mreže obuhvaćena je svaka komponenta sistema za regulaciju pobude, uključujući nelinearnosti pojedinih komponenti koje su veoma složene za matematičko modelovanje.

U cilju obučavanja neuralne mreže, sprovedeni su eksperimentalni testovi opisani u Potpoglavlju 5.2. U toku rada sinhronog generatora, kada se dodaju step smetnje na referentni napon, eksperimentalno je snimljen napon na krajevima generatora. Referentni napon služi kao set ulaznih podataka, dok eksperimentalno snimljeni napon na krajevima generatora služi kao set izlaznih podataka. Kako bi se dobili odgovarajući podaci za obučavanje neuralne mreže, razmatran je sljedeći radni režim generatora: u startu, referentni napon je podešen na 95% nominalne vrijednosti (0.95 pu), zatim je nakon određenog vremena dodata step smetnja vrijednosti 0.1 pu, tako da finalna vrijednost referentnog napona iznosi 1.05 pu. U toku opisanog radnog režima, izvršeno je eksperimentalno snimanje napona na krajevima generatora. Na taj način dobijen je set ulazno-izlaznih podataka za obučavanje neuralne mreže. Blok dijagram predloženog eksperimentalnog testa i procesa obučavanje neuralne mreže dat je na slici 6.3.1. Takođe, na slici 6.3.2 prikazani su eksperimentalno snimljeni napon pobude i napon na krajevima generatora, koji služe za obučavanje neuralnih mreža.



Slika 6.3.1 Blok dijagram predloženog eksperimentalnog testa i procesa obučavanja neuralne mreže



Slika 6.3.2 Podaci za obučavanje neuralne mreže

Neuralna mreža, koja je primijenjena za modelovanje relacije između referentnog napona i napona na krajevima generatora, sastoji se od tri sloja – ulaznog, skrivenog i izlaznog sloja. Skriveni sloj ima pet neurona (plus jedan neuron koji modeluje funkciju praga), a aktivaciona funkcija ovog sloja je hiperbolični tangens. Izlazni sloj ima jedan neuron, čija aktivaciona funkcija je linearna. U ovom dijelu razmatrano je više struktura neuralne mreže. Naime, osim već prethodno pomenute ARX strukture, primijenjene su ARMAX (*AutoRegressive Moving*

*Average with eXogenous input*) i OE (*Output Error*) strukture neuralne mreže. Ulazni sloj, za sve korišćene strukture neuralne mreže, definisan je na sljedeći način:

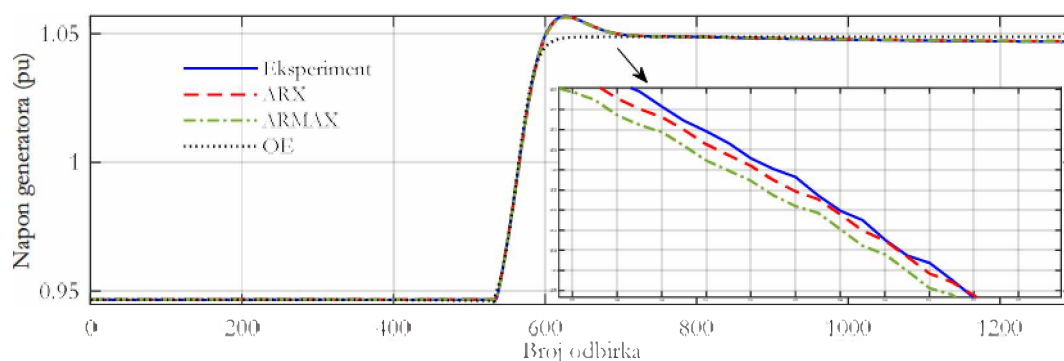
- ARX struktura: ulazni sloj ima šest neurona, a ulazi u neuralnu mrežu u trenutku  $t$  su prethodni odbirci ulaznog signala  $u(t)$  i  $y(t)$ :  $u(t-1)$ ,  $u(t-2)$ ,  $u(t-3)$ ,  $y(t-1)$ ,  $y(t-2)$  i  $y(t-3)$ ;
- ARMAX struktura: ulazni sloj ima devet neurona, a ulazi u neuralnu mrežu su prethodni odbirci ulaznog signala, izlaznog signala i signala greške ( $e$ ):  $u(t-1)$ ,  $u(t-2)$ ,  $u(t-3)$ ,  $y(t-1)$ ,  $y(t-2)$ ,  $y(t-3)$ ,  $e(t-1)$ ,  $e(t-2)$  i  $e(t-3)$ ;
- OE struktura: ulazni sloj ima šest neurona, pri čemu su ulazi u neuralnu mrežu prethodni odbirci ulaznog signala i izlaznog signala dobijenog pomoću neuralne mreže:  $u(t-1)$ ,  $u(t-2)$ ,  $u(t-3)$ ,  $\hat{y}(t-1)$ ,  $\hat{y}(t-2)$  i  $\hat{y}(t-3)$ .

U cilju sprovođenja adekvatne komparativne analize, neuralne mreže sa prethodno opisanim strukturuama su obučene primjenom LM algoritma. Podaci za obučavanje su dati na slici 6.3.2, kriterijumska funkcija je data relacijom (2.59), dok je kriterijum zaustavljanja LM algoritma definisan kao u Potpoglavlju 6.2.

Nakon kompletiranja procesa obučavanja neuralnih mreža, vrijednosti dobijene kriterijumske funkcije za sve tri razmatrane strukture date su u Tabeli 6.3.1. Takođe, na slici 6.3.3 prikazano je grafičko poređenje napona generatora dobijenog pomoću obučenih neuralnih mreža i odgovarajućeg eksperimentalno snimljenog napona generatora.

**Tabela 6.3.1** Vrijednosti kriterijumske funkcije za sve tri strukture neuralne mreže

Struktura neuralne mreže	ARX	ARMAX	OE
Vrijednost kriterijumske funkcije	$9.81 \cdot 10^{-8}$	$2.15 \cdot 10^{-7}$	$1.91 \cdot 10^{-6}$



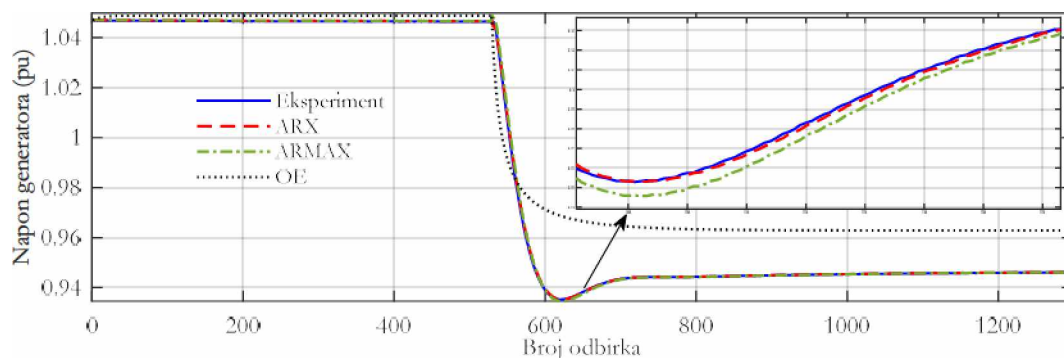
**Slika 6.3.3** Grafičko poređenje eksperimentalno snimljenog napona generatora i odgovarajućeg napona dobijenog pomoću obučenih neuralnih mreža



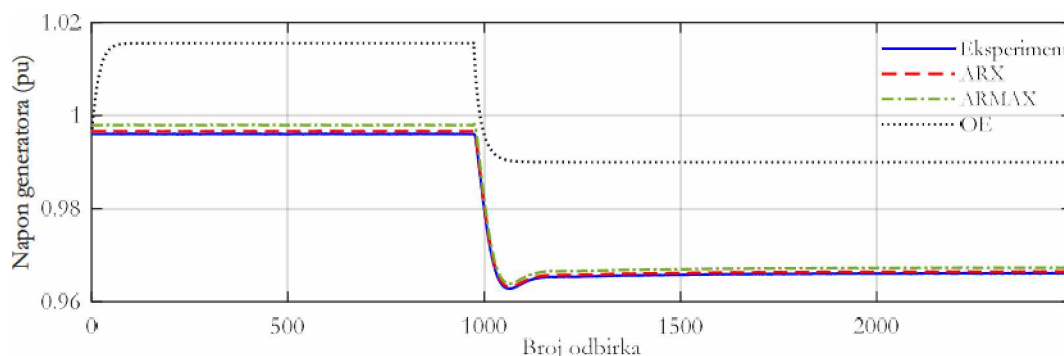
U cilju validacije obučenih neuralnih mreža različitih struktura, sprovedeni su eksperimentalni testovi kod kojih se razlikuje amplituda step smetnji na referentni napon. Preciznije, sprovedena su sljedeća tri validaciona testa, tokom kojih je eksperimentalno snimljen napon na izlazu generatora:

1. Validacioni test 1 – referentni napon ima u početku vrijednost 1.05 pu, a zatim nakon nekog vremena opadne na 0.95 pu.
2. Validacioni test 2 – referentni napon je u početku podešen na nominalnu vrijednost (1 pu), a nakon uvođenja step smetnje padne na 0.97 pu.
3. Validacioni test 3 – u startu referentni napon iznosi 0.97 pu, a nakon dodavanja step smetnje od 0.06 pu referentni napon iznosi 1.03 pu.

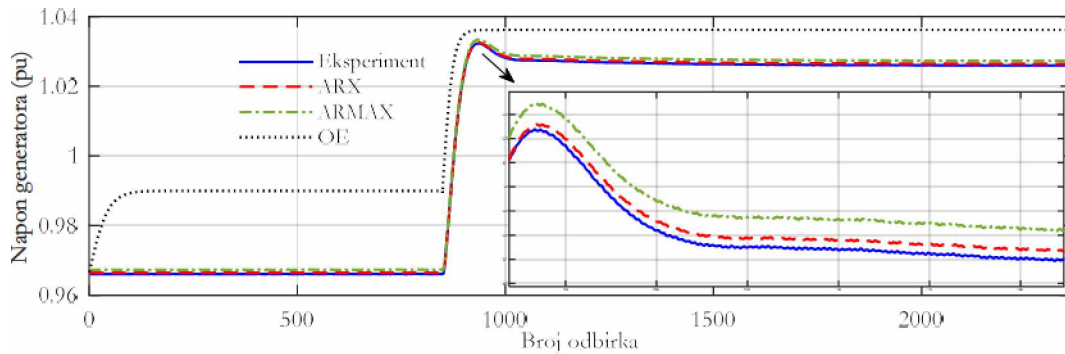
Primjenom već obučenih neuralnih mreža različitih struktura dobijen je izlazni napon generatora pri različitim radnim režimima, opisanim u sklopu tri validaciona testa. Odziv napona generatora, za sva tri navedena režima i primjenom sve tri razmatrane strukture neuralne mreže, upoređen je sa eksperimentalno snimljenim odzivom. Na slikama 6.3.4 – 6.3.6 prikazano je grafičko poređenje eksperimentalno snimljenog napona za naponom izračunatim pomoću neuralne mreže različitih struktura, za sva tri validaciona testa.



Slika 6.3.4 Poređenje odziva napona generatora – validacioni test 1



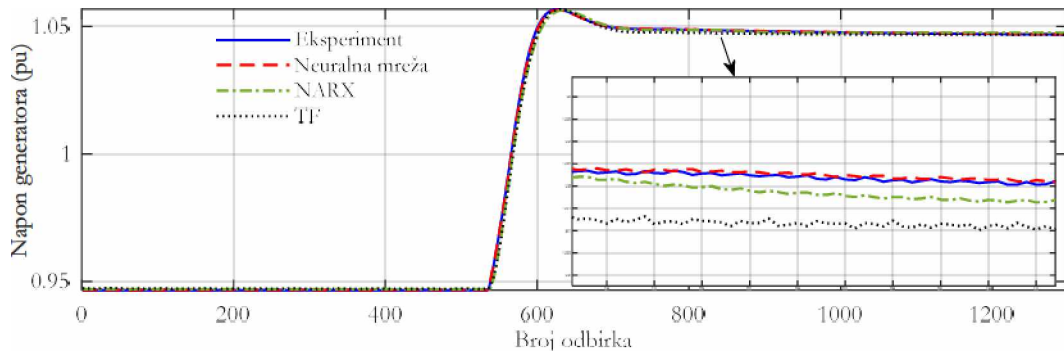
Slika 6.3.5 Poređenje odziva napona generatora – validacioni test 2



Slika 6.3.6 Poređenje odziva napona generatora – validacioni test 3

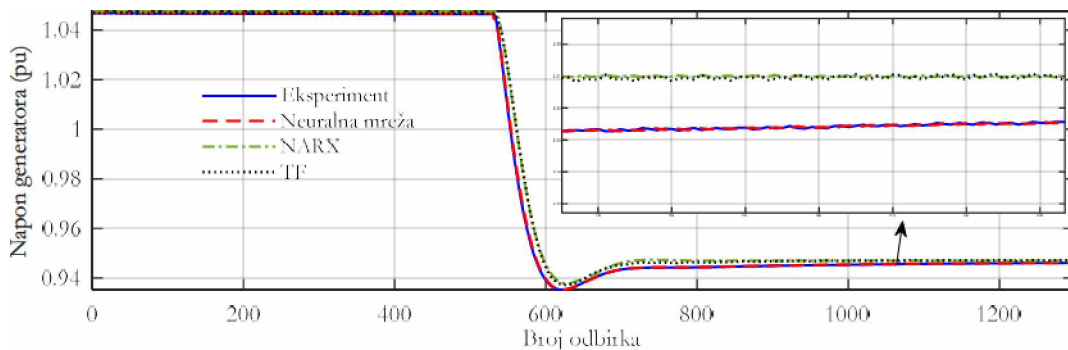
Posmatrajući rezultate iz date tabele, evidentno je da je najmanja vrijednost kriterijumske funkcije dobijena primjenom neuralne mreže sa ARX strukturom. Takođe, grafička poređenja napona tokom validacionih testova jasno ukazuju na to da je najveći stepen poklapanja sa eksperimentalno snimljenim naponom dobijen kada se koristi ARX struktura neuralne mreže. Stoga, u nastavku je korišćena neuralna mreža sa ARX strukturom.

Nakon određivanja optimalne strukture neuralne mreže, sprovedeno je poređenje predloženog modela neuralne mreže sa drugim literaturno poznatim modelima. Za svrhu poređenja odabrani su NARX model [112], koji pripada nelinearnim modelima, kao i model prenosne funkcije, tj. TF (*Transfer Function*) model [113], koji pripada linearnim modelima. Identifikacija nepoznatih parametara oba modela odgovara procesu obučavanja neuralne mreže, pa su parametri ovih modela određeni korišćenjem seta ulazno-izlaznih podataka za obučavanje neuralne mreže. Parametri su određeni primjenom LM algoritma i identične kriterijumske funkcije koja je korišćena za obučavanje neuralne mreže. Nakon sprovedenog procesa identifikacije parametara NARX i TF modela, izvršeno je njihovo poređenje sa predloženim modelom neuralne mreže. Na slici 6.3.7 dato je grafičko poređenje eksperimentalno snimljenog napona generatora sa naponom generatora koji je dobijen primjenom sva tri razmatrana modela.

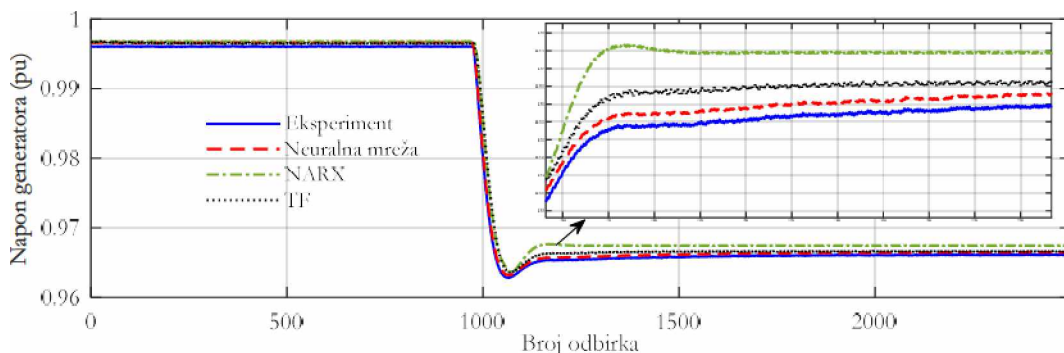


**Slika 6.3.7** Grafičko poređenje eksperimentalno snimljenog napona generatora i odgovarajućeg napona dobijenog pomoću obučene neuralne mreže i ostalih modela

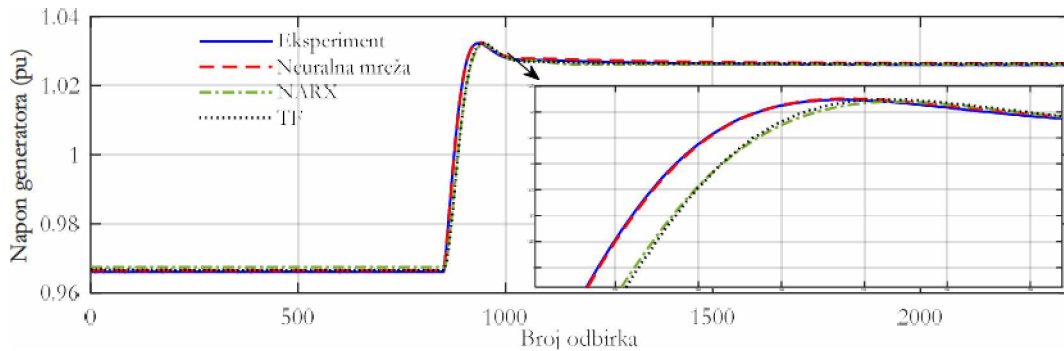
Takođe, izvršeno je poređenje obučene neuralne mreže i identifikovanih NARX i TF modela koristeći već sprovedene validacione testove. Za svaki režim koji je opisan prilikom sprovođenja validacionih testova, napon generatora je proračunat koristeći predloženi model neuralne mreže, kao i NARX i TF modele. Nakon toga, napon koji je izračunat primjenom sva tri modela upoređen je sa odgovarajućim eksperimentalno snimljenim naponom. Na slikama 6.3.8 – 6.3.10 dato je grafičko poređenje odziva napona generatora, za sva tri validaciona testa.



**Slika 6.3.8** Poređenje odziva napona generatora – validacioni test 1



**Slika 6.3.9** Poređenje odziva napona generatora – validacioni test 2



Slika 6.3.10 Poređenje odziva napona generatora – validacioni test 3

Sumarno, glavna uloga sprovedenih validacionih testova je ispitivanje performansi predloženog modela neuralne mreže, kao i NARX i TF modela, pri različitim uslovima rada sistema za regulaciju pobude. Preciznije, step smetnja na referentni napon ima različite amplitude prilikom svakog validacionog testa. Na prethodnim slikama dato je grafičko poređenje eksperimentalno snimljenog napona generatora sa odgovarajućim naponom koji je izračunat primjenom modela neuralne mreže, NARX i TF modela. Sa prikazanih grafika jasno se može zaključiti da se naponski odziv dobijen primjenom predloženog modela neuralne mreže najbolje poklapa sa eksperimentalno snimljenim odzivom. Takođe, evidentno je da, u pojedinim slučajevima, naponski odziv generatora, proračunat pomoću NARX ili TF modela, značajno odstupa od odgovarajućeg eksperimentalno snimljenog odziva. Na osnovu prethodno rečenog, jasno se može zaključiti da je predloženi model neuralne mreže znatno precizniji, tačniji i pouzdaniji za primjenu kod modelovanja relacije između referentnog napona i izlaznog napona generatora u odnosu na preostala dva modela (NARX i TF).

# Zaključak

U savremenoj elektroenergetici, sinhroni generatori dominiraju u proizvodnji električne energije. Sinhroni generatori su najveće rotacione mašine koje se danas izrađuju, a njihova snaga može premašiti čak 1000 MW. Osim u generatorskom režimu, sinhronne mašine mogu raditi u motornom i u kompenzatorskom režimu, odnosno motornom režimu praznog hoda u kojem vrijednost pobudne struje definiše tok reaktivne snage.

U dosadašnjim istraživanjima vezanim za automatsku regulaciju napona sinhronog generatora, autori se dominantno bave optimizacijom parametara regulatora primjenom velikog broja optimizacionih algoritama i različitih kriterijumskih funkcija. Takođe, estimacija parametara i modelovanje sinhronog generatora su veoma aktuelne teme naučnih istraživanja. Stoga, istraživanje sprovedeno u ovoj disertaciji može se podijeliti u tri pravca. Prvi predmet istraživanja jeste razvoj novih hibridnih i adaptivnih metaheurističkih algoritama, kao i predlog novih kriterijumskih funkcija u cilju optimizacije parametara regulatora kod sistema za automatsku regulaciju napona. Osim toga, kao rezultat istraživanja u okviru prvog pravca disertacije, predložen je novi tip regulatora i to za kompletnu i pouzdanu šemu sistema za regulaciju pobude sinhronog generatora. Drugi pravac naučnog istraživanja odnosi se na estimaciju parametara sinhronog generatora, kao i parametara svih komponenti uprošćene šeme sistema za automatsku regulaciju napona. Kao rezultat sprovedenog istraživanja, predložene su modifikacije standardnih pristupa za estimaciju parametara generatora. Takođe, predložen je novi pristup za estimaciju parametara komponenti uprošćene strukture sistema za automatsku regulaciju napona. Predloženi pristup uključuje novu testnu proceduru, pomoću koje se mogu odrediti i određeni realni parametri sinhronog generatora. Finalno, treći pravac istraživanja ove doktorske disertacije usmjeren je ka primjeni *black-box* modelovanja kod sistema za regulaciju pobude sinhronog generatora. Naime, kao rezultati ovog dijela istraživanja, razvijeni su modeli bazirani na neuralnim mrežama, pomoću kojih se modeluju relacije između referentnog napona i izlaznog napona generatora, kao i između napona pobude i napona na izlazu generatora.

Analizirajući dostupnu literaturu može se naći veliki broj radova koji se bavi tematikom optimizacije parametara regulatora koristeći uprošćenu šemu sistema za regulaciju

napona. Veliki broj različitih optimizacionih algoritama, kao i kriterijumskih funkcija, ukazuje na to da još uvijek nije pronađeno optimalno rješenje. Stoga, u ovoj doktorskoj disertaciji predložene su nove hibridne i adaptivne modifikacije metaheurističkih algoritama za optimizaciju parametara različitih tipova regulatora kod sistema za automatsku regulaciju napona sinhronog generatora. Takođe, predložene su nove kriterijumske funkcije, koje su formulisane sa ciljem obezbjeđivanja adekvatnog dinamičkog odziva sistema. Međusobnim poređenjem odziva napona generatora, pokazano je da su predloženi pristupi superiorniji od ostalih pristupa iz literature koji su korišćeni za poređenje. Dodatno, poređenjem konvergenijskih karakteristika i dobijenih vrijednosti kriterijumske funkcije, pokazano je da su predloženi modifikovani metaheuristički algoritmi bolji od drugih metaheurističkih algoritama iz dostupne literature. U okviru prvog pravca istraživanja ove doktorske disertacije, predložen je novi tip regulatora kod sistema za regulaciju pobude sinhronog generatora, pri čemu je umjesto uprošćene šeme primijenjen simulacioni model kompletnog sistema za regulaciju pobude. U cilju određivanja optimalnih vrijednosti parametara pomenutog regulatora, predloženi su novi hibridni metaheuristički algoritam i nova multi-objektivna kriterijumska funkcija, koja ima za cilj postizanje što kvalitetnijeg dinamičkog odziva sistema, kao i suzbijanje poremećaja i mjernih šumova.

U drugom segmentu istraživanja ove doktorske disertacije, najprije su predložene modifikacije standardnih procedura za estimaciju parametara sinhronog generatora. Predloženi pristupi za estimaciju parametara bazirani su na testu iznenadnog trofaznog kratkog spoja, koji je sproveden iz režima praznog hoda. U toku pomenutog testa, pobudna struja i struja armature su eksperimentalno snimljene. Za određivanje parametara koriste se najprije uprošćeni analitički izrazi, a zatim potpuni izrazi za struje pobude i struje armature. Parametri su estimirani primjenom novih varijanti metaheurističkih algoritama, pri čemu je kriterijumska funkcija matematički formulisana tako da minimizuje odstupanje proračunatog talasnog oblika struje od odgovarajućeg eksperimentalno snimljenog talasnog oblika. Predloženi pristup je verifikovan poređenjem sa drugim metodama iz literature, pri čemu su korišćeni eksperimentalno snimljeni rezultati iz HE „Bajina Bašta“. U okviru ovog pravca istraživanja doktorske disertacije, predložen je pristup za estimaciju parametara uprošćenih šema sistema za regulaciju napona. Predloženi pristup obuhvata novu testnu proceduru, koja ima brojne prednosti u odnosu na postojeće procedure. Naime, predložena testna procedura se realizuje dodavanjem step smetnje male amplitude na referentnu vrijednost napona generatora, čime se ne utiče na tokove aktivnih snaga. Ovakva procedura je izuzetno

jednostavna, praktična i laka za izvođenje. Ne zahtijeva isključenje generatora sa mreže, pa samim tim ne uzrokuje ekonomske gubitke. Takođe, pomenuta procedura ne zahtijeva nikakvu dodatnu opremu osim one koja već postoji u samoj elektrani. Primjenom predloženog pristupa, estimirani su parametri komponenti sistema za regulaciju napona, i to u dva slučaja – u prvom slučaju se koristi model generatora prvog reda, dok je u drugom slučaju generator modelovan sistemom trećeg reda. U drugom slučaju, kada je generator modelovan sistemom trećeg reda (*Heffron-Phillips*-ovim modelom), estimirani su realni parametri sinhronog generatora, što predstavlja jedan od glavnih doprinosa ove disertacije. Predloženi pristup je verifikovan korišćenjem rezultata dobijenih primjenom simulacionog modela HE „Perućica“, kao i primjenom realnih eksperimentalnih mjerenja iz HE „Piva“.

Takođe, u ovoj doktorskoj disertaciji pokazana je primjena *black-box* modelovanja kod sistema za regulaciju pobude sinhronog generatora. Glavni rezultati iz ovog pravca istraživanja disertacije su razvijeni modeli bazirani na neuralnim mrežama, pomoću kojih su modelovane relacije između napona pobude i izlaznog napona generatora, kao i između referentne vrijednosti napona i napona na izlazu generatora. Primjenom prvog razvijenog modela obuhvaćen je samo sinhroni generator, dok je drugim modelom obuhvaćen kompletan sistem za regulaciju pobude, uključujući limitere i sve ostale dodatne funkcionalne blokove. Ulazno-izlazni setovi podataka za obučavanje i validaciju neuralnih mreža dobijeni su primjenom prethodno opisane eksperimentalne testne procedure, pri čemu generator radi u režimu praznog hoda. Eksperimenti su sprovedeni na realnom sinhronom generatoru snage od 120 MVA iz HE „Piva“. Dobijeni rezultati jasno su pokazali da je model razvijen u ovoj disertaciji, koji se bazira na neuralnim mrežama, značajno tačniji i precizniji od drugih modela koji su korišćeni za poređenje.

Istraživanja koja su sprovedena i opisana u ovoj disertaciji otvaraju potencijalne pravce za buduća istraživanja. Naime, na osnovu predloženih pristupa za optimalni dizajn regulatora, moguće je razviti spoj *fuzzy* logike i pristupa predloženih u ovoj disertaciji. Preciznije, cilj je primijeniti *fuzzy* logiku za određivanje optimalnih vrijednosti parametara regulatora za različite vrijednosti parametara komponenti sistema za automatsku regulaciju napona, koji odstupaju od nominalnih vrijednosti. Na taj način moguće je poboljšati robusnost sistema na varijaciju parametara. Takođe, jedan od mogućih pravaca budućih istraživanja može biti usmjeren ka modifikaciji nekih drugih standardizovanih metoda za određivanje parametara generatora, kao što je dvofazni kratki spoj, izbacivanje opterećenja

(*load rejection*) itd. Sa druge strane, buduće istraživanje se može usmjeriti i ka razvoju modela baziranih na neuralnim mrežama, ali u režimu rada generatora pod opterećenjem. Modeli bazirani na neuralnim mrežama mogu služiti za modelovanje veze između napona pobude i napona na izlazu generatora, kao i između referentne vrijednosti napona i izlaznog napona generatora. Konkretno, cilj je obučiti neuralne mreže za različite vrijednosti opterećenja generatora, tj. za različite vrijednosti aktivne i reaktivne snage na krajevima generatora. Na taj način bilo bi moguće estimirati odziv izlaznog napona generatora za proizvoljne vrijednosti aktivne i reaktivne snage. Na osnovu prethodnog zaključuje se da ova doktorska disertacija može predstavljati adekvatnu osnovu za buduća istraživanja vezana za sistem za regulaciju pobude sinhronog generatora.



# Literatura

- [1] I. Vujošević, „Analiza elektroenergetskih sistema I“, Elektrotehnički fakultet Podgorica, 2006.
- [2] M. Čalović, „Regulacija elektroenergetskih sistema“, Tom 2, Elektrotehnički fakultet Beograd, 1997.
- [3] S. Ekinci, B. Hekimoglu, “Improved Kidney-Inspired Algorithm Approach for Tuning of PID Controller in AVR System,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 39935–39947, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2906980.
- [4] A. M. Mosaad, M. A. Attia, A. Y. Abdelaziz, “Whale optimization algorithm to tune PID and PIDA controllers on AVR system,” *Ain Shams Eng. J.*, vol. 10, no. 4, pp. 755–767, 2019, doi: 10.1016/j.asej.2019.07.004.
- [5] E. Çelik, R. Durgut, “Performance enhancement of automatic voltage regulator by modified cost function and symbiotic organisms search algorithm,” *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 21, no. 5, pp. 1104–1111, 2018, doi: 10.1016/j.jestch.2018.08.006.
- [6] A. M. Mosaad, M. A. Attia, A. Y. Abdelaziz, “Comparative Performance Analysis of AVR Controllers Using Modern Optimization Techniques,” *Electr. Power Components Syst.*, vol. 46, no. 19–20, pp. 2117–2130, 2018, doi: 10.1080/15325008.2018.1532471.
- [7] M. J. Blondin, J. Sanchis, P. Sicard, J. M. Herrero, “New optimal controller tuning method for an AVR system using a simplified Ant Colony Optimization with a new constrained Nelder–Mead algorithm,” *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 62, pp. 216–229, 2018, doi: 10.1016/j.asoc.2017.10.007.
- [8] P. K. Mohanty, B. K. Sahu, S. Panda, “Tuning and assessment of proportional-integral-derivative controller for an automatic voltage regulator system employing local unimodal sampling algorithm,” *Electr. Power Components Syst.*, vol. 42, no. 9, pp. 959–969, 2014, doi: 10.1080/15325008.2014.903546.
- [9] H. M. Hasanien, “Design optimization of PID controller in automatic voltage regulator system using taguchi combined genetic algorithm method,” *IEEE Syst. J.*, vol. 7, no. 4, pp. 825–831, 2013, doi: 10.1109/JSYST.2012.2219912.
- [10] S. Panda, B. K. Sahu, P. K. Mohanty, “Design and performance analysis of PID controller for an automatic voltage regulator system using simplified particle swarm optimization,” *J. Franklin Inst.*, vol. 349, no. 8, pp. 2609–2625, 2012, doi: 10.1016/j.jfranklin.2012.06.008.
- [11] D. H. Kim, “Hybrid GA-BF based intelligent PID controller tuning for AVR system,” *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 11, no. 1, pp. 11–22, 2011, doi: 10.1016/j.asoc.2009.01.004.
- [12] H. Gozde, M. C. Taplamacioglu, “Comparative performance analysis of artificial bee colony algorithm for automatic voltage regulator (AVR) system,” *J. Franklin Inst.*, vol. 348, no. 8, pp. 1927–1946, 2011, doi: 10.1016/j.jfranklin.2011.05.012.
- [13] L. dos Santos Coelho, “Tuning of PID controller for an automatic regulator voltage system using chaotic optimization approach,” *Chaos, Solitons and Fractals*, vol. 39, no. 4, pp. 1504–1514, 2009, doi: 10.1016/j.chaos.2007.06.018.

- [14] Z. L. Gaing, "A particle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in AVR system," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 19, no. 2, pp. 384–391, 2004, doi: 10.1109/TEC.2003.821821.
- [15] A. Chatterjee, V. Mukherjee, S. P. Ghoshal, "Velocity relaxed and craziness-based swarm optimized intelligent PID and PSS controlled AVR system," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 31, no. 7–8, pp. 323–333, 2009, doi: 10.1016/j.ijepes.2009.03.012.
- [16] H. Zhu, L. Li, Y. Zhao, Y. Guo, Y. Yang, "CAS algorithm-based optimum design of PID controller in AVR system," *Chaos, Solitons and Fractals*, vol. 42, no. 2, pp. 792–800, 2009, doi: 10.1016/j.chaos.2009.02.006.
- [17] M. J. Blondin, P. Sicard, P. M. Pardalos, "Controller Tuning Approach with robustness, stability and dynamic criteria for the original AVR System," *Math. Comput. Simul.*, vol. 163, pp. 168–182, 2019, doi: 10.1016/j.matcom.2019.02.019.
- [18] Z. Bingul, O. Karahan, "A novel performance criterion approach to optimum design of PID controller using cuckoo search algorithm for AVR system," *J. Franklin Inst.*, vol. 355, no. 13, pp. 5534–5559, 2018, doi: 10.1016/j.jfranklin.2018.05.056.
- [19] S. Chatterjee, V. Mukherjee, "PID controller for automatic voltage regulator using teaching-learning based optimization technique," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 77, pp. 418–429, 2016, doi: 10.1016/j.ijepes.2015.11.010.
- [20] M. A. Sahib, B. S. Ahmed, "A new multiobjective performance criterion used in PID tuning optimization algorithms," *J. Adv. Res.*, vol. 7, no. 1, pp. 125–134, 2016, doi: 10.1016/j.jare.2015.03.004.
- [21] A. Sikander, P. Thakur, R. C. Bansal, S. Rajasekar, "A novel technique to design cuckoo search based FOPID controller for AVR in power systems," *Comput. Electr. Eng.*, vol. 70, pp. 261–274, 2018, doi: 10.1016/j.compeleceng.2017.07.005.
- [22] M. E. Ortiz-Quisbert, M. A. Duarte-Mermoud, F. Milla, R. Castro-Linares, G. Lefranc, "Optimal fractional order adaptive controllers for AVR applications," *Electr. Eng.*, vol. 100, no. 1, pp. 267–283, 2018, doi: 10.1007/s00202-016-0502-2.
- [23] G. Q. Zeng, J. Chen, Y. X. Dai, L. M. Li, C. W. Zheng, and M. R. Chen, "Design of fractional order PID controller for automatic regulator voltage system based on multi-objective extremal optimization," *Neurocomputing*, vol. 160, pp. 173–184, 2015, doi: 10.1016/j.neucom.2015.02.051.
- [24] D.-L. ZHANG, Y.-G. TANG, X.-P. GUAN, "Optimum Design of Fractional Order PID Controller for an AVR System Using an Improved Artificial Bee Colony Algorithm," *Acta Autom. Sin.*, vol. 40, no. 5, pp. 973–979, 2014, doi: 10.1016/s1874-1029(14)60010-0.
- [25] I. Pan, S. Das, "Frequency domain design of fractional order PID controller for AVR system using chaotic multi-objective optimization," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 51, pp. 106–118, 2013, doi: 10.1016/j.ijepes.2013.02.021.
- [26] Y. Tang, M. Cui, C. Hua, L. Li, Y. Yang, "Optimum design of fractional order PI  $\lambda$ D  $\mu$  controller for AVR system using chaotic ant swarm," *Expert Syst. Appl.*, vol. 39, no. 8, pp. 6887–6896, 2012, doi: 10.1016/j.eswa.2012.01.007.

- [27] I. Pan, S. Das, “Chaotic multi-objective optimization based design of fractional order  $PI\lambda D\mu$  controller in AVR system,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 43, no. 1, pp. 393–407, 2012, doi: 10.1016/j.ijepes.2012.06.034.
- [28] M. Zamani, M. Karimi-Ghartemani, N. Sadati, M. Parniani, “Design of a fractional order PID controller for an AVR using particle swarm optimization,” *Control Eng. Pract.*, vol. 17, no. 12, pp. 1380–1387, 2009, doi: 10.1016/j.conengprac.2009.07.005.
- [29] S. Das, I. Pan, “On the mixed  $H_2/H_\infty$  loop-shaping tradeoffs in fractional-order control of the AVR System,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 10, no. 4, pp. 1982–1991, 2014, doi: 10.1109/TII.2014.2322812.
- [30] M. A. Sahib, “A novel optimal PID plus second order derivative controller for AVR system,” *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 18, no. 2, pp. 194–206, 2015, doi: 10.1016/j.jestch.2014.11.006.
- [31] D. Izci, S. Ekinci, S. Mirjalili, “Optimal PID plus second-order derivative controller design for AVR system using a modified Runge Kutta optimizer and Bode’s ideal reference model,” *Int. J. Dyn. Control*, 2022, doi: 10.1007/s40435-022-01046-9.
- [32] S. Ekinci, D. Izci, E. Eker, L. Abualigah, “An effective control design approach based on novel enhanced aquila optimizer for automatic voltage regulator,” *Artif. Intell. Rev.*, vol. 56, no. 2, pp. 1731–1762, 2023, doi: 10.1007/s10462-022-10216-2.
- [33] D. Izci, S. Ekinci, H. L. Zeynelgil, “Controlling an automatic voltage regulator using a novel Harris hawks and simulated annealing optimization technique,” *Adv. Control Appl.*, vol. n/a, no. n/a, p. e121, Jan. 2023, doi: <https://doi.org/10.1002/adc2.121>.
- [34] S. Veinović, D. Stojić, D. Joksimović, “Optimized four-parameter PID controller for AVR systems with respect to robustness,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 135, no. July 2021, 2022, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107529.
- [35] P. Oziablo, D. Mozyrska, M. Wyrwas, “Fractional-variable-order digital controller design tuned with the chaotic yellow saddle goatfish algorithm for the AVR system,” *ISA Trans.*, vol. 125, pp. 260–267, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2021.07.006>.
- [36] A. Tabak, “Maiden application of fractional order PID plus second order derivative controller in automatic voltage regulator,” *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 31, no. 12, p. e13211, Dec. 2021, doi: <https://doi.org/10.1002/2050-7038.13211>.
- [37] Ö. Can, C. Andiç, S. Ekinci, D. Izci, “Enhancing transient response performance of automatic voltage regulator system by using a novel control design strategy,” *Electr. Eng.*, vol. 105, no. 4, pp. 1993–2005, 2023, doi: 10.1007/s00202-023-01777-8.
- [38] I. Moschos, C. Parisses, “A novel optimal  $PI\lambda DND_2N_2$  controller using coyote optimization algorithm for an AVR system,” *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 26, p. 100991, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.04.010>.
- [39] V. Padiachy, U. Mehta, S. Azid, S. Prasad, R. Kumar, “Two degree of freedom fractional PI scheme for automatic voltage regulation,” *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 30, p. 101046, 2022, doi: 10.1016/j.jestch.2021.08.003.
- [40] I. Eke, M. Saka, H. Gozde, Y. Arya, M. C. Taplamacioglu, “Heuristic optimization based dynamic weighted state feedback approach for 2DOF PI-controller in automatic voltage

regulator,” *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 24, no. 4, pp. 899–910, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.12.023>.

[41] H. Gozde, “Robust 2DOF state-feedback PI-controller based on meta-heuristic optimization for automatic voltage regulation system,” *ISA Trans.*, vol. 98, no. xxxx, pp. 26–36, 2020, doi: [10.1016/j.isatra.2019.08.056](https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.08.056).

[42] S. Safiullah, A. Rahman, S. A. Lone, “A 2nd order Active Disturbance Rejection Controller for coordinated frequency-voltage control of deregulated hybrid power system with optimal electric-vehicle integration,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 210, p. 108129, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108129>.

[43] S. Malladi, N. Yadaiah, “Design and analysis of Linear Active Disturbance Rejection Controller for AVR system,” in *2015 International Conference on Industrial Instrumentation and Control (ICIC)*, 2015, pp. 771–776. doi: [10.1109/IIC.2015.7150846](https://doi.org/10.1109/IIC.2015.7150846).

[44] M. S. Ayas, A. K. Sahin, “A reinforcement learning approach to Automatic Voltage Regulator system,” *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 121, p. 106050, 2023, doi: [10.1016/j.engappai.2023.106050](https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106050).

[45] P. Li *et al.*, “Deep Reinforcement Learning-Based Adaptive Voltage Control of Active Distribution Networks with Multi-terminal Soft Open Point,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 141, p. 108138, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108138>.

[46] A. J. H. Al Gizi, M. W. Mustafa, N. A. Al-geelani, M. A. Alsaedi, “Sugeno fuzzy PID tuning, by genetic-neutral for AVR in electrical power generation,” *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 28, pp. 226–236, 2015, doi: [10.1016/j.asoc.2014.10.046](https://doi.org/10.1016/j.asoc.2014.10.046).

[47] A. J. H. Al Gizi, M. W. Mustafa, H. H. Jebur, “A novel design of high-sensitive fuzzy PID controller,” *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 24, pp. 794–805, 2014, doi: [10.1016/j.asoc.2014.08.001](https://doi.org/10.1016/j.asoc.2014.08.001).

[48] M. Micev, M. Čalasan, D. Oliva, “Design and robustness analysis of an Automatic Voltage Regulator system controller by using Equilibrium Optimizer algorithm,” *Comput. Electr. Eng.*, vol. 89, p. 106930, 2021, doi: [10.1016/j.compeleceng.2020.106930](https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2020.106930).

[49] M. Micev, M. Čalasan, D. Oliva, “Fractional order PID controller design for an AVR system using Chaotic Yellow Saddle Goatfish Algorithm,” *Mathematics*, vol. 8, no. 7, 2020, doi: [10.3390/math8071182](https://doi.org/10.3390/math8071182).

[50] M. Micev, M. Čalasan, Z. M. Ali, H. M. Hasanien, S. H. E. Abdel Aleem, “Optimal design of automatic voltage regulation controller using hybrid simulated annealing-Manta ray foraging optimization algorithm,” *Ain Shams Eng. J.*, vol. 12, no. 1, pp. 641–657, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.07.010>.

[51] M. Čalasan, M. Micev, M. Radulović, A. F. Zobaa, H. M. Hasanien, S. H. E. Abdel Aleem, “Optimal PID controllers for AVR system considering excitation voltage limitations using hybrid equilibrium optimizer,” *Machines*, vol. 9, no. 11, 2021. doi: [10.3390/machines9110265](https://doi.org/10.3390/machines9110265).

[52] M. Micev, M. Čalasan, M. Radulović, “Optimal tuning of the novel voltage regulation controller considering the real model of the automatic voltage regulation system,” *Helvion*, vol. 9, no. 8, p. e18707, 2023, doi: [10.1016/j.helivon.2023.e18707](https://doi.org/10.1016/j.helivon.2023.e18707).

[53] *IEEE Guide: Test Procedures for Synchronous Machines*, IEEE Standard 115-1995, 1995.

- [54] *Rotating Electrical Machines—Part 4: Methods for Determining Synchronous Machine Quantities from Tests*, IEC Standard, IEC-60034-4 2008, 2008.
- [55] R. Wamkeue, C. Jolette, A. B. M. Mabwe, I. Kamwa, “Cross-identification of synchronous generator parameters from RTDR test time-domain analytical responses,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 26, no. 3, pp. 776–786, 2011, doi: 10.1109/TEC.2011.2140320.
- [56] B. Zaker, G. B. Gharehpetian, M. Karraei, “Improving synchronous generator parameters estimation using  $d$ - $q$  axes tests and considering saturation effect,” *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol. 14, no. 5, pp. 1898–1908, 2018, doi: 10.1109/TII.2017.2759502.
- [57] M. A. González-Cagigal, J. A. Rosendo-Macías, A. Gómez-Expósito, “Parameter estimation of fully regulated synchronous generators using unscented Kalman filters,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 168, 2019, pp. 210–217, doi: 10.1016/j.epsr.2018.11.018.
- [58] J. Huang, K. A. Corzine, M. Belkhaty, “Online synchronous machine parameter extraction from small-signal injection techniques,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 24, no. 1, pp. 43–51, 2009, doi: 10.1109/TEC.2008.2008953.
- [59] A. Rouhani, A. Abur, “Constrained iterated unscented Kalman filter for dynamic state and parameter estimation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 3, pp. 2404–2414, 2018, doi: 10.1109/TPWRS.2017.2764005.
- [60] B. Ahmadzadeh-Shooshtari, R. Torkezadeh, M. Kordi, H. Marzooghi, F. Eghtedarnia, “SG parameters estimation based on synchrophasor data,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 12, no. 12, pp. 2958–2967, 2018, doi: 10.1049/iet-gtd.2017.1989.
- [61] B. Zaker, G. B. Gharehpetian, M. Karraei, N. Moaddabi, “Simultaneous parameter identification of synchronous generator and excitation system using online measurements,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 3, pp. 1230–1238, 2016, doi: 10.1109/TSG.2015.2478971.
- [62] Y. Xu, L. Mili, M. Korkali, X. Chen, “An adaptive Bayesian parameter estimation of a synchronous generator under gross errors,” *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 16, no. 8, pp. 5088–5098, 2020, doi: 10.1109/TII.2019.2950238.
- [63] V. Zimmer, I. C. Decker, A. S. e Silva, “A robust approach for the identification of synchronous machine parameters and dynamic states based on PMU data,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 165, no. September, pp. 167–178, 2018, doi: 10.1016/j.epsr.2018.09.008.
- [64] Y. Li, J. Li, J. Qi, L. Chen, “Robust cubature Kalman filter for dynamic state estimation of synchronous machines under unknown measurement noise statistics,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 29139–29148, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2900228.
- [65] G. Valverde, E. Kyriakides, G. T. Heydt, V. Terzija, “Nonlinear estimation of synchronous machine parameters using operating data,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 26, no. 3, pp. 831–839, 2011, doi: 10.1109/TEC.2011.2141136.
- [66] M. Cisneros-González, C. Hernandez, R. Morales- Caporal, E. Bonilla- Huerta, M. A. Arjona, “Parameter estimation of a synchronous generator two-axis model based on the standstill chirp test,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 28, no. 1, pp. 44–51, 2013, doi: 10.1109/TEC.2012.2236433.
- [67] M. A. Arjona, M. Cisneros-Gonzalez, C. Hernandez, “Parameter estimation of a synchronous generator using a sine cardinal perturbation and mixed stochasticdeterministic

- algorithms,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 2, pp. 486–493, 2011, doi: 10.1109/TIE.2010.2047833.
- [68] V. A. D. Faria, J. V. Bernardes, E. C. Bortoni, “Parameter estimation of synchronous machines considering field voltage variation during the sudden short-circuit test,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 114, no. July 2019, p. 105421, 2020, doi: 10.1016/j.ijepes.2019.105421.
- [69] J. Lidenholm, U. Lundin, “Estimation of hydropower generator parameters through field simulations of standard tests,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 25, no. 4, pp. 931–939, 2010, doi: 10.1109/TEC.2010.2064776.
- [70] E. L. Geraldi, T. C. C. Fernandes, A. B. Piardi, A. P. Grilo, R. A. Ramos, “Parameter estimation of a synchronous generator model under unbalanced operating conditions,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 187, no. June, p. 106487, 2020, doi: 10.1016/j.epsr.2020.106487.
- [71] B. Brkovic, D. Petrovic, R. Vasic, “Determination of synchronous generator parameters using the field current waveform,” in *Proc. 18th Int. Symp. Power Electron.*, Novi Sad, Serbia, Oct. 2015, pp. 1–8.
- [72] L. Beordo, E. P. T. Cari, T. G. Landgraf, L. F. C. Alberto, “A comparative validation of a synchronous generator by trajectory sensitivity and offline methods,” *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 27, no. 2, 2017, doi: 10.1002/etep.2255.
- [73] M. Micev, M. Calasan, D. S. Petrovic, Z. M. Ali, N. V. Quynh, S. H. E. Abdel Aleem, “Field current waveform-based method for estimation of synchronous generator parameters using adaptive black widow optimization algorithm,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 207537–207550, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3037510.
- [74] M. Micev, M. Calasan, S. H. E. A. Aleem, H. M. Hasanien, D. S. Petrovic, “Two Novel Approaches for Identification of Synchronous Machine Parameters from Short-Circuit Current Waveform,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 69, no. 6, pp. 5536–5546, 2022, doi: 10.1109/TIE.2021.3086715.
- [75] M. Micev, M. Calasan, M. Radulovic, “Full Synchronous Machine Parameters Identification Based on Field and Armature Current during the Short-Circuit,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 57, no. 6, pp. 5959–5968, 2021, doi: 10.1109/TIA.2021.3112141.
- [76] M. Micev, M. Calasan, M. Radulovic, S. H. E. A. Aleem, H. M. Hasanien, A. F. Zobaa, “Artificial Neural Network-Based Nonlinear Black-box Modeling of Synchronous Generators,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 19, no. 3, pp. 2826–2837, 2023, doi: 10.1109/TII.2022.3187740.
- [77] S. Biradar, S. Saxena, Y. V. Hote, “Simplified model identification of automatic voltage regulator using model-order reduction,” *Proc. 2015 IEEE Int. Conf. Power Adv. Control Eng. ICPACE 2015*, pp. 423–428, 2015, doi: 10.1109/ICPACE.2015.7274985.
- [78] J. Q. Puma, D. G. Colomé, “Parameters identification of excitation system models using genetic algorithms,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 2, no. 3, pp. 456–467, 2008, doi: 10.1049/iet-gtd:20070170.
- [79] C. Li, H. Li, P. Kou, “Piecewise function based gravitational search algorithm and its application on parameter identification of AVR system,” *Neurocomputing*, vol. 124, pp. 139–148, 2014, doi: 10.1016/j.neucom.2013.07.018.

- [80] D. M. Gillard, K. E. Bollinger, "Neural network identification of power system transfer functions," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 11, no. 1, pp. 104–110, 1996, doi: 10.1109/60.486583.
- [81] L. Ren, G. W. Irwin, D. Flynn, "Nonlinear identification of turbogenerator AVR loop dynamics using fuzzy clustering," *PowerCon 2002-2002 Int. Conf. Power Syst. Technol. Proc.*, vol. 3, pp. 1503–1508, 2002, doi: 10.1109/ICPST.2002.1067781.
- [82] M. Micev, M. Čalasan, D. Stipanović, M. Radulović, "Modeling the relation between the AVR setpoint and the terminal voltage of the generator using artificial neural networks," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 120, p. 105852, 2023, doi: 10.1016/j.engappai.2023.105852.
- [83] "IEEE Standard Definitions for Excitation Systems for Synchronous Machines," *IEEE Std 421.1-2007 (Revision of IEEE Std 421.1-1986)*. pp. 1–33, 2007. doi: 10.1109/IEEESTD.2007.385319.
- [84] M. P. Čalasan, „Simulacioni model i dinamika statičkog pobudnog sistema sinhronih generatora u HE "Perućica",“ Magistarski rad, Podgorica, 2010. godine.
- [85] Proportional-Integral (PI) control, preuzeto sa:  
<https://apmonitor.com/pdc/index.php/Main/ProportionalIntegralControl>
- [86] K. H. Ang, G. Chong, Y. Li, "PID control system analysis, design, and technology," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 13, no. 4, pp. 559–576, 2005, doi: 10.1109/TCST.2005.847331.
- [87] K. J. Astrom, L. Rundqwist, "Integrator windup and how to avoid it," in *1989 American Control Conference*, 1989, pp. 1693–1698. doi: 10.23919/acc.1989.4790464.
- [88] B. Adkins, R. G. Harley, *The General Theory Of Alternating Current Machines: Applications to Practical Problems*. Cham, Switzerland, Springer, 1975.
- [89] A. Savić, D. Šošić, G. Dobrić, M. Žarković, „Metode optimizacije: primena u elektroenergetici,“ Akademska misao, Beograd, 2018.
- [90] E. G. Talbi, „*Metaheuristics: from design to implementation*,“ Wiley, New Jersey, 2009.
- [91] A. Faramarzi, M. Heidarinejad, B. Stephens, S. Mirjalili, "Equilibrium optimizer: A novel optimization algorithm," *Knowledge-Based Syst.*, vol. 191, 2020, doi: 10.1016/j.knosys.2019.105190.
- [92] D. Zaldívar, B. Morales, A. Rodríguez, A. Valdivia-G, E. Cuevas, M. Pérez-Cisneros, "A novel bio-inspired optimization model based on Yellow Saddle Goatfish behavior," *BioSystems*, vol. 174, pp. 1–21, 2018, doi: 10.1016/j.biosystems.2018.09.007.
- [93] W. Zhao, Z. Zhang, L. Wang, "Manta ray foraging optimization: An effective bio-inspired optimizer for engineering applications," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 87, no. October 2019, p. 103300, 2020, doi: 10.1016/j.engappai.2019.103300.
- [94] V. Hayyolalam, A. A. Pourhaji Kazem, "Black Widow Optimization Algorithm: A novel meta-heuristic approach for solving engineering optimization problems," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 87, no. September 2019, p. 103249, 2020, doi: 10.1016/j.engappai.2019.103249.
- [95] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, A. Lewis, "Grey Wolf Optimizer," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 69, pp. 46–61, 2014, doi: 10.1016/j.advengsoft.2013.12.007.

- [96] B. Abdollahzadeh, F. S. Gharehchopogh, S. Mirjalili, "African vultures optimization algorithm: A new nature-inspired metaheuristic algorithm for global optimization problems," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 158, p. 107408, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107408>.
- [97] A. Sadollah, H. Eskandar, A. Bahreininejad, J. H. Kim, "Water cycle algorithm with evaporation rate for solving constrained and unconstrained optimization problems," *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 30, pp. 58–71, 2015, doi: 10.1016/j.asoc.2015.01.050.
- [98] F. J. Rodriguez, C. García-Martínez, M. Lozano, "Hybrid metaheuristics based on evolutionary algorithms and simulated annealing: Taxonomy, comparison, and synergy test," *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 16, no. 6, pp. 787–800, 2012, doi: 10.1109/TEVC.2012.2182773.
- [99] M. Ausloos, M. Dirickx, *The Logistic Map and the Route to Chaos*, Berlin, Germany: Springer, 2006.
- [100] D. Delahaye, S. Chaimatanan, M. Mongeau, "Simulated annealing: From basics to applications," in *International Series in Operations Research and Management Science*, M. Gendreau and J.-Y. Potvin, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 1–35. doi: 10.1007/978-3-319-91086-4\_1.
- [101] I. A. Basheer, M. Hajmeer, "Artificial neural networks: Fundamentals, computing, design, and application," *J. Microbiol. Methods*, vol. 43, no. 1, pp. 3–31, 2000, doi: 10.1016/S0167-7012(00)00201-3.
- [102] M. Nørgaard, O. Ravn, N. K. Poulsen, L. K. Hansen, "Neural Networks for Modelling and Control of Dynamic Systems", 1st ed. London, U.K.: Springer-Verlag, 2000.
- [103] K. Levenberg, "A method for the solution of certain non-linear problems in least squares," *Q. Appl. Math.*, vol. 2, no. 2, pp. 164–168, 1944, doi: 10.1090/qam/10666.
- [104] H. P. Gavin, "The Levenberg-Marquardt Algorithm For Nonlinear Least Squares Curve-Fitting Problems," *Duke Univ.*, pp. 1–19, 2019, [Online]. Dostupno: <http://people.duke.edu/~hpgavin/ce281/lm.pdf>
- [105] T. A. Lipo, *Analysis of Synchronous Machines*, 2nd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2017.
- [106] V. M. Alfaro, R. Vilanova, "Two-degree-of-freedom proportional integral control of inverse response second-order processes," in *2012 16th International Conference on System Theory, Control and Computing, ICSTCC 2012-Joint Conference Proceedings*, 2012, pp. 1–6.
- [107] A. A. Heidari, S. Mirjalili, H. Faris, I. Aljarah, M. Mafarja, H. Chen, "Harris hawks optimization: Algorithm and applications," *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 97, pp. 849–872, 2019, doi: 10.1016/j.future.2019.02.028.
- [108] F. A. Hashim, E. H. Houssein, M. S. Mabrouk, W. Al-Atabany, S. Mirjalili, "Henry gas solubility optimization: A novel physics-based algorithm," *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 101, pp. 646–667, 2019, doi: 10.1016/j.future.2019.07.015.
- [109] A. Faramarzi, M. Heidarinejad, S. Mirjalili, A. H. Gandomi, "Marine Predators Algorithm: A nature-inspired metaheuristic," *Expert Syst. Appl.*, vol. 152, p. 113377, 2020, doi: 10.1016/j.eswa.2020.113377.



[110] M. Micev, M. Calasan, M. Radulovic, "Identification of synchronous generator parameters from operating data during the short-circuit from no-load operation," *2021 20th Int. Symp. INFOTEH-JAHORINA, INFOTEH 2021-Proc.*, no. March, pp. 17–19, 2021, doi: 10.1109/INFOTEH51037.2021.9400701.

[111] F. Marini, B. Walczak, "Particle swarm optimization (PSO). A tutorial," *Chemom. Intell. Lab. Syst.*, vol. 149, pp. 153–165, 2015, doi: 10.1016/j.chemolab.2015.08.020.

[112] Estimate parameters of nonlinear ARX model, preuzeto sa:

<https://www.mathworks.com/help/ident/ref/nlarx.html>

[113] Estimate Transfer Function Models in the System Identification App., preuzeto sa:

<https://www.mathworks.com/help/ident/ug/how-to-estimate-transfer-function-models-in-the-system-identification-app.html>

## KRATKA BIOGRAFIJA

Mihailo Micev rođen je 1. novembra 1995. godine u Podgorici. Za postignut uspjeh tokom školovanja u Osnovnoj školi Pavle Rovinski i Gimnaziji Slobodan Škerović, dobitnik je nagrade Luča A. Osnovne studije na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta Crne Gore, odsjek Energetika i automatika, upisao je 2014. i završio ih 2017. godine sa prosječnom ocjenom 10. U septembru 2017. godine upisao je specijalističke studije na Elektrotehničkom fakultetu u Podgorici, smjer Automatika, koje je završio u julu 2018. godine sa prosječnom ocjenom 10. Magistarske studije upisao je u septembru 2018. godine i završio u julu 2020. godine sa prosječnom ocjenom 10. Doktorske studije na Elektrotehničkom fakultet u Podgorici upisao je u oktobru 2020. godine.

Tokom druge i treće godine osnovnih studija, kao i na specijalističkim studijama, bio je korisnik stipendije Ministarstva prosvjete Crne Gore za talentovane studente. Nagrađen je od Univerziteta Crne Gore za postignut uspjeh u toku studijske 2016/17. godine i za završene studije sa najboljim uspjehom 2018. godine, kao i od Elektrotehničkog fakulteta za najboljeg studenta sa završenim osnovnim studijama, za odsjek Energetika i automatika. Za studijsku 2017/18. godinu dobitnik je stipendije Inženjerske komore Crne Gore, stipendije Crnogorske akademije nauka i umjetnosti, kao i stipendije koju najboljim studentima dodjeljuje JP Regionalni vodovod Crnogorsko primorje. Dobitnik je Studentske nagrade glavnog grada Podgorice za 2018. godinu, kao i nagrade Crnogorske akademije nauka i umjetnosti za mlade naučnike za 2022. godinu.

Od februara 2019. godine zaposlen je kao saradnik u nastavi na Elektrotehničkom fakultetu.

# IZJAVA O AUTORSTVU

Potpisani: Mihailo Micev

Broj indeksa: 2/2020


## Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom

### **Novi pristupi u identifikaciji i optimizaciji parametara glavnih komponenti sistema za regulaciju pobude sinhronih generatora**

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

Potpis doktoranda



U Podgorici, oktobar 2023.

# IZJAVA O ISTOVJETNOSTI ŠTAMPANE I ELEKTRONSKE VERZIJE DOKTORSKOG RADA

Ime i prezime autora: Mihailo Micev

Broj indeksa/upisa: 2/2020

Studijski program: Automatika

Naslov rada: **Novi pristupi u identifikaciji i optimizaciji parametara glavnih komponenti sistema za regulaciju pobude sinhronih generatora**

Mentor: Doc. dr Martin Čalasan

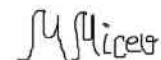
Komentor: Prof. dr Milovan Radulović

Potpisani: Mihailo Micev

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

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

Potpis doktoranda



U Podgorici, oktobar 2023.

# IZJAVA O KORIŠĆENJU

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku da u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore pohrani moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

## **Novi pristupi u identifikaciji i optimizaciji parametara glavnih komponenti sistema za regulaciju pobude sinhronih generatora**

koja je moje autorsko djelo.

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

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio.

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

Potpis doktoranda



U Podgorici, oktobar 2023.

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