

# Razvoj i primjena metode za postavljanje i prilagodbu parametara stabilizatora elektromehaničkih oscilacija pomoću pokazatelja kompleksne frekvencijske domene i vremenske domene

---

Kljajić, Ružica

Doctoral thesis / Doktorski rad

2024

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:181398>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-30**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA

Ružica Kljajić

RAZVOJ I PRIMJENA METODE ZA POSTAVLJANJE I PRILAGODBU  
PARAMETARA STABILIZATORA ELEKTROMEHANIČKIH  
OSCILACIJA POMOĆU POKAZATELJA KOMPLEKSNE  
FREKVENCIJSKE DOMENE I VREMENSKE DOMENE

Doktorski rad

Osijek, 2024.

Doktorska je disertacija izrađena na Zavodu za elektroenergetiku  
Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek  
Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

Mentor: prof.dr.sc. Predrag Marić

Disertacija ima 237 stranica.

Doktorska disertacija broj: 97

# Sadržaj

<b>1</b>	<b>Uvod</b> .....	1
<b>2</b>	<b>Problematika niskofrekvencijskih oscilacija u složenom elektroenergetskom sustavu</b> ..	3
2.1	Klasifikacija stabilnosti .....	3
2.2	Etiologija oscilacija u elektroenergetskom sustavu.....	7
2.3	Metode parametriranja stabilizatora elektromehaničkih oscilacija .....	13
2.4	Optimizacijske metode parametriranja stabilizatora elektromehaničkih oscilacija .....	15
2.5	Specifične primjene stabilizatora elektromehaničkih oscilacija.....	17
<b>3</b>	<b>Metoda za postavljanje i prilagodbu parametara stabilizatora elektromehaničkih oscilacija pomoću pokazatelja kompleksne frekvencijske i vremenske domene</b> .....	21
3.1	Analička metoda parametriranja stabilizatora elektromehaničkih oscilacija .....	21
3.1.1	Participacijska analiza .....	28
3.1.2	Odabir strukture stabilizatora elektromehaničkih oscilacija i njegovih početnih parametara .....	29
3.1.3	Određivanje vremenske konstante stabilizatora elektromehaničkih oscilacija .....	32
3.1.4	Određivanje pojačanja stabilizatora elektromehaničkih oscilacija .....	35
3.1.5	Verifikacija parametara .....	36
3.2	Optimizacijske metode parametriranja stabilizatora elektromehaničkih oscilacija .....	37
3.2.1	Metoda roja čestica.....	38
3.2.2	Genetski algoritam .....	42
3.2.3	Simulirano kaljenje .....	45
3.2.4	Tabu pretraživanje.....	49
<b>4</b>	<b>Parametriranje stabilizatora i ispitivanje na višestrojnom sustavu</b> .....	52
4.1	Opis testnog sustava sa 14 sabirnica.....	52
4.2	Scenariji .....	57
4.3	Rezultati.....	58
4.4	Scenarij 1 - Analička metoda parametriranja stabilizatora elektromehaničkih oscilacija za trajanje poremećaja 50 ms .....	62
4.5	Scenarij 2 - Primjena metoda mekog računarstva .....	84
4.5.1	Metoda roja čestica.....	84
4.5.2	Metoda genetskog algoritma .....	90
4.5.3	Metoda simuliranog kaljenja .....	96
4.5.4	Tabu pretraživanje.....	102
4.6	Scenarij 3 - Analička metoda parametriranja stabilizatora elektromehaničkih oscilacija za trajanje poremećaja 250 ms.....	109
4.7	Scenarij 4 - Primjena metoda mekog računarstva u slučaju većeg poremećaja .....	133

4.7.1	Metoda roja čestica.....	133
4.7.2	Metoda genetskog algoritma .....	138
4.7.3	Metoda simuliranog kaljenja .....	145
4.7.4	Tabu pretraživanje.....	151
4.8	Scenarij 5 - Višestrojni sustav s visokim udjelom obnovljivih izvora energije .....	156
4.9	Scenarij 6 - Primjena metoda mekog računarstva u sustavu s velikim udjelom obnovljivih izvora energije.....	185
4.9.1	Metoda roja čestica.....	185
4.9.2	Genetski algoritam .....	191
4.9.3	Metoda simuliranog kaljenja .....	199
4.9.4	Tabu pretraživanje.....	205
<b>5</b>	<b>Zaključak</b> .....	<b>211</b>
	<b>Bibliografija</b> .....	<b>214</b>
	<b>Popis slika</b> .....	<b>225</b>
	<b>Popis tablica</b> .....	<b>233</b>
	<b>Sažetak</b> .....	<b>235</b>
	<b>Abstract</b> .....	<b>236</b>
	<b>Životopis</b> .....	<b>237</b>

# 1 Uvod

Pojava niskofrekvencijskih oscilacija je prvi put zabilježena u dijelu prijenosnog sustava Sjedinjenih Američkih Država. Pojava je izazvala značajno narušavanje stabilnosti sustava te su ubrzo razvijene metode kojima bi se oscilacije snage čim prije prigušile. Oscilacije, čija je frekvencija od 0.05 do desetak Hz, se uspješno otklanjaju povećanjem prigušenja sustava, a koje se postiže dodavanjem stabilizatora elektromehaničkih oscilacija u uzbudni krug sinkronog generatora. Kao ulazna veličina u stabilizator se uzimaju signalu mjereni na izlazu generatora te se prema stanju u sustavu provodi regulacija i poboljšava oscilatorna stabilnost sustava.

Pravilnim parametriranjem stabilizatora se oscilatorni modovi, koji izazivaju niskofrekvencijske oscilacije, nastoje pomjeriti u lijevu stranu kompleksne ravnine. Metoda koja se najčešće koristi je fazna kompenzacija, a kao pokazatelji se koriste koeficijent prigušenja. Međutim, poboljšanjem oscilatorne stabilnosti se može negativno utjecati na tranzijentnu stabilnost sustava te se pri odabiru i postavljanju parametara trebaju uzeti u obzir i kompleksna frekvencijska, ali i vremenska domena. Metodologija koja uzima u obzir obje domene preko specifičnih pokazatelja je predložena u ovoj disertaciji. Na taj način se postiže robusnost stabilizatora, koji će prije svega poboljšati oscilatornu stabilnost, ali će i ubrzati oporavak sustava nakon poremećaja. Oscilacije djelatne snage, koje se žele izbjeći jer mogu dovesti do neželjene prorade zaštite i prekida opskrbe potrošača, se brže prigušuju, a amplituda se značajno smanjuje. Problematika je posebno izražena u sustavu s niskom inercijom primjerice u mrežama s visokom integracijom obnovljivih izvora energije.

Disertacija se sastoji od pet poglavlja, s uvodom kao prvim poglavljem. U drugom poglavlju je navedena klasifikacija stabilnosti i vrste poremećaja u elektroenergetskom sustavu s naglaskom na stabilnost kuta rotora pri malim poremećajima, u čijem kontekstu se obično razmatraju niskofrekvencijske oscilacije kao posljedica neravnoteže sinkronizirajućeg i prigušnog momenta generatora. Određivanje lokacije stabilizatora elektromehaničkih oscilacija i problematika parametriranja s naglaskom na metodu fazne kompenzacije su također objašnjene u drugom poglavlju. Pri parametriranju se najčešće koriste pokazatelji kompleksne frekvencijske domene ispitani i primijenjeni na jednostrojnog sustavu što je potkrijepljeno primjerima iz literature, kao i za optimizacijske metode koje se najčešće primjenjuju na jednostavnim mrežama (također najčešće

jednostrojni sustavi). Poglavlje je zaključeno pregledom novih tehnologija i specifičnih primjena stabilizatora elektromehaničkih oscilacija.

Predložena analitička metoda za odabir i postavljanje parametara stabilizatora elektromehaničkih oscilacija je opisana u trećem poglavlju. Sastoji se od koraka određivanja lokacije primjenom participacijskih koeficijenata, određivanja početnih vrijednost parametara te iterativnog procesa koji se temelji na korištenju pokazatelja kompleksne frekvencijske (koeficijent prigušenja) i vremenske domene (djelatna snaga, kut rotora, brzina generatora). Nadalje, za usporedbu analitičke i metoda mekog računarstva su predstavljene osnova rada i ključni parametri četiri optimizacijske metode: metode roja čestica, genetskog algoritma, simuliranog kaljenja i tabu pretraživanja.

Četvrto poglavlje se sastoji od opisa ispitnog modela, modificiranog IEEE testnog sustava sa 14 sabirnica sa pet generatora. Svi generatori su opremljeni automatskih regulatorima napona, a jedan od generatora i stabilizatorom elektromehaničkih oscilacija čija se lokacija određuje participacijskom analizom. Nakon opisa testnog sustava dani su rezultati. Lokacija i početni parametri se određuju na temelju rezultata modalne i participacijske analize sustava. Razmatrano je šest scenarija, za mali poremećaj trajanja 50 ms, 250 ms te 50 ms uz visoku integraciju obnovljivih izvora energije. Scenariji 1, 3 i 5 se odnose na analitičku metodu parametriranja dok su u scenarijima 2, 4 i 6 korištene metode mekog računarstva za različite početne uvjete kako bi se pokazala veza između početnih uvjeta i rezultata optimizacije. Primjenom stabilizatora se amplitude oscilacija smanjuju i brže se postiže stacionarno stanje, kao i vrijednosti prije poremećaja. U mrežama s visokim udjelom obnovljivih izvora, koji zamjenjuju konvencionalne sinkrone generatore, oporavak nakon kvara je također znatno brži. U zadnjem, šestom poglavlju, su dani zaključci i prijedlog budućeg rada.

## 2 Problematika niskofrekvencijskih oscilacija u složenom elektroenergetskom sustavu

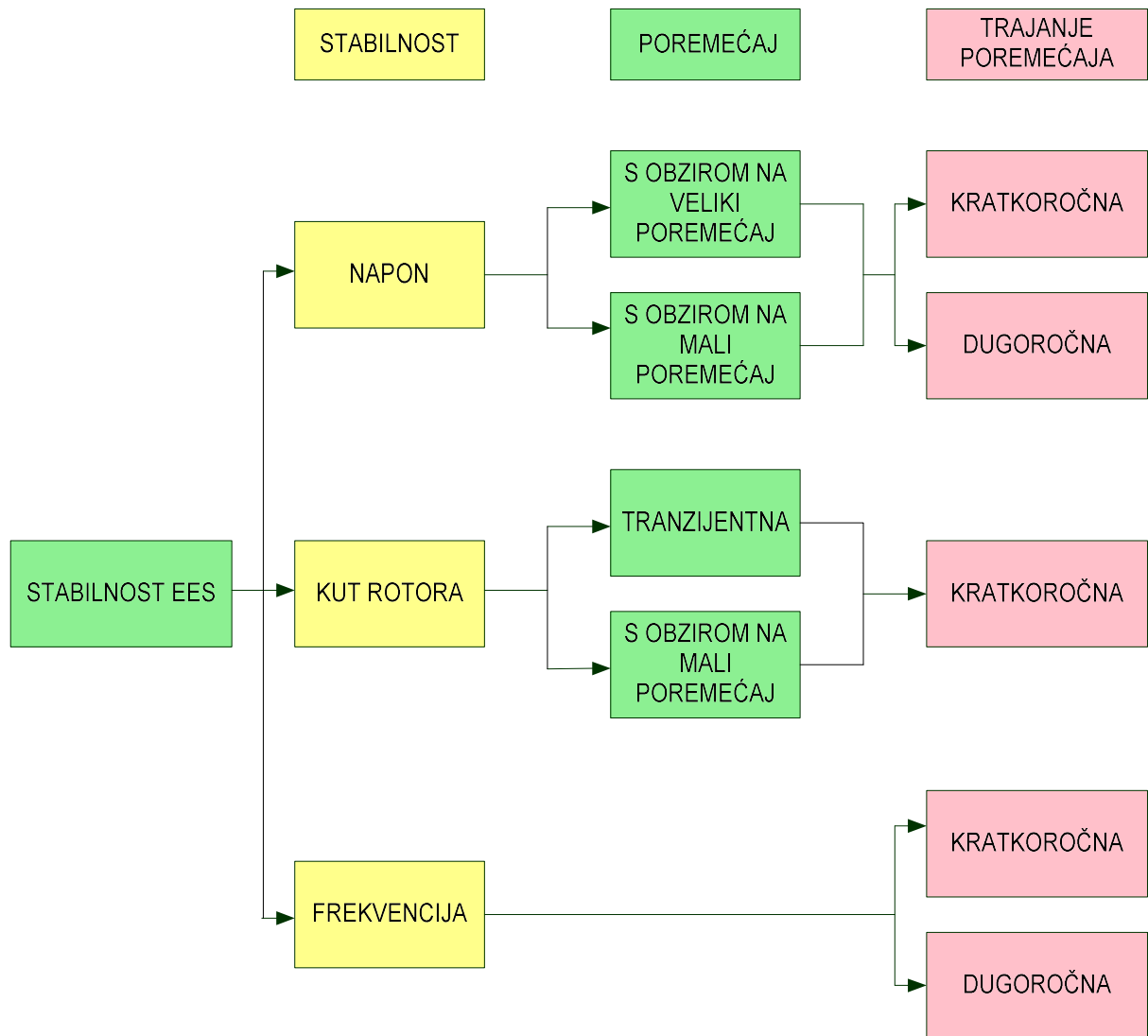
U ovom poglavlju navedena je i objašnjena klasifikacija stabilnosti i modova niskofrekvencijskih oscilacija, kao i uzroci njihovog nastanka. Metode fazne kompenzacije kroz pokazatelje kompleksne frekvencijske domene i problematika parametriranja na jednostrojnim ili drugim pojednostavljenim testnim sustavima su prikazane kroz pregled literature, što je ujedno i doprinos „Proširenje primjene razvijene analitičke metode za postavljanje i prilagodbu parametara stabilizatora elektromehaničkih oscilacija u višestrojnom elektroenergetskom sustavu u odnosu na jednostrojne testne sustave”.

### 2.1 Klasifikacija stabilnosti

Elektroenergetski sustav, kao najsloženiji i najveći izgrađeni tehnički sustav je podložan raznim smetnjama i promjenama koje mogu utjecati na njegov rad. Uslijed promjena opterećenja potrošača, proizvodnje elektrana ili kvarova može doći do narušavanja stabilnosti. Stabilnost se definira kao *”sposobnost elektroenergetskog sustava da ostane u stanju ravnoteže pod normalnim radnim uvjetima i da povрати stanje ravnoteže nakon poremećaja”* [1]. Radno stanje sustava ovisi o raznim faktorima, poput stohastičnosti proizvodnje obnovljivih izvora energije ili promjena opterećenja koje ovisi o specifičnim navikama potrošača, i na koje se ne može utjecati nego se mora voditi računa o njima tokom planiranja vođenja sustava. Cilj je poboljšati pokazatelje stabilnosti sustava uz poštivanje tehno-ekonomskih kriterija i zahtjeva kvalitete električne energije. Stabilnost sustava očuvana je ako se nakon poremećaja uspiju zadržati željeni pokazatelji promatranih veličina te se u tom smislu stabilnost dijeli na naponsku, frekvencijsku i stabilnost kuta rotora, za velike i male poremećaje promatrano dugoročno ili kratkoročno (slika 2.1), [2].

Mali poremećaj je svaki manji poremećaj koji se može linearizirati u okolici radne točke, a predstavlja male kontinuirane promjene u sustavu. Primjer takvog poremećaja je promjena proizvodnje generatora, snage potrošača ili u nekim slučajevima i kratki spojevi na vodovima koji neće dovesti do značajne promjene u sustavu. Veliki poremećaj je svaki poremećaj koji značajno utječe na stabilnost i ne može se linearizirati oko radne točke, odnosno može dovesti do ispada dijela sustava. Primjer je trofazni kratki spoj na vodu/interkonekciji, ispad velikog potrošača ili proizvodnje. Trofazni kratki spoj u jednostrojnem sustavu spojenom na krutu mrežu predstavlja veliki poremećaj, ali u složenom višestrojnom sustavu u kojemu je ispunjen  $N-1$  uvjet može predstavljati mali poremećaj ukoliko nije prekinuta opskrba potrošača.





Slika 2.1 Klasifikacija stabilnosti

Dugoročna stabilnost obuhvaća vrijeme od nekoliko minuta do nekoliko sati za promjene koje uzrokuju dugoročnu neravnotežu proizvodnje i potrošnje, a promatra se za spore komponente sustava koje trebaju određeno vrijeme da promijene svoje radno stanje [2]. Kratkoročne promjene se događaju unutar nekoliko sekundi, za brze komponente i za trenutačnu neravnotežu snaga.

Naponska stabilnost (engl. *Voltage stability*) je "sposobnost sustava da zadrži napone unutar dozvoljenih granica za sve sabirnice u sustavu pod normalnim uvjetima rada i nakon poremećaja" [1]. Do naponske nestabilnosti obično dolazi kada postoji neravnoteža proizvodnje i potrošnje jalove energije, odnosno kada sustav ne može isporučiti traženu količinu energije uslijed čega dolazi do promjene napona na sabirnicama, a u najgorem slučaju može doći do prekida napajanja potrošača. Regulacija napona se provodi s pomoću automatskih regulatora napona (engl.

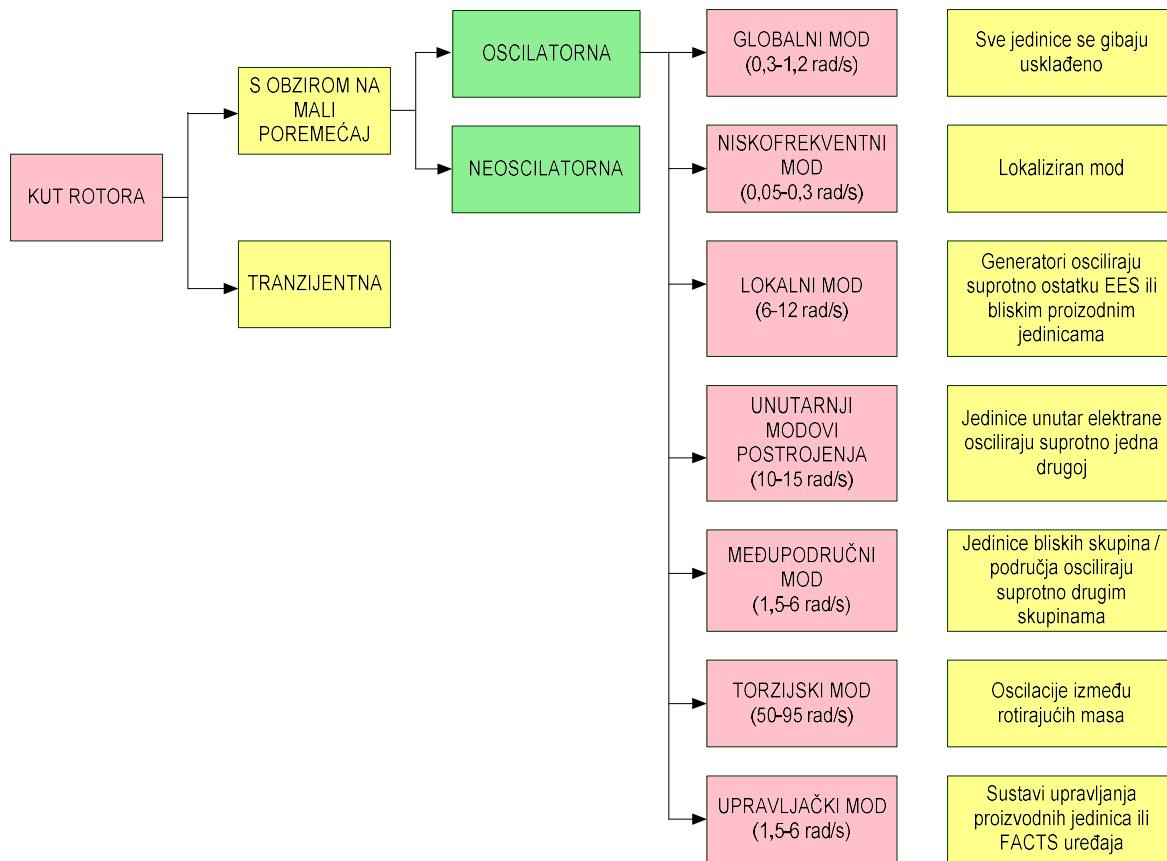
*Automatic Voltage Regulator, AVR*). Automatski regulatori napona su brzi i održavaju napon generatora reagirajući na sve promjene opterećenja koje se događaju u sustavu i predstavljaju bitan dio uzbudnog kruga generatora.

Frekvencijska stabilnost (engl. *Frequency stability*) je "sposobnost sustava da održi frekvenciju unutar prihvatljivih granica tokom poremećaja uz značajnu neravnotežu proizvodnje i potrošnje djelatne snage" [3]. Oglada se u sposobnosti sustava da uspostavi ravnotežu između proizvodnje i potrošnje djelatne snage uz minimalne gubitke tereta [3]. Frekvencijska stabilnost se proučava za kratkoročne smetnje, trajanja nekoliko sekundi, te za dugoročne smetnje koje mogu trajati satima. Frekvencija je vezana uz brzinu generatora te se problematika može vezati uz održavanje konstantne brzine generatora, a regulira se upravljačkim regulatorima turbine [4].

Treći tip stabilnosti je stabilnost kuta rotora (engl. *Small-signal stability*). Definiira se kao "sposobnost sinkronih generatora da ostanu u sinkronizmu sa sustavom na koji su spojeni u normalnim radnim uvjetima ili nakon poremećaja" [1]. Stabilnost kuta rotora je vezana uz mehaničke sile/momente čija odstupanja utječu na kut rotora. Momenti koji utječu na ovaj vid stabilnosti su sinkronizirajući (engl. *synchronizing torque*) i prigušni moment (engl. *damping torque*), a detaljno su objašnjeni u potpoglavlju 2.2. Podjela kutne stabilnosti i manifestacije oscilacija koje se mogu pojaviti su prikazane slikom 2.2. Osnovna podjela stabilnosti kuta rotora je na tranzijentnu (s obzirom na veliki poremećaj) i s obzirom na mali poremećaj [1], [5]. Tranzijentna stabilnost je "sposobnost sustava da zadrži sinkronizam nakon poremećaja koji dovodi do velikih odstupanja kuta rotora" [3] dok je stabilnost sustava s obzirom na mali poremećaj "sposobnost sustava da ostane u sinkronom radu nakon malog poremećaja - svakog poremećaja kod kojeg se jednadžbe sustava mogu linearizirati u okolini radne točke" [5]. Stabilnost kuta rotora s obzirom na mali poremećaj se nadalje može podijeliti na neoscilatornu i oscilatornu stabilnost. Neoscilatorna ili aperiodička stabilnost je posljedica nedostatnog sinkronizirajućeg momenta što rezultira postupnim povećanjem kuta rotora, dok nedostatak prigušnog momenta rezultira oscilatornom nestabilnošću uz pojavu oscilacija rotora ili povećanja amplitude oscilacija [3].

Oscilatorna stabilnost se sve češće detektira u elektroenergetskom sustavu, a manifestira se kao globalni, niskofrekventni, lokalni, međupodručni, torzijski, upravljački mod ili unutarnji mod postrojenja. Raspon frekvencija ovih modova je između 0.05 rad/s i 15 rad/s [5] [6]. Niskofrekventni mod je lokaliziran s frekvencijama između 0.05 i 0.3 rad/s. Globalni mod ima frekvencije između 0.3 i 1.2 rad/s, a pri čemu se sve jedinice gibaju usklađeno. Sljedeća skupina modova, međupodručni i lokalni, ukazuju na to da grupe generatora osciliraju suprotno ostatku sustava ili

međusobno. Međupodručni mod karakteriziraju frekvencije raspona 1.5 - 6 rad/s, a pri njemu generatori u bliskim područjima osciliraju suprotno drugim bliskim skupinama.



Slika 2.2 Podjela kutne stabilnosti

Lokalni mod, čiji je karakteristični raspon frekvencija između 6 i 12 rad/s, posljedica je osciliranja generatora suprotno ostatku elektroenergetskog sustava ili bliskim proizvodnim jedinicama. S obzirom na prirodu ova dva moda, kao i načine njihova prigušenja, često se razmatraju kao jedna cjelina. Unutarnji modovi postrojenja su posljedica osciliranja jednog generatora suprotno ostalim jedinicama unutar elektrane, a karakterizira ga raspon frekvencija između 10 i 15 rad/s. Torzijski mod, koji karakteriziraju frekvencije između 50 i 95 rad/s, posljedica je djelovanja torzijskih sila između osovine turbine i generatora. Iznos frekvencije se razlikuje ovisno o vrsti elektrane i veličini generatora. Zadnji karakteristični mod je upravljački, a može biti monotoni ili oscilatorni s frekvencijama između 1.6 i 6 rad/s [6].

Održavanje stabilnosti sustava ovisi o mnogim čimbenicima, kao što su početni uvjeti i stanje prije poremećaja, vrsti i trajanju poremećaja, topologiji i strukturi mreže (primjerice udjelu obnovljivih izvora energije). Kako je navedeno prilikom klasifikacije stabilnosti, nužno je u svakom trenutku

osigurati ravnotežu proizvodnje i potrošnje jalove i djelatne snage kako bi sustav radio unutar ograničenja definiranih zahtjevima kvalitete električne energije.

## 2.2 Etiologija oscilacija u elektroenergetskom sustavu

Prilikom planiranja rada elektroenergetskog sustava uzimaju se u obzir tehnička ograničenja prijenosa električne energije, primjerice ograničenja prijenosnog kapaciteta voda, najvećeg dopuštenog napona, ograničenja proizvodnih jedinica i slično. Također, prijenos električne energije mora biti ekonomski učinkovit uz povećanje prijenosa energije do gornjih granica prijenosnog kapaciteta te u tržišnim uvjetima s ciljem ostvarenja najveće dobiti što u takvim uvjetima prijenosa djelatne snage što dovodi sustav na granicu statičke stabilnosti. Pored tih zahtjeva se moraju ispuniti i uvjeti kvalitete električne energije koji definiraju dozvoljene iznose napona u pojedinim čvorovima mreže. Pri bilo kakvoj promjeni napona automatski regulator napona mora reagirati i po potrebi povisiti ili smanjiti napon na postavljeni iznos. Povećanje opterećenja zahtijevati će brzi odgovor i u kratkom roku regulator mora podići napon do gornjih granica uzbude (tzv. *ceiling voltage*). Automatski regulator napona održava napon na željenom postavljenom iznosu koji određuje referentna vrijednost napona. Ukoliko napon odstupa od postavljenog, struja uzbude se mijenja kako bi se odstupanje otklonilo. Djelovanjem na napon mijenja se sinkronizirajući moment, koji je vezan uz kut rotora te se povećanjem napona povećava i sinkronizirajući moment. Stabilnost sustava je očuvana ako postoji dovoljan protumoment koji će se suprotstaviti sinkronizirajućem momentu. Taj protumoment se naziva prigušni moment i vezan je uz odstupanje brzine generatora. Veza između sinkronizirajućeg i prigušnog momenta dana je izrazom (2-1), prema literaturi [1]:

$$\Delta M = M_S \Delta \delta + M_D \Delta \omega \quad (2-1)$$

gdje je

$\Delta M$  - rezultatni moment

$M_S$  - sinkronizirajući moment

$\Delta \delta$  - promjena kuta rotora

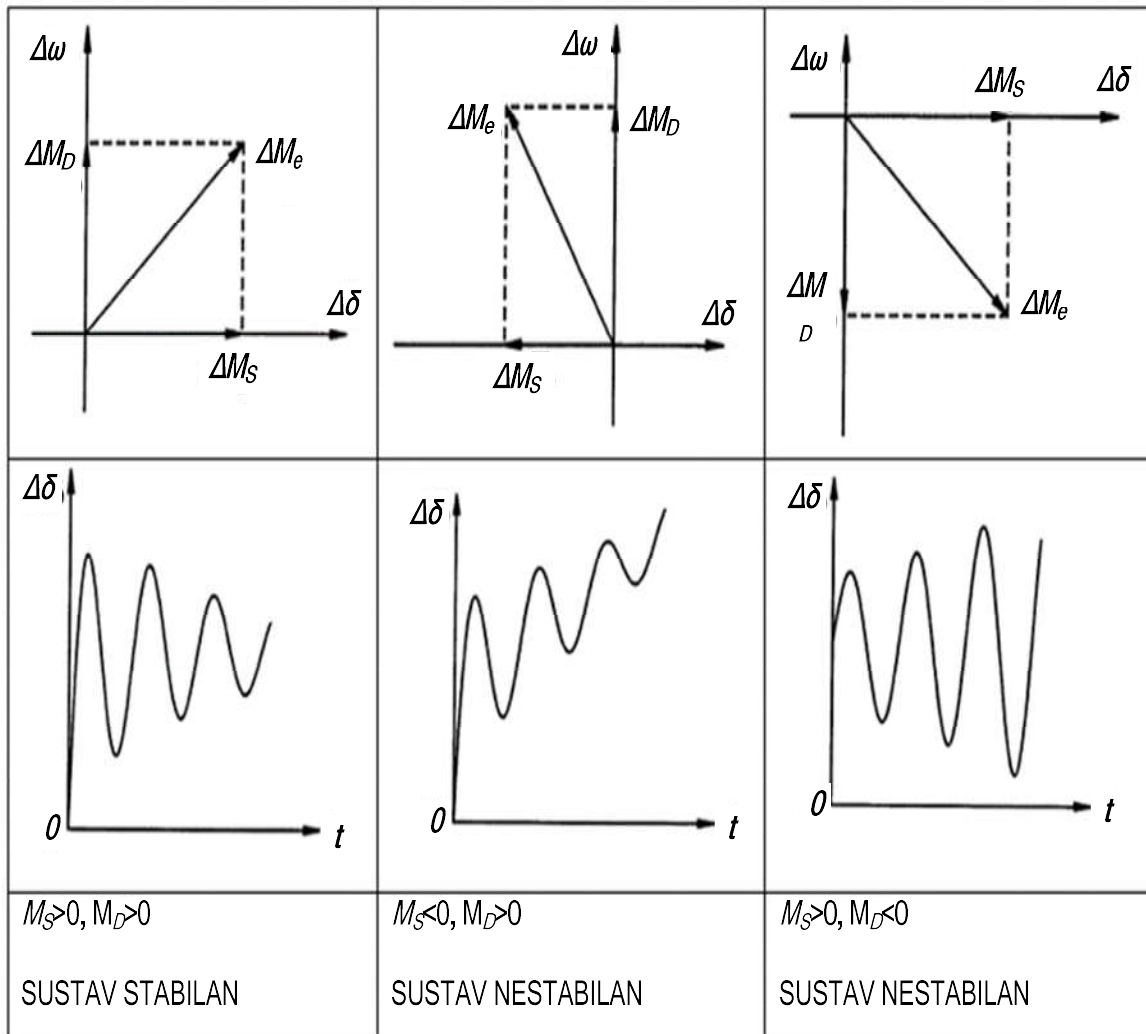
$M_D$  - prigušni moment

$\Delta \omega$  - odstupanje brzine generatora.

Stabilnost je očuvana kada su oba momenta pozitivna i u ravnoteži. Ako pak postoji neravnoteža momenata, pojaviti će se oscilacije u sustavu i stabilnost će biti narušena. Neravnoteža

sinkronizirajućeg i prigušnog momenta se javlja zbog dinamike generatora, prijenosne mreže, kvara u mreži ili djelovanja upravljačkih sustava.

Slika 2.3 prikazuje odnose sinkronizirajućeg i prigušnog momenta [1]. U prvom slučaju, kada su oba momenta pozitivna, u istom kvadrantu i istog iznosa, sustav je stabilan. Amplitude oscilacija kuta se smanjuju dok u potpunosti ne iščeznu. Za drugi slučaj, kada je prigušni moment pozitivan, a sinkronizirajući negativan, pojavljuju se oscilacije kuta rotora i odstupanje kuta postaje sve veće, odnosno dolazi do neoscilatorne stabilnosti kuta rotora. Treći slučaj prikazuje pozitivan sinkronizirajući moment pri negativnom prigušnom momentu. U ovom slučaju dolazi do neoscilatorne nestabilnosti koja za rezultat ima raspirujuće oscilacije. Amplituda oscilacija postaje sve veća kao i kut rotora.



Slika 2.3 Ponašanje sustava pri različitim odnosima sinkronizirajućeg i prigušnog momenta

Analiza stabilnosti kuta rotora s obzirom na veliki poremećaj se uobičajeno razmatra na jednostavnom sustavu koji se sastoji od jednog generatora, transformatora, prijenosnog voda i krute mreže (slika 2.4.), te se ukupna transferna reaktancija  $X_t$  odredi kao zbroj reaktancija svih elemenata

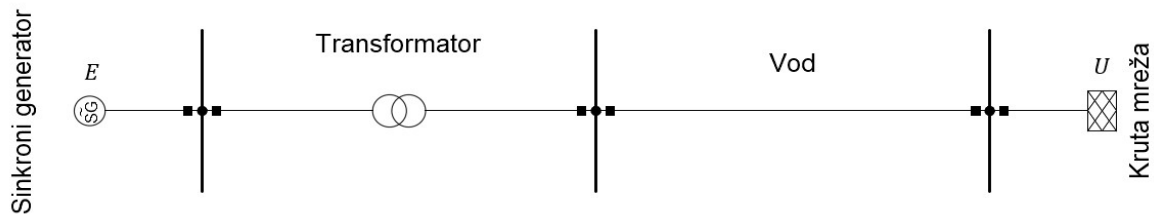
$$X_t = X_G + X_T + X_V \quad (2-2)$$

gdje je

$X_G$  - ukupna reaktancija generatora

$X_T$  - ukupna reaktancija transformatora

$X_V$  - ukupna reaktancija voda.



Slika 2.4 Jednostrojni sustav

Ukupna snaga koja se prenosi, odnosno snaga koju generator predaje elektroenergetskom sustavu,  $P_E$  ovisi o naponima generatora i krute mreže, kutu između njih i transfernoj reaktanciji:

$$P_E = \frac{U \cdot E}{X_t} \sin \delta \quad (2-3)$$

gdje je

$U$  - napon krute mreže

$E$  - elektromotorna sila generatora

$\delta$  - kut između napona generatora i krute mreže.

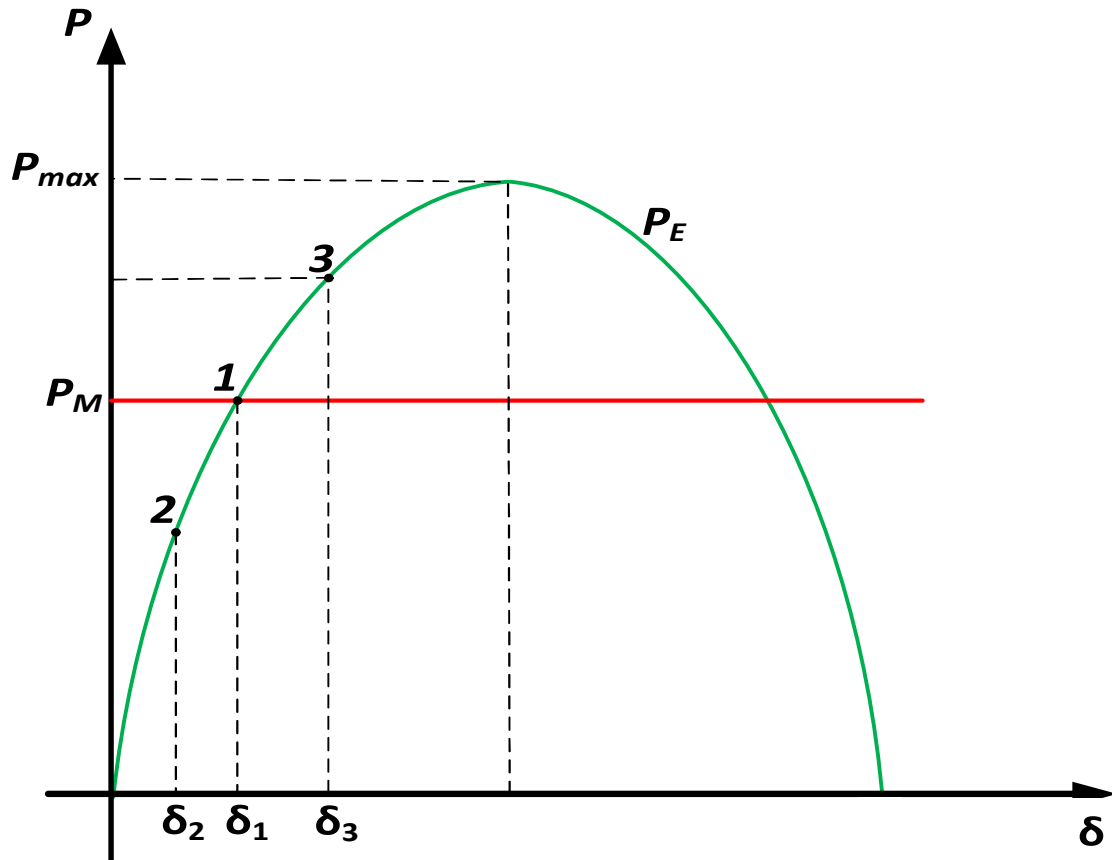
Kut između napona generatora i krute mreže je ujedno kut opterećenja generatora i pri povećanju opterećenja će rasti. Pri jako velikim opterećenjima kut se može povećati toliko da generator izgubi sinkronizam s ostatkom mreže. Odnos snage i kuta se prikazuje krivuljom snaga-kut (slika 2.5), a na kojoj se mogu uočiti sljedeće karakteristične krivulje i točke:

$P_E$  - krivulja koja predstavlja električnu snagu generatora

$P_M$  - pravac koji predstavlja mehaničku snagu turbine

$\delta_1$ - kut pri ravnoteži snaga

1 - točka ravnoteže električne i mehaničke snage



Slika 2.5 Krivulja djelatna snaga – kut

U stacionarnom stanju u točki 1 vlada ravnoteža električne snage generatora i mehaničke snage turbine pri kutu opterećenja  $\delta_1$ . Ako se snaga smanji zbog promjene opterećenja u sustavu ili pak kvara, električna snaga generatora će se smanjiti te generator usporava. Kut se smanjuje na  $\delta_2$  i radna točka postaje 2 u kojoj je mehanička snaga veća od električne. Budući da postoji razlika snaga, a mehanička snaga turbine je veća od električne snage generatora, rotor se ubrzava i kut  $\delta$  se povećava. Ubrzanjem se nastoji postići vrijednost prije poremećaja,  $\delta_1$ . Karakteristika generatora je velika tromost zbog koje rotor i dalje ubrzava zbog čega kut nastavlja rasti do vrijednosti  $\delta_3$  i točke 3 u kojoj je električna snaga veća od mehaničke snage turbine. U toj točki rotor se počinje usporavati, ubrzanje postaje negativno i rotor se usporava do vrijednosti prije poremećaja. Velika rotirajuća masa znači da se u sustav akumulira i troši kinetička energija koja će rezultirati njihanjem oko točke 1 dok se u konačnici ne dostigne ravnotežna točka.

Matematički se izrazi za njihanje mogu pisati na način predložen u [1], [7]. Da bi sustav bio u ravnoteži, djelatna snaga turbine i električna snaga generatora moraju biti u izjednačeni. Ukoliko postoji razlika, doći će do promjene brzine  $\omega$ , jednadžba (2-4)

$$\omega = \omega_0 + \Delta\omega \quad (2-4)$$

gdje je

$\omega_0$  - sinkrona brzina vrtnje

$\Delta\omega$  - promjena brzine nastala neravnotežom mehaničke snage turbine i električne snage generatora.

Promjena kutne brzine se izražava kao promjena kuta rotora  $d\delta$  u jedinici vremena  $dt$

$$\Delta\omega = \frac{d\delta}{dt} \quad (2-5)$$

Omjer djelatne snage  $P$  i kutne brzine  $\omega$  prema izrazu (2-6) jednak je momentu  $M$

$$P = \omega \cdot M \quad (2-6)$$

Iz navedenih izraza opća jednadžba gibanja

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_M - M_E \quad (2-7)$$

može se zapisati kao

$$J\omega_0 \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_M - P_E \quad (2-8)$$

gdje je

$J$  - ukupni moment tromosti generatora

$M_M$  - mehanički moment turbine

$M_E$  - električni moment generatora.

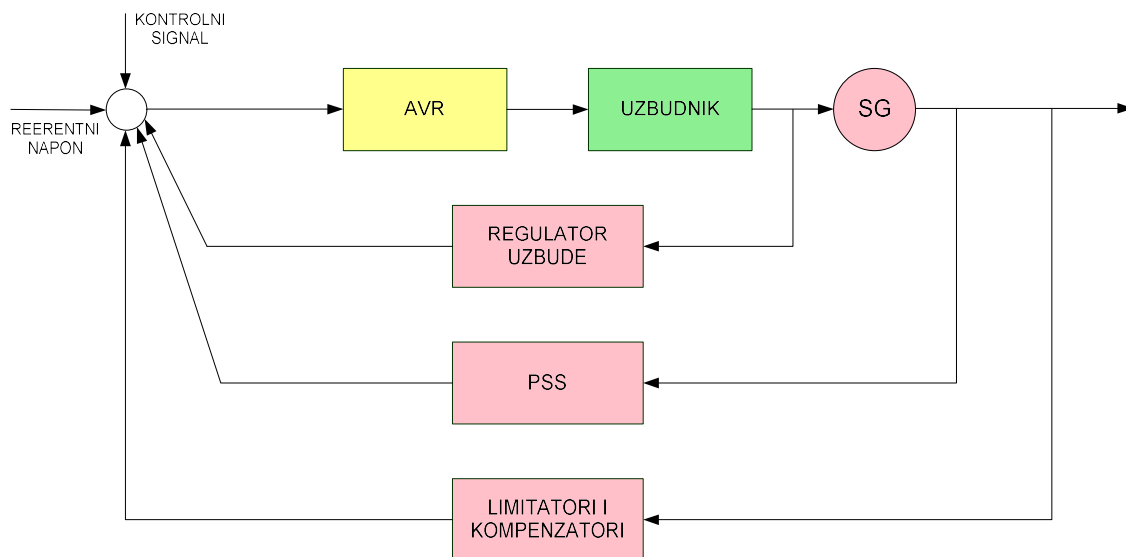
Umnožak momenta tromosti i kutne brzine određuju kinetičku energiju generatora, a ukoliko se kinetička energija podijeli s nazivnom snagom generatora  $S_N$ , dobije se konstanta inercije  $H$

$$H = \frac{J\omega_0^2}{2S_N} \quad (2-9)$$

Što je akumulirana kinetička energija veća (veća masa generatora), manja će biti i odstupanja brzine. Kako bi se utjecalo na brže postizanje ravnoteže može se mijenjati električna snaga generatora (promjenom reaktancije  $i/li$  iznosa napona) ili mehanička snaga turbine.



U sustavu u kojemu dolazi do malog poremećaja pojaviti će se niskofrekvencijske oscilacije. Zbog promjene opterećenja, neki generatori će ubrzati, dok će drugi usporiti kako bi se prilagodili stanju nakon poremećaja [8]. Na interkonekcijskim vodovima, pogotovo onima koji su blizu zagušenja, pojava oscilacija djelatne snage može dovesti do preopterećenja vodova. Preopterećenje može biti toliko da aktiviraju zaštitne uređaje čime će se isključiti značajan dio elektroenergetskog sustava. Budući da je to stanje koje se želi izbjeći, potrebno je povećati prigušni moment te na taj način ubrza prigušenje nastalih niskofrekvencijskih oscilacija. Metode otkrivanja niskofrekvencijskih oscilacija se temelje na modalnoj analizi, metodama dekompozicije ili mjerenjima, kako je predloženo u literaturi [9]. Izgradnjom paralelnih interkonekcijskih vodova se sustav rasterećuje sa granice svoje statičke stabilnosti i time se poboljšava stabilnost sustava. Međutim, planiranje i izgradnja dodatnih vodova je često kompleksan i ekonomski neopravdan zadatak te se kao prihvatljivije rješenje provodi povećanje prigušenja u elektroenergetskom sustavu. Elektroenergetski sustav je slabo prigušen, a povećanjem udjela obnovljivih izvora energije se prigušenje dodatno smanjuje. Glavni izvor prigušnog momenta je sinkroni stroj zbog svoje konstrukcije te dodatnih prigušnih namota. Međutim, prigušenje stroja nije dovoljno te se mora uvesti dodatno prigušenje u sustav. Povećanje prigušnog momenta generatora se izvodi dodavanjem stabilizatora elektromehaničkih oscilacija (engl. *Power System Stabilizer, PSS*) u uzbudni krug generatora (slika 2.6), [10].



Slika 2.6 Uzbudni krug generatora

Uzbudni krug čine automatski regulator napona (AVR) koji daje signal uzbudniku. Uzбудnik je glavni dio uzbudnog kruga koji prilagođava istosmjernu struju uzbudnog namota. Regulator

prikuplja i obrađuje signale koje onda prosljeđuje u sumacijski blok te na taj način omogućuje pravilnu regulaciju kruga. Stabilizator elektromehaničkih oscilacija uzima signal s izlaza generatora i nakon obrade ga šalje u zajedničku sumacijsku točku regulatora uzbude, referentnog napona i kontrolnih signala. Također, u uzbudni krug se dodaju signali limitatora i kompenzatora koji imaju zaštitne funkcije za slučaj preopterećenja, podopterećenja, previsokog napona, odstupanja frekvencije ili bilo kojeg drugog poremećaja koji bi narušio siguran rad generatora.

Stabilizator elektromehaničkih oscilacija kao signal uzima brzinu generatora, kut rotora, promjenu djelatne snage ili kombinaciju navedenih signala. Sastoji se od četiri osnovna bloka: visokopropusnog filtera, bloka pojačanja i dva bloka za faznu kompenzaciju, a njihove prijenosne funkcije su detaljno objašnjeni u potpoglavlju 3.2. Visokopropusni filter ima ulogu otkloniti utjecaj sporih promjena koje se događaju u normalnom radu elektroenergetskog sustava, a propuštanje tranzijentnih pojava [13]. Blokovi za faznu kompenzaciju se primjenjuju kako bi se kompenziralo kašnjenje signala nastalo zbog uzimanja signala na izlazu generatora (snage na izlaznim stezaljkama generatora, brzine na osovini generatora). Sastoji se od visokopropusnog i niskopropusnog filtera čija je uloga prepoznati sva odstupanja koja nastaju i omogućiti prigušenje frekvencija željenog raspona.

Razlikuju se stabilizatori s jednim ulazom, koji se često u literaturi naziva i konvencionalni stabilizator elektromehaničkih oscilacija (engl. *Conventional Power System Stabilizer, CPSS*) i koji je osnova od koje su se dalje razvijali stabilizatori s dva ulaza i više pojasa za različite raspone frekvencija (stabilizatori druge, treće i četvrte generacije). Osnovni tip s jednim ulazom pokazuje znatno slabije karakteristike u odnosu na ostale tipove stabilizatora uz manje prigušenje oscilacija, ali je ujedno značajno jednostavniji za parametrisiranje zbog manjeg broja parametara na koje treba obratiti pažnju [11], [12].

### 2.3 Metode parametrisiranja stabilizatora elektromehaničkih oscilacija

Pojava niskofrekvencijskih oscilacija u elektroenergetskom sustavu se želi izbjeći budući da stvara značajne probleme u radu sustava, ponekad dovodeći do prekida napajanja električne energije. Autori [14] navode uzroke i najčešće metode prigušenja niskofrekvencijskih oscilacija s naglaskom na mreže s niskom inercijom. Najstariji i najčešći način je primjena stabilizatora elektromehaničkih oscilacija koji će poboljšati stabilnost elektroenergetskog sustava, ali samo ako je pravilno parametrisiran budući da krivi odabir parametara stabilizatora može dovesti do narušavanja oscilatorne stabilnosti. Metoda analize karakteristike frekvencijskog odziva je predstavljena i u

radu [15], a pokazuje se da primjena stabilizatora poboljšava oscilatornu stabilnost uz uspješno prigušenje niskofrekvencijskih oscilacija.

Za parametriranje se koriste različite metode, od kojih je najčešća metoda fazne kompenzacije, koja se koristi i u ovoj disertaciji. Metodom fazne kompenzacije se svojstvene vrijednosti unutar zatvorene petlje nastoje smjestiti unutar željenog područja kompleksne frekvencijske ravnine [16], [17], što dublje u lijevu stranu kompleksne ravnine. U dostupnoj literaturi se parametriranje provodi prema rezultatima iz kompleksne frekvencijske domene, uobičajeno za prigušenje ili relativni koeficijent prigušenja. Provodi se tako da se postigne željeno poboljšanje oscilatorne stabilnosti (oscilatorni modovi u lijevoj polovici kompleksne frekvencijske ravnine) te se dobiveni rezultati verificiraju u vremenskoj domeni analizom odziva djelatne snage, napona, struje ili neke druge karakteristične fizikalne veličine.

Većina metoda parametriranja su ispitane na jednostavnom sustavu, jednostrojnem sustavu priključenom na krutu mrežu (engl. *Single Machine Infinite Bus, SMIB*) ili proširenom strukturom koja se naziva dvopodručnim sustavom sa četiri generatora, proširenim jednostrojnim sustavom ili Kundurovim testnim sustavom pri čemu se složeni sustavi često svode na jednostrojni sustav. Postoje brojni primjeri ispitivanja metoda na jednostavnim sustavima, kao primjerice u radu [18] gdje je dio prijenosne mreže Kine sveden na jednostrojni sustav, na razinu Phillips-Heffronova modela, pri čemu je stabilizator parametriran optimizacijskom metodom simuliranog rasta biljaka uz funkciju maksimizacije koeficijenta prigušenja. U literaturi [19] se za određivanje lokacije ugradnje koristi metoda participacije, a parametri se odabiru prema frekvencijskom odzivu prikazanom Bodeovim dijagramom te se na temelju njega postavlja željeno fazno kašnjenje. Metoda se ispituje na jednostavnom sustavu sa četiri generatora raspoređena u dva područja u MATLAB SimPowerSystem (SPS). U promatranom sustavu se pojavljuje međupodručni mod koji je potrebno prigušiti. Djelovanje stabilizatora se ispituje na svim lokacijama dok se ne pronađe mjesto koje će dovesti do najvećeg prigušenja oscilacija te se primjena potvrđuje analizom u vremenskoj domeni. Parametriranje faznom kompenzacijom prema frekvencijama i prikazom Bodeovim dijagramom je provedeno za jednostrojni sustav u radu [20]. Prikazom Bodeovog dijagrama se prikazuju fazna kašnjenja i pojednostavljuje procedura parametriranja postavljanjem željenih vrijednosti regulatora. Primjena dijagrama je opisana i u literaturi [21], [22] gdje se pak koristi u analizi postavljenih parametara te usporedbi različitih vrsta stabilizatora. Sličan pristup, prema funkciji postizanju željenog odziva, ali temeljenog na prikazu Nyquistovog dijagrama, predložen je u literaturi [23] i [24] te su zatim rezultati provjereni na proširenom SMIB sustavu, odnosno testnom sustavu sa devet sabirnica. Metoda ostataka (engl. *residue*) u kombinaciji s mjerenjem sinkrofazora

je predložena u radu [25], a temelji se na procjeni parametara ekvivalentnog kruga iz podataka dobivenih mjerenjem. Koriste se pokazatelji frekvencijske domene - vrijednost svojstvene vrijednosti i njezin kut - a svedeni na ekvivalentan jednostrojni sustav. Dobiveno rješenje je zatim testirano na nešto složenijem sustavu sa devet sabirnica i tri generatora gdje se pokazalo da su odzivi veličina u vremenskoj domeni poboljšani u odnosu na stanje bez stabilizatora elektromehaničkih oscilacija. Pokazatelj vremenske domene, odstupanje kuta, korišten je za parametriranje stabilizatora u jednostrojnem sustavu [26]. Primijenjen je algoritam diferencijalne evolucije uz kombinaciju sa FACTS uređajem te uz dodatni cilj poboljšanja tranzijentne stabilnosti. Koeficijent prigušenja i realni dio svojstvene vrijednosti korišteni su kao parametar pri određivanju postavki stabilizatora primijenjenog na jednostrojni sustavu u literaturi [27]-[29], a u [30] parametri su postavljeni na jednostrojnem sustavu te provjereni na testnom prijenosnom sustavu Brazila. Metoda koja kombinira participacijske faktore za određivanje lokacije stabilizatora elektromehaničkih oscilacija i imperijalističkog optimizacijskog algoritma za odabir parametara stabilizatora predstavljena je literaturom [31] pri čemu je funkcija cilja minimizacija koeficijenta prigušenja. Testna mreža je dio stvarnog elektroenergetskog sustava sa 37 sabirnica i 16 generatora.

## 2.4 Optimizacijske metode parametriranja stabilizatora elektromehaničkih oscilacija

Analitičke metode korištene za parametriranje stabilizatora elektromehaničkih oscilacija su vremenom zamijenjene različitim optimizacijskim metodama [32], [33]. Pregled i usporedba metoda inspiriranih biološkim procesima, sa godinom kada je metoda prvo primijenjena, dan je u radu [34]. Između ostalog razmatrani su metoda roja čestica, genetski algoritam, *Grey Wolf* i *Sooty-Tern* metoda uz funkciju cilja minimizacije koeficijenta prigušenja i realnog dijela svojstvene vrijednosti. Također, za svaku metodu je navedena specifičnost primjene (testni sustav, varijabla po kojoj se provodi optimizacija) iz čega se uočava da se tek razvojem složenijih metoda kao varijabla koristi odstupanje frekvencije i primjena na višestrojnom sustavu. Usporedba metoda u višestrojnom sustavu s naglaskom na algoritam pretraživanja predstavljena je u radovima [35], [36] uz korištenje pokazatelja kompleksne frekvencijske domene (koeficijent prigušenja i prigušenje) dok je u [37] metoda roja čestica uspoređena sa diferencijalnim evolucijskim algoritmom za jednostrojni sustav.

U radu [38], stabilizator elektromehaničkih oscilacija parametriran metodom roja čestica se koristi i za poboljšanje tranzijentne stabilnosti sustava. Funkcija cilja je minimizacija odstupanja brzine generatora uz ograničene vrijednosti pojačanja automatskog regulatora napona, i stabilizatora

elektromehaničkih oscilacija. Ispitni model je jednostrojni sustav modeliran u MATLAB/SIMULINK okruženju. Ista metoda, ispitana na jednostrojnem sustavu je primijenjena i pri parametriranju u radu [39], ali je funkcija cilja definirana kao minimizacija koeficijenta prigušenja. Parametriranje metodom roja čestica na složenom sustavu s 10 generatora i 39 sabirnica je predstavljeno u literaturi [40]. U ovom slučaju funkcija cilja je minimizacija odstupanja brzine generatora. Model je izrađen i analiza je provedena u MATLAB/SIMULINK okruženju. Usporedba metoda fazne kompenzacije i metode roja čestica na primjeru SMIB sustava je napravljena u literaturi [41]. Pored metodologije, napisana su najčešća ograničenja i vrijednosti potrebni za postavljanje i vođenje optimizacijskog procesa, ali nigdje nije izravno izražena funkcija cilja za koju se provodi optimizacija. Optimizacijska metoda ispitana na jednostrojnem sustavu s funkcijom cilja minimizacije odstupanja frekvencije uspoređena je za različite vrste stabilizatora u radu [42]. Metoda roja čestica primijenjena je za parametriranje stabilizatora i FACTS uređaja u mreži s vjetroelektranom spojenom na testni sustav sa 14 sabirnica [43] i prema pokazatelju kompleksne frekvencijske domene. Osim osnovne metode postoje i brojna unaprjeđenja kao što je predloženo u [44]. Osim navedenih primjer parametriranja navedenom metodom predstavljen je u [45] pri kombinaciji stabilizatora elektromehaničkih oscilacija i FACTS uređaja na primjeru sustava sa devet sabirnica, kao i u [46] za sustav sa 39 sabirnica.

Metoda genetskog algoritma za parametriranje stabilizatora elektromehaničkih oscilacija u WSCC (kratica za *Western System Coordinating Council*) sustavu sa devet sabirnica i tri generatora uz funkciju cilja minimizacije koeficijenta prigušenja je korištena u radu [47]. Također, u istom radu je pored stabilizatora elektromehaničkih oscilacija primijenjen i FACTS uređaj čiji su parametri određeni istom metodom kao i parametri stabilizatora. Istom metodom parametriran je stabilizator elektromehaničkih oscilacija u radu [48]. Optimizacija se provodi za dvije funkcije cilja: minimizaciju koeficijenta prigušenja i maksimizaciju prigušenja uz ograničenja pojačanja u rasponu od 0.1 do 50 te vremenskih konstanti  $T_1$  do  $T_4$  od 0.01 do 1.5 sekundi te dodatno ograničenje frekvencije modova između minimalne i maksimalne (nisu specificirane granice). Metoda je ispitana na složenom sustavu s devet sabirnica i tri generatora te sustavu s 39 sabirnica, a model je izrađen te je analiza provedena u MATLAB-u. Na istim testnim sustavima je ispitana učinkovitost stabilizatora u radu [49]. Pored toga, za algoritam je definiran broj generacija i vjerojatnosti križanja i mutacije. Također, metoda genetskog algoritma za jednostrojni sustav predložena je i u [50]-[53] i za pokazatelje iz kompleksne frekvencijske domene.

Metoda simuliranog kaljenja korištena je za rješavanje brojnih optimizacijskih problema, zbog svoje robusnosti, jednostavnosti prilagodbe ograničenja i neovisnosti o modelu mreže. U funkciji

parametriranja stabilizatora elektromehaničkih oscilacije predložen je u radovima [54] i [55]. U [54] koordinirana je primjena FACTS uređaja i stabilizatora s primjenom u jednostrojnom sustavu s različitim pogonskim uvjetima i iznosima opterećenja. Funkcija cilja je minimizacija odstupanja željenog i stvarnog realnog dijela svojstvene vrijednosti. Rad [55] za funkciju cilja ima maksimizaciju relativnog koeficijenta prigušenja za stabilizator primijenjen u jednostrojnom sustavu. Usporedba metoda (roj čestica, simulirano kaljenje) u sustavu sa četiri generatora te pohranom energije je napravljena u [56] te se kao funkcija cilja uzima minimizacija razlike koeficijenta prigušenja oscilatornih i neoscilatornih modova i prigušenja. Metoda simuliranog kaljenja na istom testnom sustavu sa četiri generatora je predložena i u [57] sa pokazateljima vremenske domene kao dijelom funkcije cilja.

Različiti problemi u elektroenergetici se mogu riješiti primjenom optimizacijskih metoda pretraživanja, a tabu pretraživanje je jedna od njih. Budući da rezultat optimizacije ovisi o početnim uvjetima, u radu [58] se ispituje učinkovitost algoritma za različite početne uvjete te je metoda tabu pretraživanja uspoređena s diferencijalnim evolucijskim algoritmom na jednostrojnom sustavu dok je u [59] uspoređen sa metodom roja čestica i unaprijeđenom metodom roja čestica.. Isti model pretraživanja je primijenjen i u literaturi [60]–[62] Unaprijeđeni algoritam pretrage, primijenjen na stabilizator u jednostrojnom ili proširenom jednostrojnom sustavu opisan je u [63], [64].

## 2.5 Specifične primjene stabilizatora elektromehaničkih oscilacija

Optimizacijske metode parametriranja uzimaju zamah od 1990-ih godina, kada se dotadašnje iskustvene metode, primijenjene na stvarne mreže i za rješavanje postojećih problema kao što je primjer u radovima [65]–[67] u kojima su parametri stabilizatori odabrani metodom fazne kompenzacije i za frekvencijsku domenu. Također, u navedenim radovima je opisan uzrok pojave oscilacija (velika opterećenja prijenosnih vodova, pogotovo vodova koji povezuju područja s velikom neravnotežom proizvodnje i potrošnje) te posljedice njihove pojave (odstupanja napona koja postaju značajnije izražena u sustavima s velikom varijabilnom potrošnjom i za vodove na granici prijenosnog kapaciteta ili u goreu slučaju ispad dijela mreže).

Nakon prvih opisa oscilacija i početka primjene stabilizatora elektromehaničkih oscilacija, razvijaju se metode predložene i ispitane na jednostavnim testnim sustavima. Integracijom obnovljivih izvora energije, razvojem tržišta, primjenom novih tehnologija, povećavaju se i spoznaje o mogućim primjenama stabilizatora elektromehaničkih oscilacija, kao i broj radova koji prate razvoj metoda. U radovima [68], [69] stabilizator elektromehaničkih oscilacija je integriran u kombinaciji sa vjetroelektranom, čime se postiže poboljšanje oscilatorne stabilnosti sustava. Metoda

parametriranja je fazna kompenzacija s pokazateljima iz frekvencijske domene, ograničenjima pojačanja i vremenske konstante, a osim poboljšanja oscilatorne stabilnosti, poboljšana su i dinamička svojstva sustava tokom prolaska kroz kvar. Primjena stabilizatora elektromehaničkih oscilacija je česta u sustavima s niskom inercijom, primjerice mrežama s visokom integracijom vjetroelektrana [70]-[72]. U sva tri rada korišteni su pokazatelji iz kompleksne frekvencijske domene te su, osim u [71] u kojemu je korišten algoritam krijesnice u složenom sustavu, korišteni prošireni modeli jednostrojnog sustava. Nadalje, usporedba rada u mrežama sa različitim tipovima elektrana na obnovljive izvore energije, utjecaja njihove lokacije, snage i analiza tranzijentne stabilnosti s obzirom na različite poremećaje tematika je rada [73]. Dobar odabir lokacije distribuiranih izvora može smanjiti niskofrekvencijske oscilacije, a implementacijom stabilizatora se učinkovitije i brže prigušuju.

Stabilizator elektromehaničkih oscilacija kao ulaznu veličinu ima neki od signala koji su vezani uz mehaničko gibanje generatora zbog čega njegova primjena ima smisla samo u mrežama koje imaju sinkroni ili asinkroni generator. U mrežama s visokom integracijom fotonaponskih elektrana se ugrađuje na sinkroni generator dok se u fotonaponskim elektranama implementira regulator sličnog vladanja poput stabilizatora elektromehaničkih oscilacija ili se povećanje prigušenje sustava povećava načinom upravljanja izmjenjivača. Pregled metoda upravljanja te utjecaja na mrežu može se naći u radovima [74], [75].

U svrhu verifikacije rezultata se često ista metoda parametriranja ispituje na jednostrojnog i složenom sustavu. Autori Peres i ostali [76] predlažu primjenu višepojasnog stabilizatora elektromehaničkih oscilacija, koji je ispitan na pojednostavljenom modelu jednostrojnog sustava te nakon toga usporedbu sa višestrojnim sustavom (ekvivalentnim modelom dijela brazilske prijenosne mreže sa sedam sabirnica i pet generatora). Parametriranje stabilizatora elektromehaničkih oscilacija u kombinaciji s automatskim regulatorom napona primjenom metode Bodeovog dijagrama je predloženo u literaturi [77] i [78]. Djelovanjem na automatski regulator napona poboljšava se oscilatorna stabilnost uz narušavanje tranzijentne. U prvom radu predložena metodologija je ispitana na jednostavnom sustavu s dva područja i četiri generatora (tzv. prošireni SMIB) te na složenom testnom sustavu poznatijem kao New England sa 39 sabirnica i 10 generatora. U radu [78] razmatran je dio brazilske prijenosne mreže sa sedam sabirnica i pet generatora koji se često pojavljuje kao ispitni model zbog jednostavne strukture i velikog broja generatora u odnosu na broj sabirnica.

Novi načini upravljanja energijom, kao i otvaranje tržišta, doveli su i do mogućnosti primjene stabilizatora elektromehaničkih oscilacija i novih uređaja za upravljanje tokovima snaga u tržišnim uvjetima. Tako se u radu [79] stabilizator koristi u kombinaciji s FACTS uređajima (engl. *Flexible*

*AC Transmission System Devices, FACTS*) s ciljem povećanja prijenosnog kapaciteta voda, poboljšanja oscilatorne i tranzijentne stabilnosti. Istu primjenu su predložili i autori u radovima [80], gdje se kao metoda optimiranja parametara temelji na tržišnim signalima čime se postiže najveća zarada za proizvođača te u radu [81] gdje se automatski regulator napona i stabilizator elektromehaničkih oscilacija uključuju u funkciju cilja, a njihovim djelovanjem se utječe na marginalne cijene, kao i na tržište pomoćnih usluga.

Primjena novih tehnologija se ogleda u kombinaciji stabilizatora elektromehaničkih oscilacija i različitih FACTS uređaja, koji u kombinaciji čine uređaje za prigušenje oscilacija (engl. *Power Oscillation Dampers, POD*) [82]-[87]. FACTS uređaji su pogodni za poboljšanje naponske, frekvencijske i tranzijentne stabilnosti, a budući da se konvencionalne mreže transformiraju u napredne, te se omogućuje komunikacija sa svim dijelovima mreže, za stalni nadzor sustava se primjenjuju sinkrofazorska mjerenja u velikim čvorištima sustava (engl. *Phase Measurement Unit, PMU*). Ovisno o brzini prijenosa signala, definiranog komunikacijskom mrežom, u svakom trenutku se mogu dobiti podaci o iznosima napona, kutovima napona, snagama, strujama te drugim relevantnim veličinama u gotovo stvarnom vremenu. Prema mjernim podacima se mogu vršiti potrebne izmjene i promjene parametara stabilizatora. Primjena sinkrofazora je opisana u radovima [88], gdje FACTS uređaj i stabilizator elektromehaničkih oscilacija prigušuju oscilacije za različite vrste poremećaja u sustavu, a alokacija se provodi na temelju rezultata mjerenja PMU na primjeru mreže sa 14 sabirnica; literaturi [89] u kojoj se detekcija oscilacija provodi mjerenjem sinkrofazora na primjeru jednostavnog sustava sa dva generatora.

Prilikom parametriranja stabilizatora postavlja se pitanje mogućnosti promjene postavki stabilizatora ovisno o trenutnom stanju u mreži. Mjerenjem s pomoću PMU se podaci mogu dobiti u jako kratkom vremenu, čime se otvara mogućnost prilagodbe u stvarnom vremenu. Jedan takav način optimizacije, s funkcijom cilja minimizacije integrala odstupanja frekvencije predložen je radom [90]. *Moth-Flame* optimizacijski algoritam parametriranja ispitan je na proširenom SMIB sustavu, a rezultati pokazuju da se vrijednosti mogu promijeniti i prilagoditi prema izmjerenim vrijednostima. Metoda optimizacije pod nazivom optimizacija mapiranja srednje varijance (engl. *Mean-variance mapping optimization, MVMO*) je predložena u [91]. Korišten je model složene mreže, dio prijenosne mreže Ekvadora sa funkcijom cilja minimizacije odstupanja koeficijenta prigušenja uz ograničenje pojačanja i vremenske konstante. Ovdje je nužno naglasiti da u radu nije eksplicitno naznačeno koje su varijable ograničenja kao ni njihove vrijednosti. Za modeliranje je korišten programski paket DIgSILENT PowerFactory i programski jezik DIgSILENT Programming Language (DPL) u kojemu je proveden optimizacijski proces.



Rad stabilizatora elektromehaničkih oscilacije se može analizirati i na modelu postojeće mreže, kao što je slučaj u radu [92] u kojemu je djelovanje stabilizatora druge generacije (PSS2B) ispitano u modelu stvarne mreže, odnosno višepojasnog stabilizatora [93].

Proučavanjem literature može se zaključiti da se većina metoda parametriranja stabilizatora elektromehaničkih oscilacija temelji na optimizaciji parametara iz kompleksne frekvencijske domene (prigušenja ili relativnog koeficijenta prigušenja), izravnim očitanjem parametara ili prilagodbom na temelju frekvencije određene Bodeovim dijagramom. Primjenom ove metode se poboljšava oscilatorna stabilnost jer se oscilatorni modovi smještaju na željeno mjesto u kompleksnoj ravnini, ali se ne poboljšava i tranzijentna stabilnost za svaki od tih slučajeva. Također, većina metoda je ispitana i analizirana na jednostavnim modelima kao što je jednostrojni sustav spojen na krutu mrežu ili prošireni sustav sa dva područja u kojima nema međusobnog utjecaja dinamike ostalih generatora čime se ne dobije potpuna slika ponašanja stabilizatora elektromehaničkih oscilacija. Da bi se pak provjerila kvaliteta parametriranja, parametre stabilizatora se ispituje u složenom sustavu, kako je predloženo u nekim radovima. Pojednostavljenje procedure se postiže primjenom različitih optimizacijskih metoda, a koje većinom uzimaju iste funkcije cilja kao i analitičke metode uz pokazatelje iz frekvencijske domene. Pored toga, većina optimizacijskih metoda ne daje točne vrijednosti ograničenja varijabli (najčešće su ograničenja definirana kao ograničenje pojačanja i vremenskih konstanti između minimalne i maksimalne vrijednosti) bez poznate brojčane vrijednosti. Uz to nijedna optimizacijska metoda ne navodi početne vrijednosti relevantne za provođenje optimizacije, kao što su veličina početne populacije, broj iteracija ili koeficijente koji utječu na tijek optimizacijskog procesa.

### **3 Metoda za postavljanje i prilagodbu parametara stabilizatora elektromehaničkih oscilacija pomoću pokazatelja kompleksne frekvencijske i vremenske domene**

U ovom poglavlju opisana je analitička metoda odabira i postavljanja parametara stabilizatora elektromehaničkih oscilacija. Metoda predstavljena u ovom poglavlju je doprinos „Razvoj analitičke metode za postavljanje i prilagodbu parametara stabilizatora elektromehaničkih oscilacija pomoću pokazatelja kompleksne frekvencijske i vremenske domene“, a koja je objavljena u radovima

- Marić, P.; Kljajić, R.; Chamorro, H.R.; Glavaš, H. Power System Stabilizer Tuning Algorithm in a Multimachine System Based on S-Domain and Time Domain System Performance Measures. *Energies* **2021**, *14*, 5644. <https://doi.org/10.3390/en14185644>
- Košorog, T.; Mehmedović, M.; Marić, P.; Kljajić, R. Comparative Study of Single-Input and Dual-Input PSS in Multi-machine System // 32nd International Conference on Organization and Technology of Maintenance (OTO 2023)

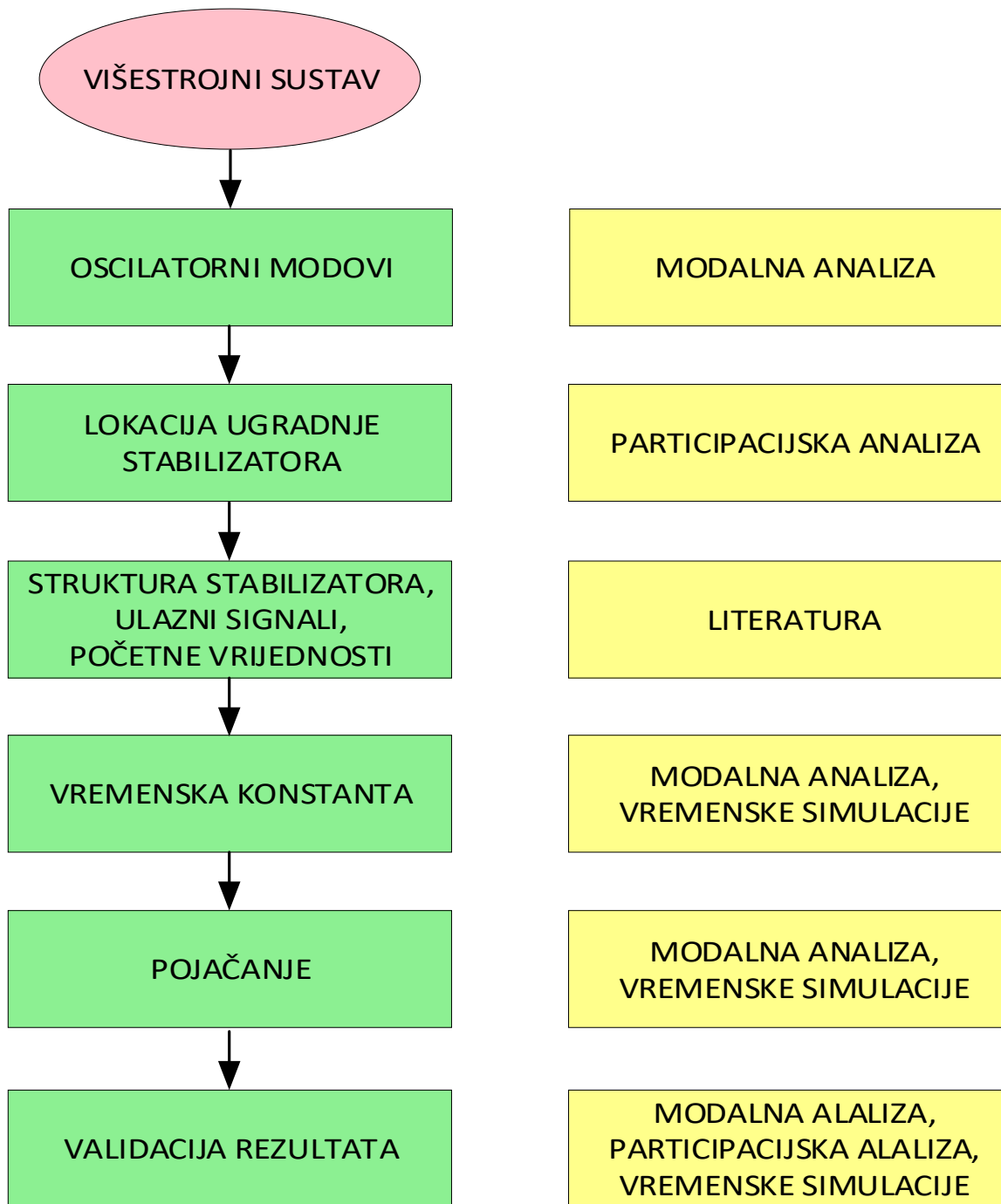
#### 3.1 Analitička metoda parametriranja stabilizatora elektromehaničkih oscilacija

U analizi stabilnosti sustava nužno je poznavati njegovu dinamiku u različitim radnim uvjetima i za različite poremećaje. Parametriranje stabilizatora elektromehaničkih oscilacija se provodi metodom fazne kompenzacije kojom se postiže prigušenje jednog ili više modova. U skladu s očekivanim i stvarnim modovima sustava provodi se postavljanje i parametriranje stabilizatora elektroenergetskog sustava u sljedećim koracima:

1. Određivanje oscilatornih modova
2. Određivanje lokacije ugradnje stabilizatora elektromehaničkih oscilacija
3. Odabir strukture stabilizatora elektromehaničkih oscilacija i njegovih početnih parametara
4. Određivanje vremenske konstante stabilizatora elektromehaničkih oscilacija
5. Određivanje pojačanja stabilizatora elektromehaničkih oscilacija
6. Verifikacija parametara.

U svakom koraku se provode metode analize sustava na uvedeni poremećaj, pri čemu se koriste metode modalne analize za dobivanje rezultata iz kompleksne frekvencijske domene te RMS simulacije u vremenskoj domeni, što je prikazano slikom 3.1. U višestrojnom sustavu je prvo nužno detektirati niskofrekvencijske oscilacije, što se postiže modalnom analizom sustava. Rezultati modalne analize su modovi različitih vrijednosti i frekvencija koji ukazuju na stabilnost sustava

Metoda za postavljanje i prilagodbu parametara stabilizatora elektromehaničkih oscilacija pomoću pokazatelja kompleksne frekvencijske i vremenske domene (prigušenje ili raspirivanje oscilacija). Ukoliko postoje niskofrekvencijske oscilacije, daljnjom analizom se određuje koji generator ih izaziva i on postaje mjesto ugradnje stabilizatora.



Slika 3.1 Tijek parametriranja stabilizatora elektromehaničkih oscilacija

U drugom koraku se koristi participacijska analiza nakon čega slijedi odabir strukture, ulaznih signala i početnih vrijednosti početnih parametara prema referentnoj literaturi. Ujedno, ovaj korak je jedini za koji se ne koriste nikakve metode analize sustava. U koraku određivanja vremenske

Metoda za postavljanje i prilagodbu parametara stabilizatora elektromehaničkih oscilacija pomoću pokazatelja kompleksne frekvencijske i vremenske domene

konstante i pojačanja se ponovno provode iterativne metode modalne analize i RMS simulacija, kao i prilikom validacije rezultata gdje se još dodatno provodi i participacijska analiza. Korištenjem navedenih alata, prvenstveno modalne analize i RMS simulacija se prilikom parametriranja vodi računa o pokazateljima oscilatorne i tranzijentne stabilnosti.

Sljedeći matematički opis elektroenergetskog sustava je napravljen prema literaturi [1]. Elektroenergetski sustav se može općenito pisati kao set  $n$  nelinearnih nezavisnih diferencijalnih jednadžbi

$$\dot{x} = f(x, u, t) \quad (3-1)$$

gdje je:

$\dot{x}$ - derivacija varijable stanja po vremenu  $t$ ,

$x$ - vektor stanja koji se sastoji od  $n$  varijabli stanja,

$u$  – vektor ulaznih veličina sustava.

Varijable stanja su fizičke veličine pomoću kojih se može opisati sustav. Veličine koje se mogu koristiti kao varijable stanja su napon, djelatna snaga, struja, kut rotora, brzina generatora, frekvencija, kao i bilo koja druga fizikalna veličina povezuje s diferencijalnim jednadžbama koje opisuju dinamiku sustava. Odabirom različitih varijabli se također bira različit  $n$ -dimenzionalni euklidski prostor u kojem se varijable prikazuju, tzv. prostor stanja. Funkcija  $f$ , koja sadrži pojedinačne funkcije  $f_1 - f_n$  se može prikazati u vektorskom obliku kao

$$f = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

Vektor stanja  $x$  je jednostupčani vektor

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

pri čemu su  $x_1 - x_n$  varijable stanja, a vektor ulaznih veličina sustava koji se sastoji od  $r$  ulaznih veličina označenih kao  $u_1 - u_r$  i sadrži sve ulaze u sustav:

$$u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_r \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

Ulazne veličine su svi signali koji mogu utjecati na djelovanje sustava. Za autonomne sustave se jednadžba može pojednostaviti budući da nema izravne ovisnosti o vremenu i pisati kao

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (3-5)$$

Varijablama stanja i ulaznim veličinama se može u potpunosti opisati dinamičko vladanje sustava [1]. Za nelinearne i linearne sustave bitno je pronaći točku ravnoteže u kojima su sve derivacije

Metoda za postavljanje i prilagodbu parametara stabilizatora elektromehaničkih oscilacija pomoću pokazatelja kompleksne frekvencijske i vremenske domene varijabli stanja jednake nuli, odnosno sve varijable su konstantne. Izvan ravnotežne točke ili za ulaznu veličinu različitu od nule, stanje sustava će se mijenjati u vremenu što se prikazuje trajektorijama stanja. O stabilnosti sustava se može zaključiti upravo iz ravnotežnih točaka. Linearni sustavu imaju samo jednu ravnotežnu, a nelinearni mogu imati i više točaka ravnoteže stoga se za nelinearne sustave mora provesti linearizacija oko ravnotežne točke, što je nužno prilikom analize stabilnosti s obzirom na mali poremećaj. U ravnotežnoj točki za izraz (3-1) vrijedi

$$\dot{x}_0 = f(x_0, u_0) = 0 \quad (3-6)$$

Ako se mali poremećaj definira promjenom varijable stanja  $\Delta x$  od početnog stanja  $x_0$

$$x = x_0 + \Delta x \quad (3-7)$$

i ulazne varijable  $\Delta u$  u odnosu na početnu vrijednost  $u_0$

$$u = u_0 + \Delta u \quad (3-8)$$

jednadžba (3-6) prelazi u oblik

$$\dot{x} = \dot{x}_0 + \Delta \dot{x} = f[(x_0 + \Delta x), (u_0 + \Delta u)] \quad (3-9)$$

što se uz pretpostavku razvoja u Taylorov red i zanemarenja svih viših derivacija svodi na jednadžbu (3-10)

$$\dot{x}_i = f_i(x_0, u_0) + \frac{\partial f_i}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial f_i}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial u_r} \Delta u_r \quad (3-10)$$

Analizom izraza (3-10) i usporedbom sa izrazom (3-6) može se zaključiti da prvi član izraza  $f_i(x_0, u_0)$  predstavlja vrijednost u ravnotežnoj točki, odnosno da se poremećaj može definirati kao

$$\Delta \dot{x}_i = \frac{\partial f_i}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial f_i}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial u_r} \Delta u_r \quad (3-11)$$

za  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Isti odnosi vrijede i za izlaz iz sustava, koji se može opisati pomoću varijabli stanja i ulaznih varijabli kao

$$y = g(x, u) \quad (3-12)$$

gdje su:

$y$  – vektor izlaza iz sustava,

$g$  - vektor nelinearnih funkcija koje povezuju ulazne varijable, varijable stanja i izlazne varijable.

Vektor izlaznih veličina  $y$  se može pisati kao

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix} \quad (3-13)$$

dok se vektor  $g$  prikazuje kao vektor

Metoda za postavljanje i prilagodbu parametara stabilizatora elektromehaničkih oscilacija pomoću pokazatelja kompleksne frekvencijske i vremenske domene

$$g = \begin{bmatrix} g \\ g_2 \\ \vdots \\ g_m \end{bmatrix} \quad (3-14)$$

Za poremećaj vrijede isti odnosi pa se nakon linearizacije i razvoja u red može pisati

$$\dot{y}_j = g_j(x_0, u_0) + \frac{\partial g_j}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial g_j}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial g_j}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial g_j}{\partial u_r} \Delta u_r \quad (3-15)$$

Iz čega se uočava da je prvi dio izraza (3-15) vrijednost u točki ravnoteže, a poremećaj

$$\Delta \dot{y}_j = \frac{\partial g_j}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial g_j}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial g_j}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial g_j}{\partial u_r} \Delta u_r \quad (3-16)$$

za  $j = 1, 2, \dots, m$ .

Nakon provedene linearizacije, jednadžbe koje opisuju sustav u ovisnosti o varijabli stanja i ulaznim veličinama, prikazane jednadžbom (3-5), te ovisnost izlaznih veličina o varijablama stanja i ulaznim veličinama, prikazane izrazom (3-12) se mogu pisati u matričnom obliku prema izrazima

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u \quad (3-17)$$

$$\Delta y = C \Delta x + D \Delta u \quad (3-18)$$

gdje je:

$A$  - matrica stanja, dimenzija  $n \times n$ ,

$B$  - upravljačka matrica, dimenzija  $n \times r$ ,

$C$  - izlazna matrica, dimenzija  $m \times n$ ,

$D$  - ulazno/izlazna matrica, dimenzija  $m \times r$ ,

$\Delta x$  -vektor stanja dimenzije  $n$ ,

$\Delta u$  - vektor ulaznih veličina dimenzije  $r$ .

Matrice  $A$ ,  $B$ ,  $C$  i  $D$  se također nazivaju i Jakobijeve matrice funkcija  $\mathbf{f}$  i  $\mathbf{g}$  u stabilnoj radnoj točki s obzirom na vektore upravljanja i vektore stanja. Elementi matrica se dobiju u ravnotežnoj točki za mali poremećaj i zapisuju kao:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (3-19)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial u_r} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial u_r} \end{bmatrix} \quad (3-20)$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial g_m}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_m}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (3-21)$$

Metoda za postavljanje i prilagodbu parametara stabilizatora elektromehaničkih oscilacija pomoću pokazatelja kompleksne frekvencijske i vremenske domene

$$D = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial u_r} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial g_m}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial g_m}{\partial u_r} \end{bmatrix} \quad (3-22)$$

Laplaceovom transformacijom jednadžbi (3-17) i (3-18) se dobiju jednadžbe u kompleksnoj vremenskoj domeni

$$s\Delta x(s) - \Delta x(0) = A\Delta x(s) + B\Delta u(s) \quad (3-23)$$

$$\Delta y(s) = C\Delta x(s) + D\Delta u(s) \quad (3-24)$$

koje nakon rješavanja daju oblik koji se sastoji od dijela koji ovisi o početnim uvjetima te drugog dijela koji ovisi o pobudi sustava:

$$\Delta x(s) = (sI - A)^{-1}[\Delta x(0) - B\Delta u(s)] = \frac{\text{adj}(sI - A)}{\det(sI - A)}[\Delta x(0) + B\Delta u(s)] \quad (3-25)$$

$$\Delta y(s) = C \frac{\text{adj}(sI - A)}{\det(sI - A)}[\Delta x(0) + B\Delta u(s)] - D\Delta u(s) \quad (3-26)$$

Iz determinante

$$\det(sI - A) = 0 \quad (3-27)$$

se dobiju korijeni jednadžbe koji su ujedno polovi prijenosnih funkcija  $\Delta x(s)$  i  $\Delta y(s)$  i iz nje se određuju svojstvene vrijednosti matrice  $A$  koje predstavljaju vezu između modova sustava i varijabli stanja. Na taj način se svojstveni vektor povezuje sa fizičkim veličinama, a rezultat je svojstvena vrijednost. Svojstvene vrijednosti matrice su sve vrijednosti za koje postoji skalar  $\lambda$  za koji postoje rješenja jednadžbe

$$A \cdot \Phi = \lambda \cdot \Phi \quad (3-28)$$

gdje je:

$\Phi$  - vektor dimenzije  $n \times 1$  različit od 0.

Ako se taj izraz izjednači s nulom

$$(A - \lambda I) \cdot \Phi = 0 \quad (3-29)$$

za sva netrivialna rješenja determinante

$$\det(A - \lambda I) = 0 \quad (3-30)$$

se dobiju karakteristične jednadžbe čija su rješenja svojstvene vrijednosti matrice  $A$  i mogu se pisati kao

$$\lambda_k = \alpha \pm j\omega \quad (3-31)$$

gdje je:

$\alpha$ - prigušenje, rad/s,

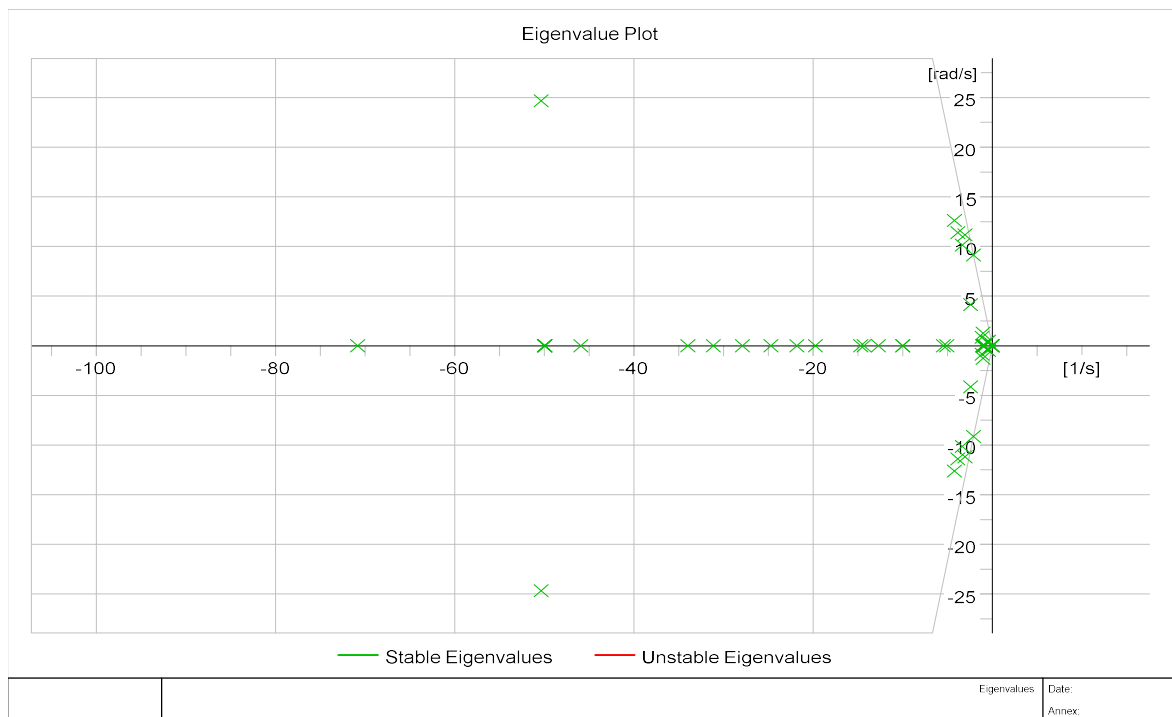
$\omega$ - frekvencija prigušenja, rad/s.

Metoda za postavljanje i prilagodbu parametara stabilizatora elektromehaničkih oscilacija pomoću pokazatelja kompleksne frekvencijske i vremenske domene

Svojstvene vrijednosti mogu biti monotone ili oscilatorne [94]. Negativni monotoni modovi predstavljaju padajući (prigušni) mod, a pozitivan aperiodičku nestabilnost. Oscilatorni modovi su kompleksno-konjugirani par koji odgovaraju oscilatornom modu. Sustav je stabilan ako svi modovi imaju negativno prigušenje, odnosno nalaze se u lijevoj polovici kompleksne ravnine [95]. Granicu stabilnosti u kompleksnoj frekvencijskoj domeni određuje oscilatorni mod koji je najbliži osi i naziva se dominantni mod. Nadalje, iz oscilatornih modova se mogu prepoznati vrijednosti koje su rezultat i pokazatelj niskofrekvencijskih oscilacija. Budući da se u predloženom algoritmu promatraju lokalni modovi, za proučavanje oscilatorne stabilnosti promatraju se samo modovi s frekvencijom između 6 i 12 rad/s. Iz svojstvenih vrijednosti se može odrediti relativni koeficijent prigušenja  $\zeta$  kao

$$\zeta = -\frac{\alpha_i}{\sqrt{\alpha_i^2 + \omega_i^2}} \quad (3-32)$$

Relativni koeficijent prigušenja ima vrijednost u rasponu od 0 do 1 i obično se koristi kao varijabla pri parametriranju stabilizatora elektromehaničkih oscilacija. Što je vrijednost bliža 1, dinamičko vladanje sustava je bolje. Sve svojstvene vrijednosti prikazane u kompleksnoj ravnini se nazivaju krivulja mjesta korijena. Na slici 3.2 je prikazana krivulja mjesta korijena sustava koji ima 58 modova, od čega je 34 monotonih.



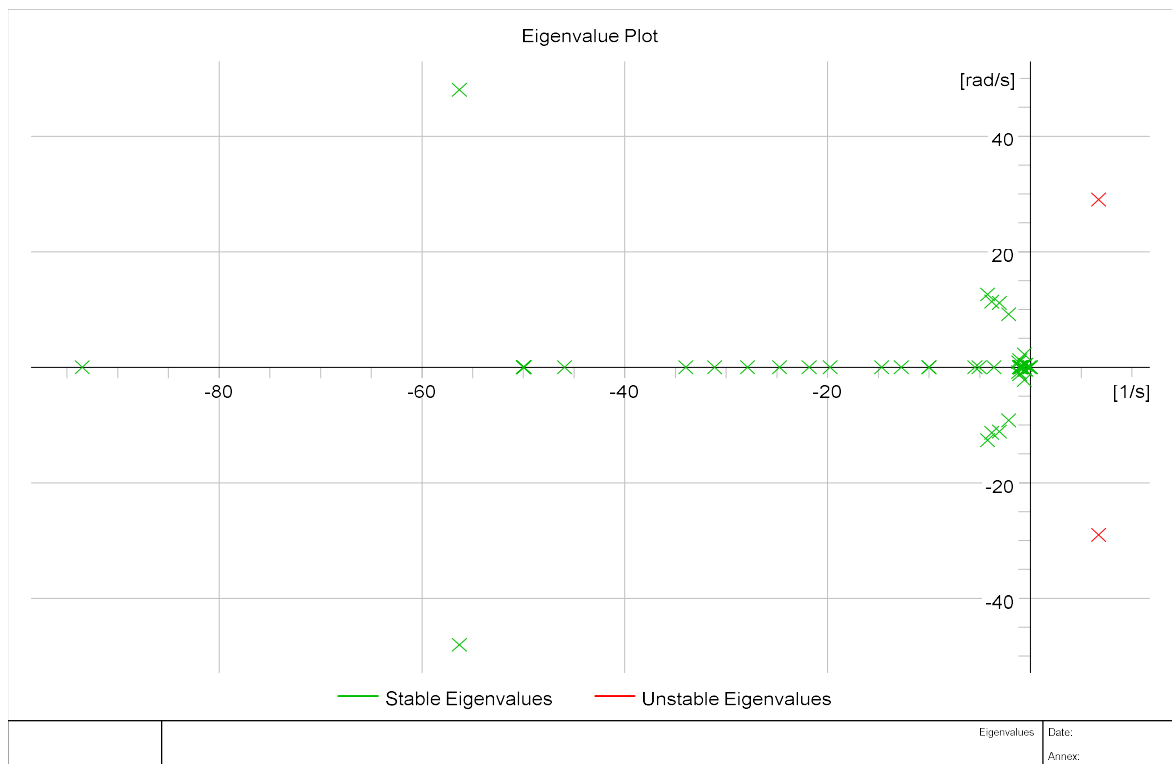
Slika 3.2 Krivulja mjesta korijena za stabilan sustav



Metoda za postavljanje i prilagodbu parametara stabilizatora elektromehaničkih oscilacija pomoću pokazatelja kompleksne frekvencijske i vremenske domene

Uočava se da postoji i 12 kompleksno-konjugiranih oscilatornih modova raspona frekvencija između 0.30884303602 i 19.823757908 rad/s koji odgovara niskofrekvencijskim oscilacijama različitih uzoraka. Budući da su svi modovi u lijevoj polovici kompleksne ravnine, može se zaključiti da je sustav stabilan. Povećanjem prigušenja, modovi bi se pomaknuli u lijevu stranu čime bi sustav postao stabilniji.

Ukoliko postoje modovi u desnoj polovici kompleksne ravnine, kao što je prikazano slikom 3.3, sustav je nestabilan. Prema tome, rezultat modalne analize prikazan u kompleksnoj frekvencijskoj ravnini može biti pokazatelj stabilnosti sustava. Oscilatorna stabilnost se poboljšava povećanjem prigušenja oscilatornih modova što rezultira njihovim pomicanjem u lijevu stranu kompleksne ravnine.



Slika 3.3 Krivulja mjesta korijena za nestabilan sustav

### 3.1.1 Participacijska analiza

Nakon provedene modalne analize može se utvrditi postoje li niskofrekvencijske oscilacije u sustavu i postoji li oscilatorni mod čija frekvencija odgovara lokalnom modu. Ukoliko postoje, analizira se dominantni mod raspona frekvencija koje odgovaraju lokalnom modu tako što se provodi participacijska analiza. Matrica A, koja je  $n$ -dimenzionalna se može opisati sljedećim setom jednadžbi

Metoda za postavljanje i prilagodbu parametara stabilizatora elektromehaničkih oscilacija pomoću pokazatelja kompleksne frekvencijske i vremenske domene

$$Av_k = v_k \lambda_k \quad (3-33)$$

$$w_k A = \lambda_k w_k \quad (3-34)$$

gdje su:

$v_k$  – desni svojstveni vektor matrice  $A$ ,

$\lambda_k$  – svojstvene vrijednosti matrice  $A$ ,

$w_k$  – desni svojstveni vektor matrice  $A$ .

Svaki mod u  $\lambda_k$  čine sve varijable s različitim udjelima koji se nazivaju participacijski faktori definirani izrazom (3-35)

$$p_{ki} = v_{ki} \cdot w_{ik} \quad (3-35)$$

gdje su:

$p_{ki}$  - participacija varijable  $x_k$  u modu  $\lambda_i$ ,

$v_{ki}$  –  $k$ -ti desni svojstveni redak vektora  $v_i$ ,

$w_{ik}$  –  $k$ -ti lijevi svojstveni redan vektora  $w_i$ .

U konačnici se participacijski faktori mogu pojednostavljeno pisati u obliku matrice

$$P = [p_1 \quad p_2 \quad \cdots \quad p_n] \quad (3-36)$$

Kako bi se participacijski faktori lakše mogli uspoređivati, provodi se njihova normalizacija čime je ukupna suma faktora u promatranom modu jednaka 1. Za generator koji ima najvišu participaciju u modu se smatra da je on izravni uzrok tog moda. Prema tome, nakon analize dominantnog moda, generator s najvećim participacijskim faktorom postaje lokacija na koju se ugrađuje stabilizator elektromehaničkih oscilacija [96].

### 3.1.2 Odabir strukture stabilizatora elektromehaničkih oscilacija i njegovih početnih parametara

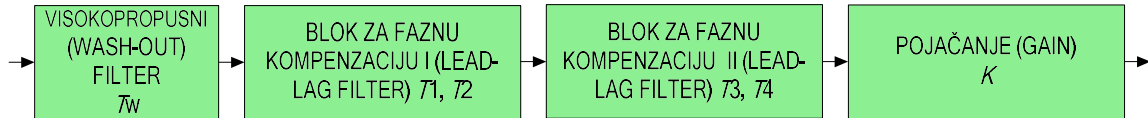
Stabilizator elektromehaničkih oscilacija se ugrađuje u uzbudni krug generatora i standardom su propisane njihove strukture kao i preporučeni raspon parametara [97]. Standard je u nekoliko navrata unaprijeđen, a slovna oznaka (A, B ili C) ukazuje na verziju standarda koja se koristi. Najčešće se koristi stabilizator s jednim ulaznim signalom, tzv. PSS1A. Ostali često korišteni stabilizatori su PSS2A/B/C koji koriste dva ulazna signala, PSS3C i PSS4C koji mogu prigušiti više frekvencijskih raspona [97].

Slikom 3.4 prikazana je struktura stabilizator elektromehaničkih oscilacija koji kao ulaz koristi jednu veličinu, PSS1A. Ulazni signali su brzina, frekvencija ili djelatna snaga. Kako se vidi na slici, stabilizator ima četiri osnovna bloka [98]:

- Visokopropusni (*engl. Wash-out*) filter s prijenosnom funkcijom  $\frac{1}{1+sT_w}$

Metoda za postavljanje i prilagodbu parametara stabilizatora elektromehaničkih oscilacija pomoću pokazatelja kompleksne frekvencijske i vremenske domene

- Blokove za faznu kompenzaciju (*engl. Lead-lag filter*), prijenosnih funkcija  $\frac{1+sT_1}{1+sT_2} \cdot \frac{1+sT_3}{1+sT_4}$
- Blok pojačanja (*engl. Gain*),  $K$



Slika 3.4 Struktura stabilizatora elektromehaničkih oscilacija s jednim ulazom

Iz slike i prijenosnih funkcija pojedinog bloka može se zaključiti da je nužno parametrirati šest varijabli (vremenske konstante  $T_w, T_1, T_2, T_3, T_4$  i pojačanje  $K$ ). Kako bi se procedura pojednostavila, prema preporuci IEEE [97] i prema literaturi [99]-[104] se mogu uzeti sljedeća pojednostavljena i preporučene vrijednosti:

- Vremenska konstanta visokopropusnog filtera  $T_w$  mora biti što veća. Visokopropusni filter ne smije propuštati istosmjerne i signale koji su posljedica privremenih poremećaja koji nastaju u ustaljenom radu koje bi rezultirale promjenom brzine [99]. Za prigušenje lokalnog moda se uzima vremenska konstanta u rasponu 1 do 20 sekundi.
- Vremenske konstante  $T_2$  i  $T_4$  trebaju imati što manju vrijednost i za njih vrijedi  $T_2 = T_4$ . Stoga se prema gore navedenoj literaturi njihova vrijednost uzima u rasponu 0.02 do 0.15 s.
- Vremenske konstante  $T_1$  i  $T_3$  se izjednačuju:  $T_1 = T_3 = T$ , a nalazi se u rasponu 0.2-1.5s.
- Pojačanje se postavlja u rasponu 0.1-50.

Uz navedena pojednostavljenja, cijeli proces odabira parametara se svodi na određivanje jedne vremenske konstante  $T$  i pojačanja  $K$ . Za početne vremenske konstante  $T_2 = T_4$  se uzima vrijednost 0.02 sekunde. Početna vrijednost vremenske konstante  $T_1 = T_3 = T = 0.2$  s. Pojačanje se odabire tako da iznosi jednu trećinu pojačanja pri kojemu sustav postaje nestabilan [105]. Budući da pojačanje ovisi o parametrima sinkronog generatora, prema [5] može se postaviti veza između inercijske konstante generatora i pojačanja

$$-\alpha_{dom} = \frac{K_d}{4H} \quad (3-37)$$

gdje je

$\alpha_{dom}$  - prigušenje dominantnog moda

$K_d$  - koeficijent pojačanja

$H$  - inercijska konstanta generatora, s.

Metoda za postavljanje i prilagodbu parametara stabilizatora elektromehaničkih oscilacija pomoću pokazatelja kompleksne frekvencijske i vremenske domene

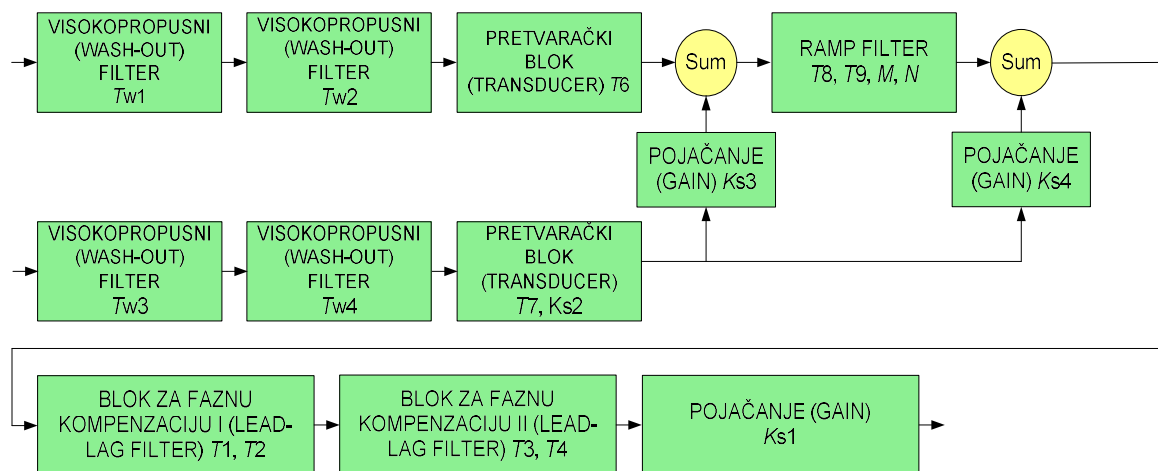
Inercijska konstanta se uzima za generator koji ima najveću participaciju u dominantnom modu.

Početno pojačanje se određuje iz izraza (3-38) kao

$$K_{init} = -\alpha_{dom} \cdot 4 \cdot H \quad (3-38)$$

Početne vrijednosti vremenske konstante i pojačanja nisu ujedno i optimalne vrijednosti, stoga je potrebno pronaći vrijednost kojom će se postići najbolje prigušenje niskofrekvencijskih oscilacija. Druga često korištena struktura je stabilizator elektromehaničkih oscilacija sa dvije ulazne veličine, najčešće brzinom generatora i derivacijom snage. Struktura je prikazana slikom 1.5 u odnosu na stabilizator s jednim ulazom ima znatno složeniju strukturu, ali je i djelovanje na prigušenje oscilacija i tranzijentnu stabilnost znatno bolje [98]. Sastoji se od [97], [98]:

- Četiri visokopropusna filtera s prijenosnom funkcijom  $\frac{1}{1+sT_w}$ , a vremenske konstante koje ih definiraju su  $T_{w1}$ ,  $T_{w2}$ ,  $T_{w3}$  i  $T_{w4}$
- Blokove za faznu kompenzaciju s prijenosnim funkcijama  $\frac{1+sT_1}{1+sT_2} \cdot \frac{1+sT_3}{1+sT_4}$  i vremenskim konstantama  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  i  $T_4$
- Dva pretvaračka bloka s prijenosnim funkcijama  $\frac{K_{S2}}{1+sT_7}$  i  $\frac{1}{1+sT_6}$ , vremenske konstante koje se parametriraju su  $T_6$  i  $T_7$  te pojačanje  $K_{S2}$
- Blok s filtrom rampe prijenosne funkcije  $\left[\frac{1+sT_8}{(1+sT_9)^M}\right]^N$ , kojemu se parametriraju vremenske konstante  $T_8$  i  $T_9$  i koeficijenti M i N
- Blokovi pojačanja (*engl. Gain*),  $K_{S1}$ ,  $K_{S3}$  i  $K_{S4}$ .



Slika 3.5 Struktura stabilizatora sa dva ulazna signala

Kao i za stabilizator elektromehaničkih oscilacija s jednim ulazom, pri parametriranju stabilizatora koji uzima dvije ulazne veličine se također mogu uzeti zanemarenja koja pojednostavljuju parametriranja. Zanemarenja koja se preporučuju literaturom [97], [99] – [103] su sljedeća:

Metoda za postavljanje i prilagodbu parametara stabilizatora elektromehaničkih oscilacija pomoću pokazatelja kompleksne frekvencijske i vremenske domene

- Vremenske konstante visokopropusnog filtera  $T_{w1} = T_{w2} = T_{w3}$
- Vremenska konstanta pretvaračkog bloka je jednaka konstanti visokopropusnog filtera  $T_7 = T_{w1} = T_{w2} = T_{w3}$
- Vremenske konstante blokova za kompenzaciju se izjednačuju  $T_2 = T_4$  i imaju jako malu vrijednost. Vremenske konstante  $T_1$  i  $T_3$  se izjednačuju:  $T_1 = T_3 = T$ , a nalazi se u rasponu 0.2-1.5s
- Konstante pojačanja  $K_{S3}$  i  $K_{S4}$  se uzimaju prema vrijednostima preporučenim u literaturi, dok se vrijednost  $K_{S1} = K$  traži.
- Koeficijenti  $M = 5$  i  $N = 1$  ili  $M = 2$  i  $N = 4$
- Vremenska konstanta  $K_{S2} = \frac{T_7}{2H}$ , gdje je  $H$  - inercijska konstanta generatora, a  $T_7$  se uzima prema preporukama iz literature.

U konačnici, procedura parametriranja se svodi na određivanje vremenske konstante  $T$  i pojačanja  $K$  kao i u slučaju stabilizatora s jednom ulaznom veličinom.

### 3.1.3 Određivanje vremenske konstante stabilizatora elektromehaničkih oscilacija

Pri parametriranju stabilizatora elektromehaničkih oscilacija uobičajeno se uzima pokazatelj iz kompleksne frekvencijske domene. Najčešće korišteni pokazatelji su prigušenje  $\alpha$  i relativni koeficijent prigušenja  $\zeta$ , najčešće s funkcijom cilja maksimizacije njihovog iznosa, što povoljno utječe na oscilatornu stabilnost sustava. Povećanjem relativnog koeficijenta prigušenja oscilatorni modovi se pomiču u lijevu stranu kompleksne ravnine. Istovremeno, povećanje prigušenja sustava može negativno utjecati na fizikalne veličine i signale u vremenskoj domeni, kao što su napon, brzina generatora, kut rotora generatora ili djelatnu snagu. Tim veličinama se nakon poremećaja povećava odstupanje u odnosu na vrijednost prije poremećaja, odnosno narušava se tranzijentna stabilnost sustava. Rješenje kojim se istovremeno poboljšava i oscilatorna kao i tranzijentna stabilnost je parametriranje stabilizatora elektromehaničkih oscilacija tako da se u obzir uzmu pokazatelji iz kompleksne frekvencijske domene i vremenske domene. Iz kompleksne frekvencijske domene se uzima relativni koeficijent prigušenja, koji se dobije kao rezultat modalne analize. Preostali signali, koji se uzimaju iz vremenske domene, su kut rotora  $\delta$ , brzina generatora  $\omega$  i djelatna snaga  $P$ . Kut rotora  $\delta$  je usko vezan uz moment prigušenja generatora, a cilj je povećati ga kako bi se što učinkovitije smanjile niskofrekvencijske oscilacije. Brzina generatora  $\omega$  se logično nameće za izbor signala koji će se promatrati jer većina stabilizatora elektromehaničkih oscilacija uzima upravo brzinu generatora (ili frekvenciju, koja je opet vezana uz brzinu) kao ulaznu veličinu. Cilj

Metoda za postavljanje i prilagodbu parametara stabilizatora elektromehaničkih oscilacija pomoću pokazatelja kompleksne frekvencijske i vremenske domene

primjene stabilizatora elektromehaničkih oscilacija je smanjiti njihanje snage na vodu, stoga se kao veličina pri parametriranju uzima djelatna snaga  $P$ .

U prethodnom koraku su odabrane početne vrijednosti pojačanja  $K_{init}$  i vremenske konstante  $T_1 = T_3 = T = 0.2$  s, koje ne mogu postići željeno djelovanje stabilizatora. Zbog toga se provodi iterativni postupak kojim se postiže najveće poboljšanje stabilnosti sustava. Prva vrijednost koja se optimira je vremenska konstanta dok pojačanje ostaje konstantno i jednako  $K_{init}$ . Kako bi se dobila vremenska konstanta, formira se prva skupina vrijednosti u kojima se početna vrijednost vremenske konstante povećava u koracima od 0.1 s:

$$T_{i,j} = T_{init} + \sum_{i=0}^n i \cdot 0.1 \quad (3-39)$$

za  $i = 1, 2, \dots, n$  broj iteracija u  $j$  skup vrijednosti.

Za svaku iteraciju se provodi modalna analiza iz čijih rezultata se određuje dominantni mod na način kako je opisano u prvom koraku procedure, a koeficijent relativnog prigušenja dominantnog moda  $\zeta_{dom}$  definira težinsku funkciju prigušenja prema sljedećem izrazu:

$$F_{\zeta} = \zeta_{dom} \quad (3-40)$$

Vrijednost koeficijenta prigušenja je u rasponu (0,1), što ga čini lako usporedivim sa ostalim korištenim signalima.

Nakon provedene modalne analize, provodi se simulacija u vremenskoj domeni nakon uvedenog malog poremećaja. Kao rezultat se dobiju odzivi brzine generatora, kuta rotora i djelatne snage koje je potrebno na neki način normirati da bi se mogli međusobno usporediti. Ako se pretpostavi da poremećaj nastupa u trenutku  $t = t_{init}$ , vrijednosti veličina brzine generatora, kuta rotora i djelatne snage u tom trenutku će biti jednake vrijednosti u ustaljenom radu i iznositi će redom  $\omega_{init}$ ,  $\delta_{init}$  i  $P_{init}$ . Usporedbom trenutne vrijednosti veličine sa početnom vrijednošću, uočava se da postoje odstupanja tih veličina - cilj je smanjiti ta odstupanja ili ih svesti na najmanju moguću mjeru. Kako bi se signali mogli uspoređivati međusobno, razlika kvadrata između trenutnog odstupanja i početne vrijednosti se uspoređuje sa početnom te se za svaki promatrani trenutak zbrajaju kvadrati razlike. Što je odstupanje manje, vrijednost je bliža nuli, a kako bi se mogle lakše usporediti sa težinskom funkcijom prigušenja, formiraju se težinske funkcije koje imaju oblik (3-41)-(3-43). Težinske funkcije se time svode na interval (0,1), što ih čini lako usporedivim. Budući da se promatraju tri signala, formiraju se tri međusobno neovisne težinske funkcije. Za više signala svaki od njih bi trebao biti predstavljen svojom neovisnom funkcijom. Težinska funkcija brzine generatora glasi:

Metoda za postavljanje i prilagodbu parametara stabilizatora elektromehaničkih oscilacija pomoću pokazatelja kompleksne frekvencijske i vremenske domene

$$\Gamma_{\omega} = 1 - \sum_{t=t_{init}}^{t=t_{end}} \left( \frac{\omega_t - \omega_{init}}{\omega_{init}} \right)^2 \quad (3-41)$$

gdje je

$t_{init}$  - početno vrijeme simulacije

$t_{end}$  - konačno vrijeme simulacije

$\omega_t$  - brzina generatora u trenutku  $t$

$\omega_{init}$  - početna brzina generatora

Težinska funkcija kuta rotora se definira prema izrazu (3-42)

$$\Gamma_{\delta} = 1 - \sum_{t=t_{init}}^{t=t_{end}} \left( \frac{\delta_t - \delta_{init}}{\delta_{init}} \right)^2 \quad (3-42)$$

gdje je

$\delta_t$  - kut rotora u trenutku  $t$

$\delta_{init}$  - početni kut rotora.

Zadnja težinska funkcija je vezana uz djelatnu snagu i može se pisati prema izrazu

$$\Gamma_P = 1 - \sum_{t=t_{init}}^{t=t_{end}} \left( \frac{P_t - P_{init}}{P_{init}} \right)^2 \quad (3-43)$$

gdje je

$P_t$  - djelatna snaga u trenutku  $t$

$P_{init}$  - početna djelatna snaga.

Što je manje odstupanje pojedinačnih težinskih funkcija, to je bolji odziv u vremenskoj domeni.

Međutim, samo poznavanje pojedinačnih funkcija, zbog različitog ponašanja veličina pri poremećaju ne može dati jednoznačnu odluku o kakvoći izlaznih signala. Stoga se postavlja konačna težinska funkcija koja je zbroj pojedinačnih težinskih funkcija:

$$\Gamma = \Gamma_{\zeta} + \Gamma_{\omega} + \Gamma_{\delta} + \Gamma_P \quad (3-44)$$

te se traži najveća vrijednost  $i$ -te iteracije vremenske konstante u  $j$ -toj grupi vrijednosti:

$$\max \Gamma_j(i) \quad (3-45)$$

Iterativni postupak se završava ukoliko postoji  $i$ -ta vrijednost za koju vrijedi

$$\Gamma_j(i+1) < \Gamma_j(i) \quad (3-46)$$

odnosno ako postoji maksimum funkcije. Vrijednost  $T_{i,j}$  za koju je ispunjen uvjet (3-46) se postavlja kao vrijednost vremenske konstante  $T$ . Ukoliko uvjet nije ispunjen, odnosno unutar postojećeg skupa vrijednosti ne postoji vrijednost koja zadovoljava izraz (3-46), formira se novi skup od ukupno pet vrijednosti prema izrazu (3-39), gdje je  $T_{init} = T_{n,j-i}$  dok god se ne ispunji traženi uvjet.

Metoda za postavljanje i prilagodbu parametara stabilizatora elektromehaničkih oscilacija pomoću pokazatelja kompleksne frekvencijske i vremenske domene

Vremenska konstanta pri kojoj ukupna težinska funkcija ima maksimalnu vrijednost se u daljnjem iterativnom postupku uzima kao konstantna dok se provodi iterativna promjena pojačanja.

### 3.1.4 Određivanje pojačanja stabilizatora elektromehaničkih oscilacija

Pojačanje stabilizatora ovisi o prigušenju dominantnog moda i inercijskoj konstanti sinkronog generatora. Prema preporukama, pojačanje je u rasponu između 1 i 50, dok početna vrijednost može biti bilo gdje unutar tog raspona. Stoga se pri određivanju pojačanja mora uzeti cijeli raspon vrijednosti kako bi se mogla odrediti točna vrijednost pri kojoj se postiže najveće prigušenje dominantnog moda i najmanje odstupanje signala iz vremenske domene nakon poremećaja u odnosu na vrijednosti u ustaljenom stanju. Kako bi se to postiglo, formiraju se dva skupa vrijednosti oko početne vrijednosti pojačanja, gornji skup koji sadrži  $m$  vrijednosti koji se dobije tako da se početnom pojačanju dodaje 1

$$K_{i,um} = K_{init} + \sum_{i=0}^{i=n} 1 \cdot i \quad (3-47)$$

za  $i = 1, 2, \dots, n$

$K_{i,um}$  -  $i$ -to pojačanje gornjeg skupa od ukupno  $m$  vrijednosti

kao i donji skup koji sadrži  $n$  vrijednosti koje se dobiju dodavanjem -1 na početnu vrijednost pojačanja

$$K_{i,ln} = K_{init} - \sum_{i=0}^{i=n} 1 \cdot i \quad (3-48)$$

za  $i = 1, 2, \dots, n$

$K_{i,ln}$  -  $i$ -to pojačanje donjeg skupa od ukupno  $n$  vrijednosti.

Za gornji skup vrijednosti se provodi modalna analiza i određuje težinska funkcija prigušenja prema izrazu (3-40). Nakon toga se provodi analiza u vremenskoj domeni na uvedeni mali poremećaj te se određuju težinske funkcije kuta rotora, brzine generatora i djelatne snage prema izrazima (3-41)-(3-43), kao i ukupna težinska funkcija (3-44). Kao i za varijacije vremenske konstante, i ovdje se određuje maksimum funkcije, odnosno vrijednost pojačanja za koju vrijedi

$$\max \Gamma_{i,um}(i) \quad (3-49)$$

dok se ne dobije vrijednost za koju vrijedi

$$\Gamma_{i,um}(i + 1) < \Gamma_{i,um}(i) \quad (3-50)$$

Ako uvjet (3-50) nije ispunjen formira se novi skup vrijednosti pojačanja u kojem je prva vrijednost jednaka  $K_{init} = K_{i,um}$ . Ako je uvjet ispunjen, vrijednost  $K_{i,um} = K_u$  za koju on vrijedi se



Metoda za postavljanje i prilagodbu parametara stabilizatora elektromehaničkih oscilacija pomoću pokazatelja kompleksne frekvencijske i vremenske domene postavlja kao vrijednost pojačanja gornjeg skupa. Nakon toga se cijeli postupak ponavlja za donji skup vrijednosti dok se nađe vrijednost

$$\max \Gamma_{i,ln}(i) \quad (3-51)$$

za koju vrijedi

$$\Gamma_{i,ln}(i + 1) < \Gamma_{i,ln}(i). \quad (3-52)$$

te se kao pojačanje donjeg skupa uzima  $K_{i,ln} = K_l$ . U konačnici, kada je pronađen maksimum za oba skupa vrijednosti, potrebno je odabrati konačno pojačanje između vrijednosti pojačanja gornjeg i donjeg skupa. Kako bi se odabrala vrijednost pojačanja, uspoređuju se iznosi težinskih funkcija za  $K_u$  i  $K_l$  i provjerava se koja vrijednost zadovoljava uvjet

$$\max \Gamma_{i,um}(i) > \max \Gamma_{i,ln}(i) \quad (3-53)$$

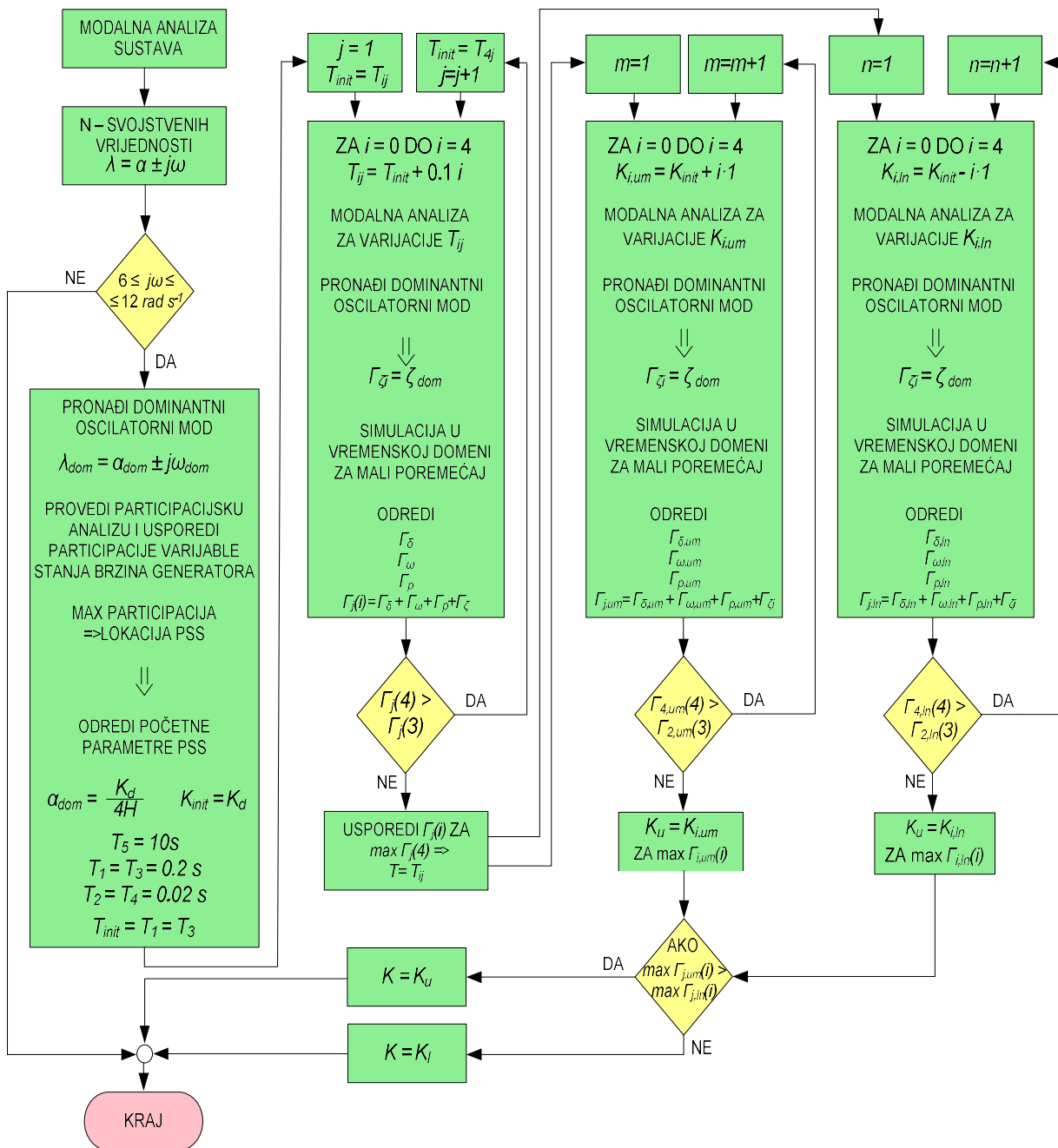
Ako nejednakost (3-53) vrijedi, pojačanje stabilizatora  $K$  je jednako pojačanju gornjeg skupa ( $K_u$ ), u suprotnom pojačanje je jednako pojačanju donjeg skupa  $K_l$ .

Procedura parametriranja se može prikazati dijagramom toka kao na slici 3.6. Iz dijagrama toka se vide svi prethodni koraci pri čemu je nužno za svaku novu iteraciju ponoviti modalnu analizu i simulacije u vremenskoj domeni budući da promjena vrijednosti vremenske konstante i pojačanja imaju značajan utjecaj na oscilatornu stabilnost, ali i na tranzijentnu stabilnost. Najveće prigušenje dominantnog moda znači poboljšanje oscilatorne stabilnosti, ali ne mora značiti da će se ujedno poboljšati pokazatelji u vremenskoj domeni. S druge strane, poboljšanje odziva u vremenskoj domeni (smanjenje nadvišenja, smanjenje valovitosti, brži povratak u ustaljeno stanje) ne mora nužno rezultirati, obično i ne rezultira, poboljšanjem oscilatorne stabilnosti.

### 3.1.5 Verifikacija parametara

Nakon što su optimirani svi parametri stabilizatora, provodi se testiranje i verifikacija rezultata. Uobičajeno, pri parametriranju stabilizatora korištenjem pokazatelja kompleksne frekvencijske domene, kao verifikacija se provode vremenske simulacije i promatranje karakterističnih veličina. U predloženoj metodologiji se kao verifikacija rezultata razmatraju odzivi u vremenskoj domeni za optimalne parametre koji se onda uspoređuju sa stanjem bez stabilizatora elektromehaničkih oscilacija. Na taj način se utvrđuje postoji li poboljšanje tranzijentne stabilnosti sustava i kakvoća regulacije. Pored vremenskih odziva, analizira se i oscilatorna stabilnost sustava. Ugradnjom stabilizatora elektromehaničkih oscilacija granica stabilnosti se pomjera, povećava se prigušenje sustava i time se oscilatorni modovi pomjeraju u lijevu stranu.

Metoda za postavljanje i prilagodbu parametara stabilizatora elektromehaničkih oscilacija pomoću pokazatelja kompleksne frekvencijske i vremenske domene



Slika 3.6 Algoritam parametriranja stabilizatora elektromehaničkih oscilacija[106]

### 3.2 Optimizacijske metode parametriranja stabilizatora elektromehaničkih oscilacija

Optimizacijske metode se sve češće koriste u planiranju i vođenju elektroenergetskog sustava i često se koriste pri parametriranju elemenata elektroenergetskog sustava. Osnovni cilj optimizacije je pronalazak kombinacije varijabli koje, uz zadana ograničenja, daju optimalnu vrijednost veličine [107]. Optimizacija se provodi u sljedećim osnovnim koracima:

1. Odabir kontrolnih varijabli i varijabli stanja
2. Postavljanje ograničenja
3. Definiranje funkcije cilja
4. Postavljanje granica varijabli
5. Odabir algoritma za rješenje problema
6. Pronalazak optimalnog rješenja
7. Verifikacija rezultata.

Moderne optimizacijske metode se temelje na oponašanju bioloških procesa, a neke od najčešće korištenih su metoda roja čestica, genetski algoritam, simulirano kaljenje, kolonija mrava, sivih vukova, zatim metode neuronskih mreža, pretraživanja, neizrazite (*Fuzzy*) logike, itd. Također, često se primjenjuju kombinacije navedenih metoda kako bi se brže došlo do rješenja ili otklonili nedostaci pojedine metode (kao što je ulazak u područje lokalnog ekstrema). Odabir algoritma ovisi o raznim faktorima: načinu modeliranja sustava, broju i vrsti varijabli koje je potrebno optimirati, brzini algoritma. U nastavku, u potpoglavljima 3.2.1 do 3.2.4 su predstavljeni algoritmi korišteni za usporedbu metoda parametriranja stabilizatora elektromehaničkih oscilacija. Za sve primijenjene algoritme funkcija cilja je postavljena kao maksimizacija funkcije cilja definirana izrazom (3-45) uz sljedeća ograničenja

$$1 \leq T_w \leq 20 \quad (3-54)$$

$$0.02 \text{ s} \leq T_2 = T_4 \leq 1.5 \text{ s} \quad (3-55)$$

$$0.2 \text{ s} \leq T_1 = T_3 \leq 1.5 \text{ s} \quad (3-56)$$

$$0.1 \leq K \leq 50 \quad (3-57)$$

Kako bi se metode mogle usporediti, nužno je definirati funkciju cilja koja će biti zajednička za sve metode te ograničenja varijable. Parametri koji će se promatrati su brzina i odstupanje vrijednosti u odnosu na vrijednosti dobivene analitičkom metodom.

### 3.2.1 Metoda roja čestica

Metoda roja čestica (engl. *Particle swarm optimization, PSO*) inspirirana je ponašanjem jata ptica, a prvi put je predstavljena 1995. godine [108]. Metoda je stohastična s osnovnom idejom očuvanja roja mogućih rješenja (čestica) koje se gibaju unutar prostora pretraživanja dok se ne pronađe optimalno rješenje. Koraci optimizacije su:

- Inicijalizacija osnovnog roja čestica
- Definiranje funkcije cilja
- Provjera rješenja
- Unaprjeđenje brzine i položaja čestice

Metoda za postavljanje i prilagodbu parametara stabilizatora elektromehaničkih oscilacija pomoću pokazatelja kompleksne frekvencijske i vremenske domene

- Unaprjeđenje osobnog i globalnog položaja
- Kriterij zaustavljanja i pronalazak optimuma.

#### *Osnovni roj čestica*

U prvom koraku se popunjava prostor pretraživanja česticama kojima se nasumično dodjeljuje početni položaj i početna brzina. Svaka čestica predstavlja jedno moguće rješenje unutar domene mogućih rješenja (prostora pretraživanja). Također, svaka čestica "zna" svoj položaj kao i položaje svojih susjednih čestica [108]. Pri inicijalizaciji čestica treba voditi računa o broju početnih čestica. Veći broj čestica povećava prostor pretraživanja što rezultira dužim vremenom računanja, premali uzorak ograničava prostor pretraživanja i isključuje brojna moguća rješenja [109]. Također, za mali početni uzorak moguće je zapadanje u lokalnom optimumu zbog uskog područja pretraživanja [109]. Ovisno o primjeni metode optimizacije (parametriranje regulatora, tokovi snaga, raspored rada proizvodnih jedinica) definiraju se minimalne i maksimalne vrijednosti konstanti ili karakterističnih veličina koje ujedno predstavljaju minimalnu i maksimalnu vrijednost koju čestica može postići. Pored toga nužno je postaviti najbolje poziciju čestice kao i globalnu najbolju vrijednost. Matematička osnova optimizacije rojem čestica je opisana prema literaturi [107-111]. Nakon definiranja početne populacije, potrebno je definirati  $n$ -dimenzionalnu funkciju cilja funkcije koju treba optimirati

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = f(X) \quad (3-58)$$

gdje je

$x_1, x_2, \dots, x_n$  - slobodne varijable dane funkcije

$X$  - set slobodnih varijabli.

Unutar seta mogućih rješenja funkcije (3-58) postoje varijable  $x^*$  koje predstavljaju ekstrem (minimum ili maksimum) funkcije. Optimizacija metodom roja čestica se pomoću čestica na različitim pozicijama u prostoru pretraživanja dobije jedna skalarna vrijednost koja predstavlja minimum ili maksimum funkcije, odnosno kvalitetu rješenja u području pretraživanja.

#### *Provjera rješenja*

Svaka čestica se giba nasumično u prostoru i nastoji doći prema zajedničkoj skupini. Gibanje  $i$ -te čestice u  $j$ -toj dimenziji počinje iz početne pozicije

$$x_{i,j}(t) = x(0) + v(0), u \text{ rasponu } (x_{min}, x_{max}) \quad (3-59)$$

gdje je

$x_{min}$  - donja granica varijable

$x_{max}$  - gornja granica varijable

$v$  - brzina čestice

Metoda za postavljanje i prilagodbu parametara stabilizatora elektromehaničkih oscilacija pomoću pokazatelja kompleksne frekvencijske i vremenske domene

Za početni položaj se vrši provjera prema funkciji cilja te ako su ispunjena ograničenja, prelazi se na sljedeći korak. U suprotnom se ponovno definira početna populacija.

Pored početnog položaja, svakoj čestici se dodjeljuje i pripadna brzina

$$v_j = [v_{j,1}, v_{j,2}, \dots, v_{j,m}] \quad (3-60)$$

gdje je

$v_{j,1}, v_{j,2}, \dots, v_{j,m}$  - brzina čestica definirana rasponom  $m$ - dimenzionalnog vektora.

*Unaprjeđenje brzine i položaja čestice*

S vremenom se položaj čestice mijenja. Prilikom gibanja čestice svaka čestica može dostići svoju najbolju poziciju (eng. *best position*) ili općenito najbolju poziciju (engl. *global best position*). Ova dva podatka su ključna u procesu optimizacije, a svaka promjena pozicije se odvija odvojeno na temelju brzine čestice preko izraza

$$x_{i,j}(k+1) = x_{i,j}(k) + v_{i,j}(k+1) \quad (3-61)$$

gdje je

$x_{i,j}(k)$  - položaj  $i$ -te čestice u  $j$ -toj dimenziji za  $k$ -tu iteraciju

$x_{i,j}(k+1)$  - položaj  $i$ -te čestice u  $j$ -toj dimenziji za  $k+1$  iteraciju

$v_{i,j}(k+1)$  - brzina  $i$ -te čestice u  $j$ -toj dimenziji za  $k+1$  iteraciju.

Prema izrazu (3-61) položaj svake čestice ovisi o prethodnom položaju i brzini čestice. Unaprjeđenjem položaja i brzine čestice pretražuje se cijeli prostor roja te se čestice primiču području optimalnih rješenja. Na tom putu čestica može postići najveću podudarnu vrijednost koja se definira kao individualna najbolja vrijednost i za nju vrijedi

$$X_i^*(j) = [x_{i1}^*(j), x_{i2}^*(j), \dots, x_{in}^*(j)] \quad (3-62)$$

gdje je

$x_{i1}^*(j), x_{i2}^*(j), \dots, x_{in}^*(j)$  - najbolje vrijednosti  $i$ -te čestice u  $j$ -toj dimenziji

dok je globalna najveća vrijednost definirana izrazom (3-63)

$$X_i^{**}(j) = [x_{i1}^{**}(j), x_{i2}^{**}(j), \dots, x_{in}^{**}(j)] \quad (3-63)$$

gdje je

$x_{i1}^{**}(j), x_{i2}^{**}(j), \dots, x_{in}^{**}(j)$  - globalne najbolje vrijednosti  $i$ -te čestice u  $j$ -toj dimenziji.

Ukoliko je ispunjen uvjet da je trenutna vrijednost funkcije cilja u  $k$ -toj iteraciji manja od vrijednosti funkcije cilja individualnog najboljeg položaja

$$f(x_j(k)) < f(x_j^*(k)), \quad (3-64)$$

trenutni položaj postaje individualni najbolji  $x_j^*(k) = x_j(k)$ . Isto pravilo vrijedi i za globalnu najbolju vrijednost.

Unaprjeđenje brzine čestice ovisi o prethodnoj brzini čestice i najboljem položaju čestice.

Metoda za postavljanje i prilagodbu parametara stabilizatora elektromehaničkih oscilacija pomoću pokazatelja kompleksne frekvencijske i vremenske domene

$$v_{i,j}(k+1) = \omega \cdot v_{i,j}(k) + c_1 \cdot r_1 \cdot (x_{i,j}^*(k) - x_{i,j}(k)) + c_2 \cdot r_2 \cdot (x_{i,j}^{**}(k) - x_{i,j}(k)) \quad (3-65)$$

gdje je

$v_{i,j}(k+1)$  - brzina  $i$ -te čestice  $u$   $j$ -toj dimenziji za  $k+1$  iteraciju.

$v_{i,j}(k)$  - brzina  $i$ -te čestice  $u$   $j$ -toj dimenziji za  $k$ -tu iteraciju

$x_{i,j}^*(k)$  - najbolji individualni položaj  $i$ -te čestice  $u$   $j$ -toj dimenziji za  $k$ -tu iteraciju

$x_{i,j}(k)$  - položaj  $i$ -te čestice  $u$   $j$ -toj dimenziji za  $k$ -tu iteraciju

$x_{i,j}^{**}(k)$  - najbolji globalni položaj  $i$ -te čestice  $u$   $j$ -toj dimenziji za  $k$ -tu iteraciju

$\omega$  - težinski koeficijent inercije koji daje ovisnost prethodne brine na trenutnu brzinu čestice

$c_1$  - koeficijent ubrzanja koji pokazuje sklonost čestice da se približi prema svojem najboljem položaju

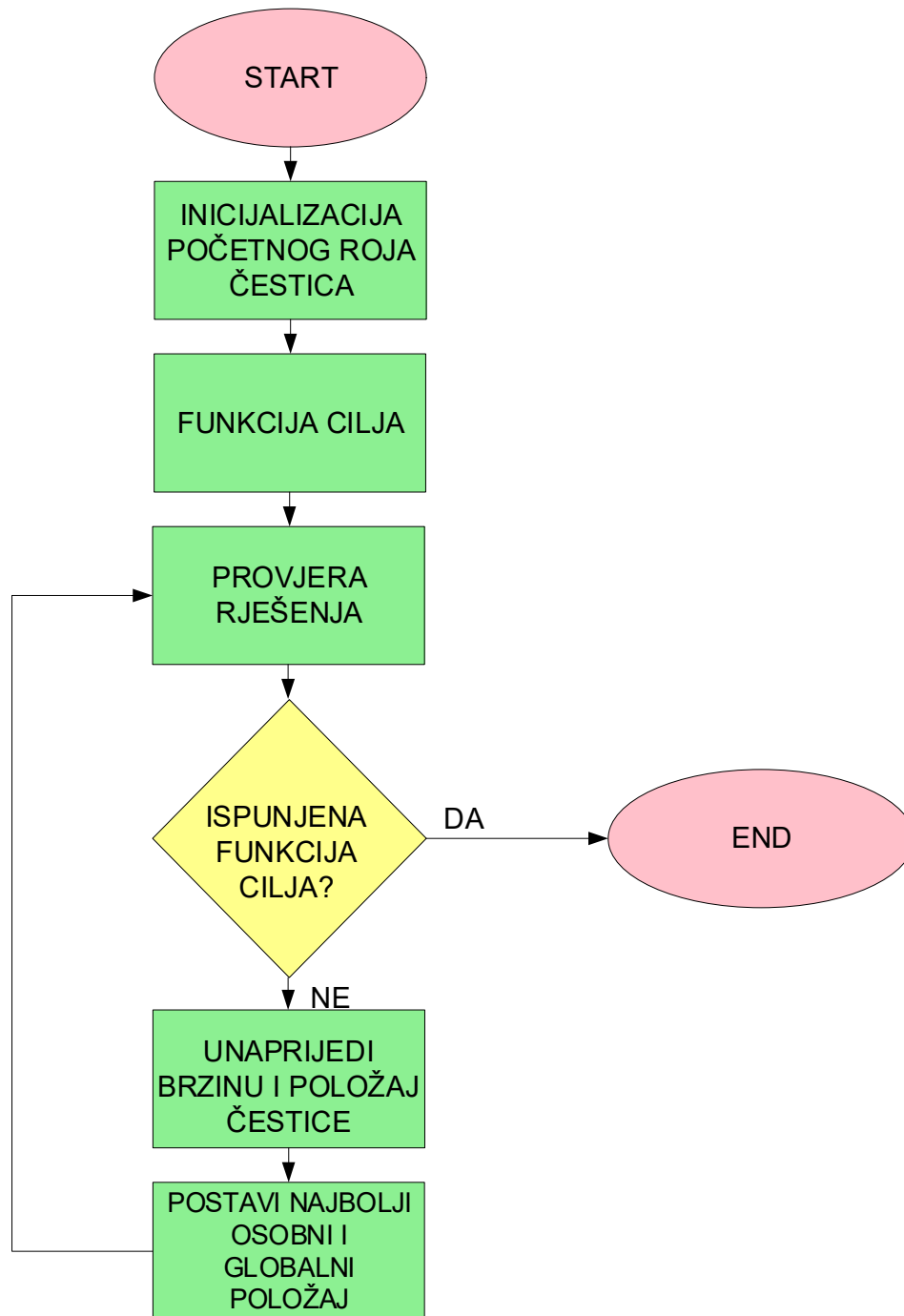
$r_1, r_2$  - nasumični brojevi u rasponu (0,1)

$c_2$  - koeficijent ubrzanja koji pokazuje sklonost čestice da se približi prema najboljem položaju cijelog roja.

Prvi dio izraza predstavlja ovisnost brzine o prethodnom položaju. Preko inercijske konstante se definira sposobnost čestice da održi gibanje tokom učinkovitog pretraživanja prostora. Drugi dio izraza predstavlja kognitivnu komponentu koja se pokazuje kao sposobnost čestice da dođe do položaja u kojemu je funkcija cilja ispunjena, korištenjem svoga učenja i memorije. Treći dio se naziva socijalna komponenta je utjecaj roja na promjenu brzine i prilagođavanje okolini. U zadnja dva dijela izraza se dodaje stohastičnost množenjem nasumičnim brojevima (koeficijenti  $r_1, r_2$ ).

#### *Kriterij zaustavljanja i pronalazak optimuma*

Glavni dio procedure optimizacije je pronalazak najbolje vrijednosti. Međutim, u nekom trenutku se proces mora zaustaviti prema zadanom kriteriju. Kriteriji su najčešće pronalazak optimalne vrijednosti ili određeni broj iteracija. Prethodna procedura se može prikazati i grafički. Slikom 3.7. prikazana je pojednostavljena optimizacija metodom roja čestica. Nakon inicijalizacije početnog roja čestica i definiranja funkcije cilja provodi se provjera rješenja. Ukoliko je funkcija cilja ispunjena, rješenje se uzima kao optimalno i procedura se okončava. Ako par funkcija cilja nije ispunjena, unaprijeduju se brzina i položaj čestice te se postavlja novi najbolji osobni i globalni položaj čestice. Nakon toga se ponovno provjeravaju rješenja i provjerava funkcija cilja. Postupak se ponavlja dok god se ne ispuni kriterij zaustavljanja – određeni broj iteracija ili pronalazak optimalnog rješenja.



Slika 3.7 Optimizacija metodom roja čestica

Pored osnovnog algoritma roja čestica, postoje i brojna unaprjeđenja kojima se ubrzava optimizacijski proces ili sprečava zapadanje u područje lokalnog ekstrema.

### 3.2.2 Genetski algoritam

Genetski algoritam je inspiriran procesom prirodne selekcije i evolucije. Jedan je od specifičnih podskupova evolucijskog algoritma koji radi s diskretnim rješenjima i genetskim operatorima, a

Metoda za postavljanje i prilagodbu parametara stabilizatora elektromehaničkih oscilacija pomoću pokazatelja kompleksne frekvencijske i vremenske domene

prvi put je predstavljen u radu [112]. Evolucijski algoritam omogućuje širu primjenu operatora i tehnika evolucije pri pronalasku optimalnog rješenja. Prednost im je rješenje višeciljnih optimizacijskih problema budući da istovremeno obrađuju setove mogućih rješenja i u nekoliko iteracija pri traženju lokalnog optimuma čime se smanjuje mogućnost konvergiranja u području lokalnog ekstrema [107]. Nedostatak evolucijskih algoritama je pak duže vrijeme računanja kao i manja osjetljivost u slučaju da se problem svodi na Pareto setove [107].

Slika 3.8 prikazuje osnovne korake genetskog algoritma, a izrađena je prema literaturi [107], [113]-[116]. Algoritam obuhvaća sljedeće osnovne korake: inicijalizaciju osnovne populacije, provjeru funkcije cilja i funkcije dobrote, reprodukciju populacije, određivanje konačnog rješenja.

#### *Inicijalizacija osnovne populacije*

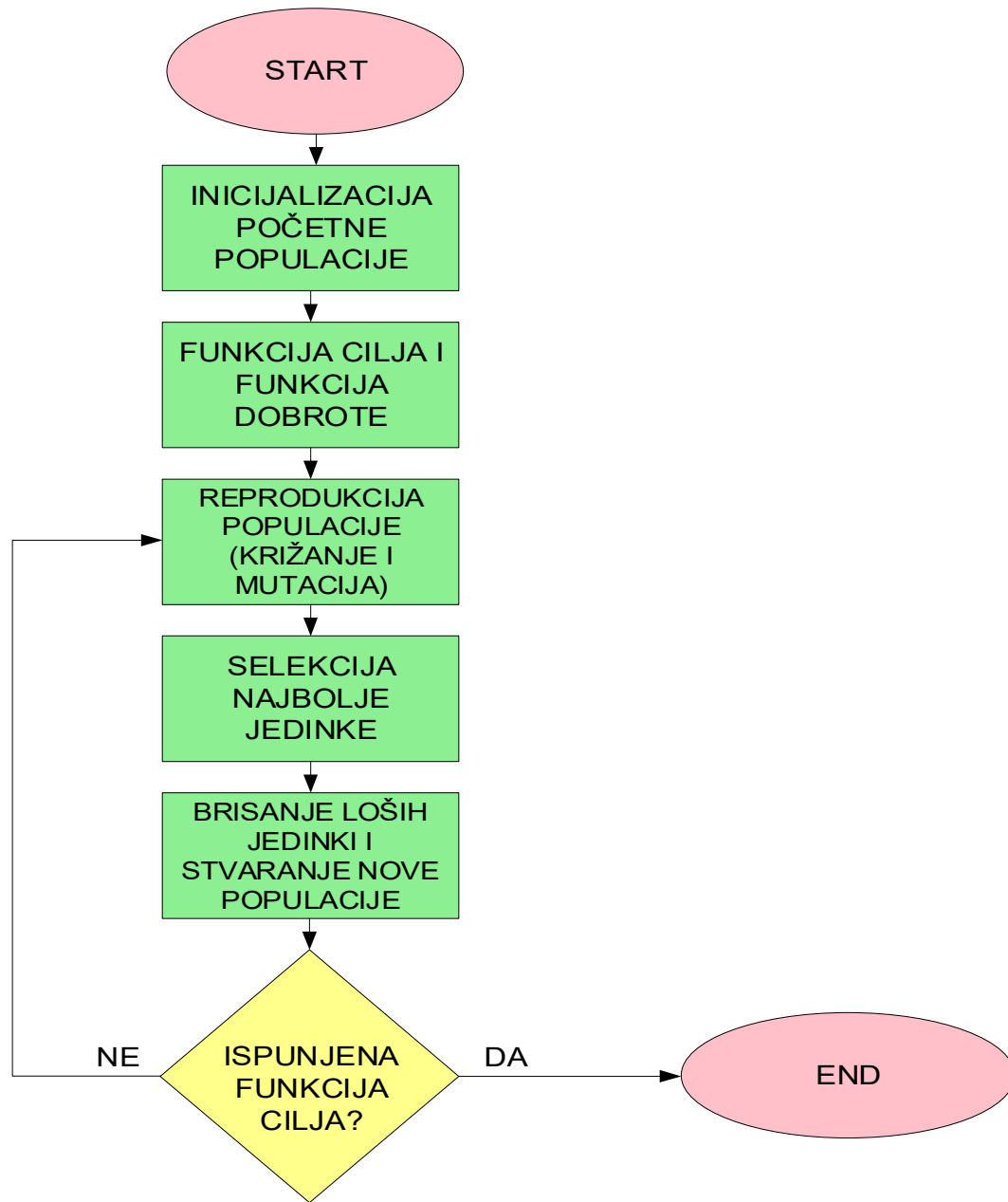
Osnovnu populaciju  $X$  čine nasumično odabrana rješenja  $x$  koja se nazivaju kromosomi i odgovaraju mogućim rješenjima funkcije cilja. Svakom kromosomu je, osim vrijednosti funkcije cilja, pridružena funkcija dobrote (engl. *fitness function*) koja predstavlja odstupanje od funkcije cilja. Sva rješenja se prema svojim vrijednostima klasificiraju te se formira početna populacija  $P_1$ .

Funkcija dobrote procjenjuje kvalitetu potencijalnih rješenja dodjeljujući numeričku vrijednost svakom kromosomu s obzirom na kvalitetu rješenja optimizacijskog problema. Dodjeljivanjem brojčane vrijednosti se proces ubrzava prema boljem rješenju jer se individualna rješenja koriste u daljnjem procesu dok se lošija rješenja u konačnici odbacuju. Definira se prema funkciji cilja tako da predstavlja željene karakteristike rješenja i numeričku vrijednost koliko dobro su one postignute za svako pojedinačno rješenje. Što je veća početna populacija, veći je broj mogućih rješenja. Cilj je očuvati one kromosome koji evoluiraju u vremenu prema najboljem rješenju.

#### *Funkcija cilja i funkcija dobrote*

Prirodno je genetski algoritam usmjeren na odabir najboljih značajki stoga se funkcija cilja pretpostavlja kao pronalazak najveće vrijednosti. Ukoliko je funkcija cilja definirana kao minimizacija, nužno je provesti skaliranje. Također, funkcija dobrote se mora skalirati kako bi se povećala kompetitivnost svakog pojedinog kromosoma. Bez skaliranja funkcije dobrote, inicijalni kromosomi s najvećom funkcijom dobrote bi postali dominantni i preuzeli proces optimizacije vodeći do preuranjene konvergencije na lokalnom ekstremu. Skaliranje se može provesti na nekoliko načina, kako je predloženo u literaturi [113]-[116]. Vrijednost funkcije dobrote je realna vrijednost prikazana binarnim nizom. Kromosom sa višom vrijednošću ima veće šanse za reprodukciju, dok se vrijednosti sa najnižim vrijednostima u konačnici mogu odbaciti.





Slika 3.8 Koraci provođenja genetskog algoritma

### Reprodukcija kromosoma

Nakon što je formirana početna populacija te svakom kromosomu dodijeljena vrijednost, evaluira se svaka kombinacija. Roditeljski geni se reproduciraju na dva načina: reprodukcijom ili mutacijom. Ovaj korak je bitan i predstavlja najvažniji dio algoritma budući da se u njemu definira nova populacija i radi selekcija najboljih rješenja. U reprodukciji se uzimaju po dva kromosoma  $x$  i  $y$  (roditelji) iz početne populacije  $P_1$  sa najvećom vrijednošću funkcije dobrote te se njihovi geni kombiniraju. Kombinacija gena daje potomka sa najboljom mogućom kombinacijom gena roditelja te se dodaju u novu populaciju  $Q$ . Drugi način reprodukcije je mutacijom pojedinačnog

Metoda za postavljanje i prilagodbu parametara stabilizatora elektromehaničkih oscilacija pomoću pokazatelja kompleksne frekvencijske i vremenske domene

kromosoma. Mutacijom se mijenja jedan ili više gena ili cijeli kromosom. Na taj način se iz postojećih rješenja unosi raznolikost u rješenja i povećava prostor pretraživanja mogućih rješenja. Broj mutacija se definira koeficijentom mutacije, a rješenja se također dodjeljuju u populaciju  $Q_t$ .

#### *Selekcija*

Reprodukcija gena dovodi do stvaranja novih rješenja. Međutim, nova rješenja ne moraju biti nužno dobra. Svim novim kromosomima se određuje vrijednost i pridjeljuje funkcija dobrote. Na taj način se provodi inicijalna selekcija u kojoj se najlošija rješenja populacije  $Q_t$  odbacuju, a najbolja se prebacuju u novu populaciju  $P_{t+1}$ .

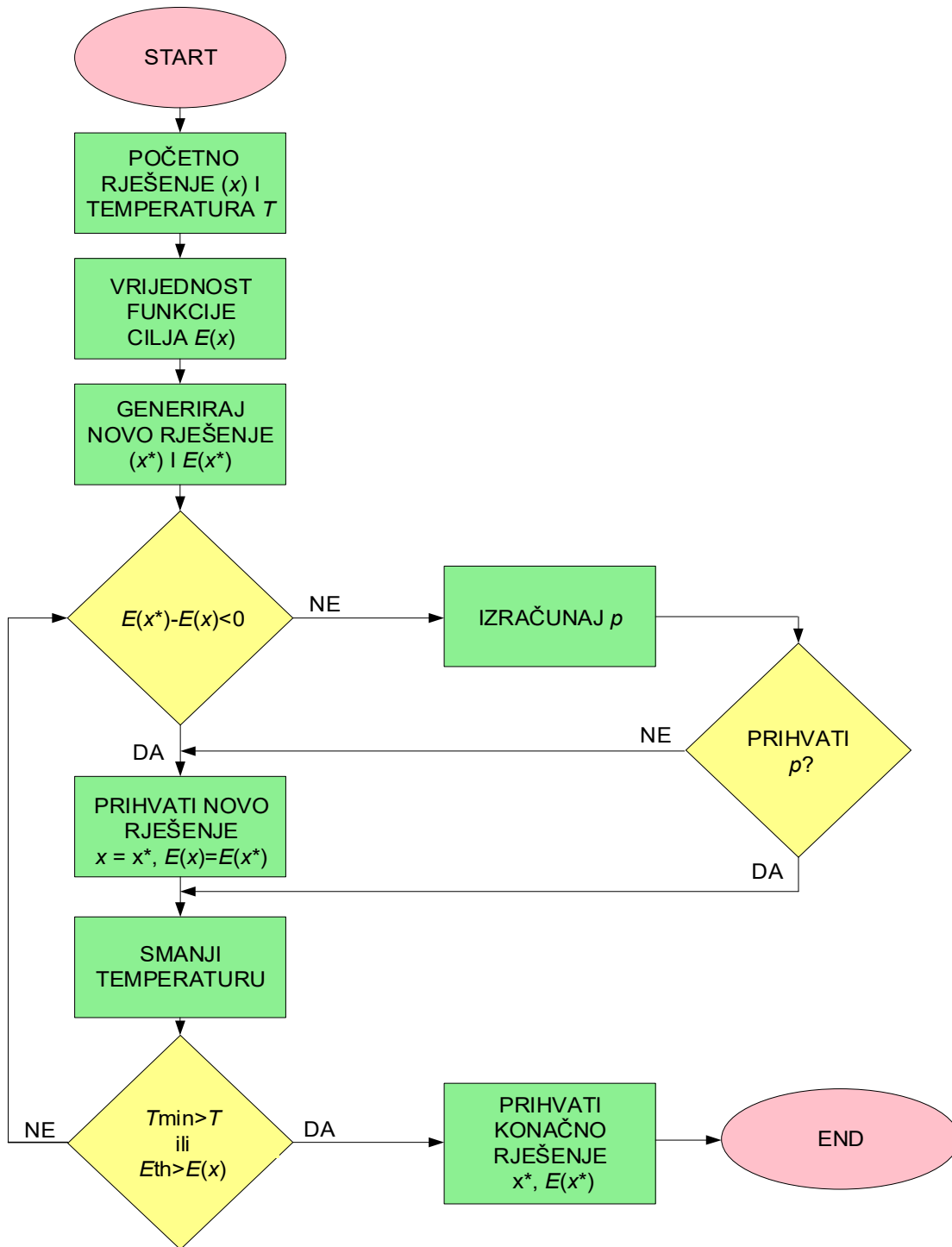
#### *Pronalazak najboljeg rješenja*

Provođenjem prethodnih koraka dolazi se do konačnog rješenja koje ispunjava sve postavljene uvjete postavljene funkcijom cilja. Ako postoji jedinka koja je ispunila uvjet, ona predstavlja konačno rješenje. Ako pak uvjet nije ispunjen, procedura se ponavlja od koraka reprodukcije dok god se ne dobije konačno rješenje.

### 3.2.3 Simulirano kaljenje

Simulirano kaljenje je optimizacijska metoda inspirirana metalurškim postupkom kaljenja. Kaljenje je postupak koji se provodi u cilju poboljšanja kvalitete materijala tako što se kruti materijal otopi na dovoljno visokoj temperaturi i nakon toga postupno i sporo hladi uz određeno zadržavanje na svakom koraku kako bi se osigurala termalna ravnoteža. Atomi metala čine kristalnu rešetku i raspoređeni su tako da imaju minimalnu energiju. U tekućem stanju se čestice raspoređuju nasumično, a sporim hlađenjem će zauzeti položaj koji će ih dovesti u stanje najmanje energije i poboljšanih svojstava u odnosu na stanje prije topljenja. Što je temperatura viša, a vrijeme hlađenja duže, proces je učinkovitiji.

Metoda simuliranog kaljenja je pogodna za nelinearne i stohastične funkcije jer sigurno pronalazi optimalno rješenje. Za svaki pojedinačni slučaj je potrebna prilagodba parametara, a rješenje ne ovisi o postavljenim početnim uvjetima jer proces optimizacije može početi u bilo kojim rješenjem koje se nadograđuje i u konačnici dolazi do optimalne vrijednosti [107]. Procedura se prema literaturi [107], [117]-[122] provodi u sljedećim koracima (slika 3.9): postavljanje početnih rješenja, definiranje parametara koji kontroliraju tijek algoritma (npr. temperaturni parametri), generiranje novih rješenja i računanje funkcije cilja, prihvaćanje rješenja ako je uvjet ispunjen ili njegovo unaprjeđenje, smanjenje temperature i ponavljanje procedure dok se ne ispuni kriterij zaustavljanja procedure.



Slika 3.9 Algoritam simuliranog kaljenja

#### Inicijalizacija početnih rješenja

Početna rješenja ovise o tipu funkcije koja se optimira i generira se na nekoliko različitih načina. Način inicijalizacije može biti generiranjem nasumičnih rješenja unutar zadanih ograničenja ili odabirom rješenja koja zadovoljavaju rješenje optimizacijskog problema, korištenjem drugih

Metoda za postavljanje i prilagodbu parametara stabilizatora elektromehaničkih oscilacija pomoću pokazatelja kompleksne frekvencijske i vremenske domene

heurističkih metoda koje ne dovode do konvergencije rezultata, zadnjim poznatim rješenjem ili skupom rješenja koja se nalaze unutar točno određene domene u okolici optimuma. Osim početnih rješenja, ključnu ulogu u optimizacijskom procesu igraju temperaturni parametri.

Osnovni temperaturni parametar je početna temperatura koja mora biti dovoljno visoka kako bi se osiguralo veće područje pretraživanja u području rješenja. Budući da se temperatura postupno snižava, veća vrijednost temperature znači da će i očekivane vrijednosti biti šire raspoređene. Smanjenje temperature se provodi u koracima nazvanim plan hlađenja koji se može definirati linearnim, eksponencijalnim ili geometrijskim smanjenjem, kako je predloženo u [107], a ovisno kojim tipom funkcije je predstavljena funkcija ovisnosti vrijednosti funkcije cilja  $E_i$ . Izbor plana hlađenja ujedno definira brzinu kojim će rješenje konvergirati i koliko će se područje rješenja pretražiti. Tokom procesa se temperatura može prilagođavati čime se utječe na kvalitetu i brzinu određivanja optimalne vrijednosti, a prilikom generiranja početnih rješenja početna temperatura se postavlja tako da sva rješenja imaju vjerojatnost blizu 1.

#### *Generiranje novih rješenja i računanje funkcije cilja*

U svakoj heurističkoj metodi se početna rješenja moraju unaprijediti kako bi se dostigao optimum koji se traži. Metoda simuliranog kaljenja u koraku generiranja novih rješenja kreće od trenutnih rješenja koja se unaprjeđuju malim nasumičnim perturbacijama čime se proširuje područje pretraživanja mogućih rješenja. Nove kombinacije se dobiju malim promjenama vrijednosti jedne ili više varijabli, zamjenom varijabli ili dodavanjem elemenata u skup rješenja ili pak stvaranjem novih rješenja ispitivanjem susjednih rješenja. Pri pretrazi novih rješenja se mora dopustiti nasumičnost rješenja kako bi se pretražio cijeli prostor rješenja. Novo rješenje,  $x^*$  se uvrštava u funkciju cilja, odnosno određuje se vrijednost  $E(x^*)$  koja predstavlja energiju sustava za generirano rješenje.

#### *Kriterij prihvaćanja rješenja*

U svim optimizacijskim metodama ključni dio procedure je iterativni postupak kojim se dolazi do konačnog rješenja. U metodi simuliranog kaljenja se iterativna metoda svodi na generiranje rješenja, susjednih rješenja i računanja njihove energije. Za svako rješenje se računa razlika prethodnog  $E(x)$  i novog rješenja  $E(x^*)$

$$\Delta E = E(x^*) - E(x) \quad (3-66)$$

Ako je razlika veća od nule, odnosno rješenje je lošije od prethodnog provodi se izračun vjerojatnost prihvaćanja rješenja

$$p = e^{-\frac{\Delta E}{C_p \cdot T}} \quad (3-67)$$

gdje je

Metoda za postavljanje i prilagodbu parametara stabilizatora elektromehaničkih oscilacija pomoću pokazatelja kompleksne frekvencijske i vremenske domene

$C_p$  - koeficijent skaliranja koji ukazuje na dozvoljenu nasumičnost rješenja

$T$  - temperatura

Koeficijent  $C_p$  ukazuje na to kolika će biti vjerojatnost prihvatanja lošijih rješenja, niža vrijednost ukazuje na manju vjerojatnost prihvatanja i ujedno šire područje pretrage mogućih rješenja. Viša vrijednost će značiti traženje rješenja u širem području vrijednosti i manju vjerojatnost zapadanja u lokalni optimum.

Izrazom (3-67) se definira vjerojatnost prihvatanja rezultata. Ako uvjet nije ispunjen, prihvaća se novo rješenje  $x=x^*$  i vrijednost funkcije cilja  $E(x)=E(x^*)$  i prelazi na sljedeći korak koji je isti kao kada je uvjet ispunjen, a to je korak smanjenja temperature.

*Smanjenje temperature i planovi hlađenja*

Nakon što je novo rješenje prihvaćeno ili unaprijeđeno, potrebno je smanjiti temperaturu kako bi se dodatno proširilo područje mogućih rješenja. Ovaj dio algoritma predstavlja ključni dio jer se njime utječe na mogućnost prihvatanja lošijih rješenja. Ukoliko je plan hlađenja dobro postavljen, postiže se brža konvergencija rješenja budući da se postavlja dobar odnos između pretraživanja postojećeg područja i širenja u nova područja. Pretraživanje postojećeg područja dovodi do brže konvergencije, ali se ujedno može dobiti rezultat koji je zapravo lokalni, a ne globalni optimum. Plan hlađenja se treba prilagoditi optimizacijskom problemu, a njegova brzina će utjecati i na brzinu optimizacije. Koriste se linearni, eksponencijalni, logaritamski ili prilagođeni plan. Razlika u planovima je način definiranja opadanja temperature - linearno, eksponencijalno ili logaritamski. Prilagođeni ili adaptivni plan je dinamičan sa zakonitostima hlađenja koje se postavljaju o tijeku optimizacije, odnosno pokazateljima koji se dobiju tokom provođenja algoritma, najčešće vjerojatnosti prihvatanja lošijih rješenja ili broju iteracija u kojima nije bilo značajnog unaprjeđenja vrijednosti. Svaki od planova ima prednosti i nedostatke koji se očituju kao brzina konvergencije, područje pretraživanja, omjer pretraživanja i istraživanja, predvidljivost rješenja ili toka.

*Kriterij zaustavljanja*

Kriterij zaustavljanja se definira po broju ponovljenih iteracija ili prema dostignutoj temperaturi. Ukoliko se gleda uvjet temperature, algoritam se zaustavlja kad se dosegne minimalna temperatura nakon čega se kao konačno rješenje prihvaća najbolje trenutno  $x^*$  sa vrijednošću funkcije cilja  $E(x^*)$ . Također, postavlja se drugi uvjet, a to je minimum energije. Naime, algoritam se može zaustaviti kada se postigne minimum energije za postavljenu konfiguraciju. Za ovaj uvjet se uzima konačno rješenje sa njegovom vrijednošću funkcije cilja nakon čega se završava algoritam koji kao rezultat daje optimalnu vrijednost traženog parametra.

### 3.2.4 Tabu pretraživanje

Metoda tabu pretraživanja spada u metode koje se temelje na pamćenju, na pronalaženju optimalnog rješenja uz izbjegavanje zapinjanja u lokalnim ekstremima. Pamćenje metode se provodi izradom liste zabranjenih stanja, tzv. tabu liste na kojoj se nalaze rješenja koja su tokom pretrage odbačena kao nedovoljno dobra u prethodnim koracima i u daljnjem pretraživanju se ne mogu pojaviti kao konačna rješenja. Metoda uključuje nekoliko koraka: inicijalizacije početnih uvjeta i rješenja, određivanja vrijednosti funkcije cilja i usporedba s vrijednostima tabu liste, provjera uvjeta aspiracije, prihvaćanje najboljeg rješenja ili ponavljanje postupka. Dijagram toka izrađen prema literaturi [107], [123]-[127] prikazan je slikom 3.10, a koraci su objašnjeni u nastavku.

#### *Inicijalizacija početnih rješenja i uvjeta*

Tabu pretraživanje se temelji na pamćenju sustava koje se organizira kao lista rješenja prethodnih iteracija koja se u daljnjim iteracijama neće često pojavljivati. Lista na početku procedure pretraživanja mora biti prazna. Prvo rješenje koje se pretpostavlja je

$$x \in X \quad (3-68)$$

gdje je

$x$  - trenutno rješenje koje je ujedno i trenutno najbolje rješenje

$X$  - skup mogućih rješenja.

Također, za okolinu točke koja je trenutno rješenje se generira skup rješenja u njezinom susjedstvu, a koji je podskup skupa  $X$ . Rješenja iz susjednog skupa su generirana malim modifikacijama trenutnog rješenja i odabrana na temelju vrijednosti funkcije cilja. Inicijalizacija i modifikacije mogu biti nasumični ili na temelju određenog skupa pravila, na primjer rješenja koje je dobiveno drugom metodom. Generirana rješenja se sortiraju na listu po kriteriju koji je zadan, najčešće od najviše k najnižoj vrijednosti i pri pretraživanju se mora ispitati cijela lista.

#### *Određivanja vrijednosti funkcije cilja*

Kvaliteta potencijalnih rješenja se mora ispitati i usporediti kako bi se pronašao optimum funkcije. Kriterij usporedbe je određivanje vrijednosti funkcije cilja za svako moguće rješenje,  $E(x)$ . Vrijednost za koju se provjerava funkcija cilja se može označiti kao  $x^*$  te se provjerava uvjet

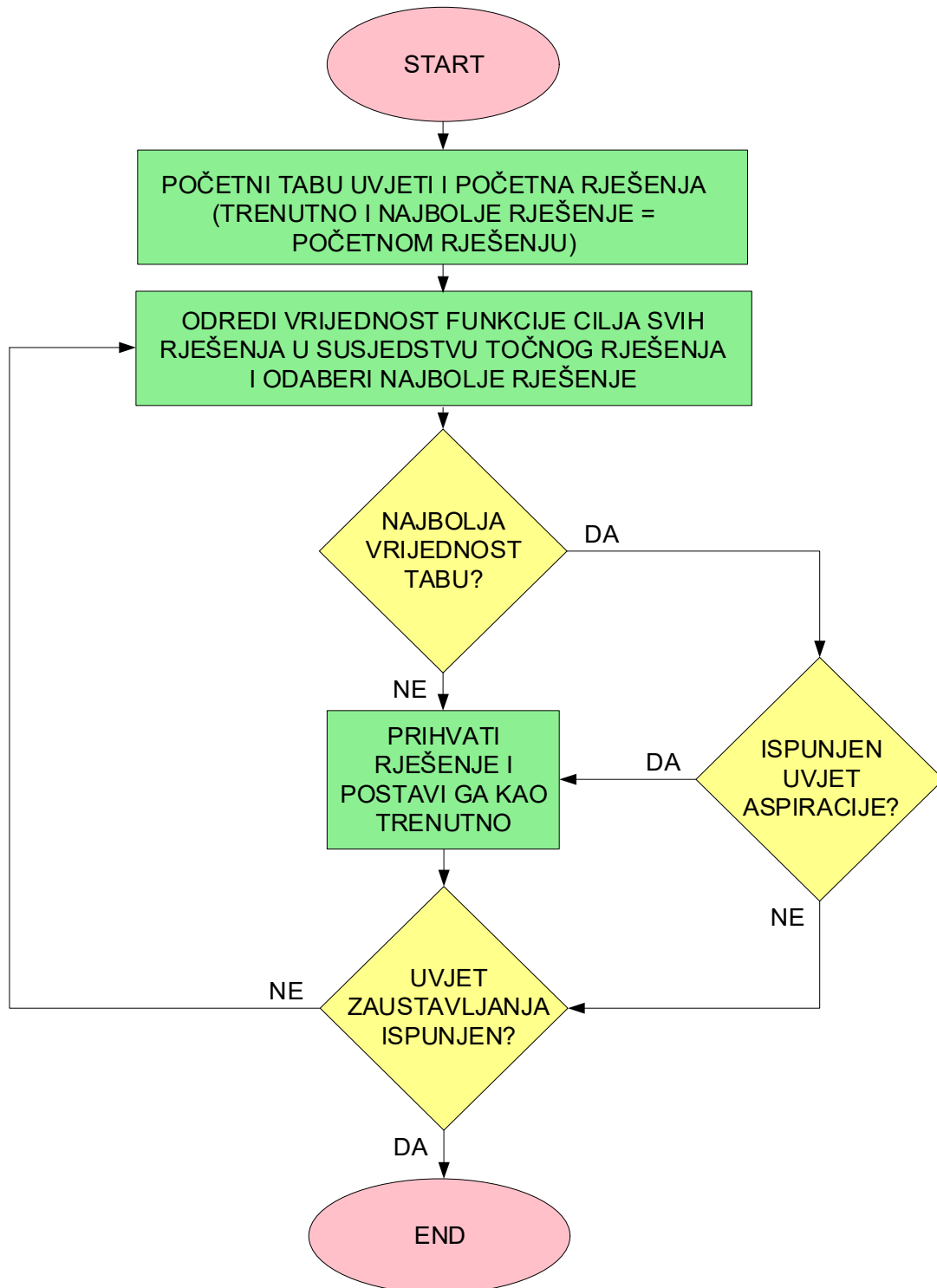
$$E(x) > E(x^*) \quad (3-69)$$

Ako je uvjet ispunjen,  $x^*$  se uzima kao novo najbolje rješenje i provjerava se je li ispunjen tabu uvjet. Ispunjenje tabu uvjeta određuje hoće li se i dalje pretraživati susjedstvo (ako je trenutno rješenje na tabu listi, generira se nova lista susjedstva). Ukoliko rješenje nije na tabu listi, provjerava se test aspiracije i prihvaća rješenje.

#### *Tabu uvjeti i provjera testa aspiracije*

Metoda za postavljanje i prilagodbu parametara stabilizatora elektromehaničkih oscilacija pomoću pokazatelja kompleksne frekvencijske i vremenske domene

Tabu listom se izbjegavaju rješenja određena lokalnim ekstremom. Iako se rješenja na listi smatraju onima koja su odbačena, nakon određenog broja ponavljanja, ona opet mogu doći u razmatranje. Ograničenje liste može biti zadavanjem vrijednosti varijabli ili setom jednadžbi [107].



Slika 3.10 Dijagram toka tabu pretraživanja

Rješenje s tabu liste također može biti uklonjeno ako je vrijednost funkcije cilja takve vrijednosti da se može smatrati dovoljno dobrim rješenjem. Test kojim se provjerava vrijednost se naziva test aspiracije.

Provjera uvjeta tabu liste se provjerava za rješenje  $x^*$  tako što se prvo uspoređuje s vrijednostima na listi. Ukoliko se ne nalazi na listi, uzima se kao trenutno rješenje,  $x^* = x$ . Ako ne postoji više potencijalnih rješenja i uz ispunjen kriterij zaustavljanja, rješenje je konačno i optimizacijska procedura završava. Ako je pak rješenje na tabu listi, provodi se test aspiracije kako bi se utvrdilo može li biti prihvaćeno kao konačno rješenje. Za ispunjen aspiracijski uvjet, rješenje se prihvaća, u suprotnom se procedura ponavlja dok se ili ne pronađe novo najbolje rješenje ili se ne ispuni kriterij zaustavljanja procedure.

#### *Kriteriji zaustavljanja procedure pretraživanja*

Kriterij pretraživanja se može postaviti na više načina, od koji su dva najčešće - ispunjen uvjet pronalaska najboljeg rješenja ili određeni broj iteracija. Ako se uzima broj iteracija, konačni rezultat ne mora biti nužno i optimalni budući da se procedura prekida bez obzira je li rješenje odabrano ili nije. Kriterij zaustavljanja koji uzima u obzir konačno rješenje se za tabu pretragu zaustavlja kada su ispitana sva moguća rješenja u susjedstvu početnog rješenja. S obzirom da se rješenja sortiraju, uvjet zaustavljanja može biti završen tek kada je cijela lista pretražena.

Za sve četiri predložene metode optimizacije se može uočiti da konačno rješenje ovisi o dva važna skupa podataka: početnoj populaciji unutar koje se traži rješenje i kriteriju vođenja algoritma. Odabir početne populacije utječe na područje unutar kojeg se nalazi optimalno rješenje te se samim time algoritam može ograničiti na područje lokalnog ekstrema koji nužno ne predstavlja najbolje rješenje. Problem je posebno izražen za funkcije koje imaju više lokalnih ekstrema te se sužavanjem područja početne populacije (mogućih početnih rješenja) usmjerava prema potencijalno lošijim parametrima. Također, drugi kriteriji mogu značajno poremetiti proces optimizacije, a to su broj iteracija zbog čega je potrebno pratiti tok konvergencije rješenja, kao i parametre koji utječu na brzinu iterativnog postupka. U optimizaciji korištenjem genetskog algoritma su to pokazatelji mutacije, kod roja čestica koeficijenti ubrzanja, u simuliranom kaljenju pak odabir početne brzine plana hlađenja. Dobrim odabirom početnih uvjeta pri inicijalizaciji procedure te iskustvenim metodama se mogu dobiti rješenja koja će dovesti do poboljšanja dinamičkih svojstava sustava.



## 4 Parametriranje stabilizatora i ispitivanje na višestrojnom sustavu

U ovom poglavlju dan je opis testnog sustava te rezultati analitičke i optimizacijske metode odabira parametara PSS-a. U šest scenarija, za različito vrijeme poremećaja i konfiguraciju sustava su odabrane postavke te su rezultati analitičke i optimizacijskih metoda međusobno uspoređeni. Poglavlje donosi treći doprinos „Proširenje primjene razvijene analitičke metode za postavljanje i prilagodbu parametara stabilizatora elektromehaničkih oscilacija u višestrojnom elektroenergetskom sustavu u odnosu na jednostrojne testne sustave" i „Kvantitativna evaluacija razvijene metode za postavljanje i prilagodbu parametara stabilizatora elektromehaničkih oscilacija u odnosu na postojeće metode mekog računarstva".

### 4.1 Opis testnog sustava sa 14 sabirnica

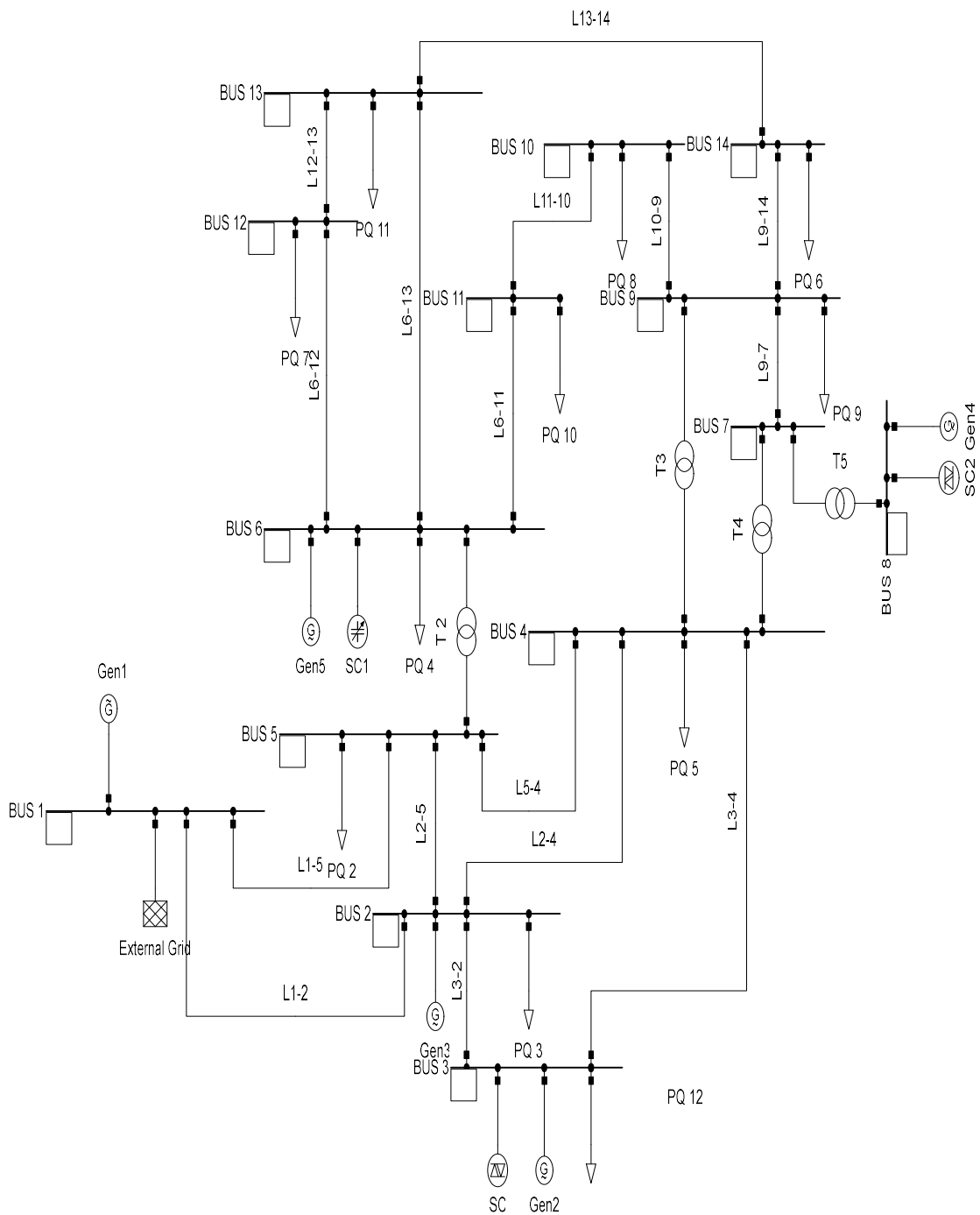
Parametriranje PSS-a provedeno je na standardnom testnom IEEE sustavu sa 14 sabirnica (slika 4.1). Sustav predstavlja dio prijenosne i distribucijske mreže naponskih razina 69 kV, 18 kV i 13.8 kV. Sastoji se od 14 sabirnica i pet generatora što ga čini modelom višestrojnog sustava.

Sustav je modificiran tako da su pored tri kompenzatora, na sabirnicama 3, 6 i 8 ugrađeni i sinkroni generatori. Uloga statičkih kompenzacijskih uređaja je održavanje napona sabirnica unutar željenih granica, podaci su dani tablicom 4.1.

Tablica 4.1 Podaci statičkih kompenzatora

	SC	SC1	SC2
Lokacija	Bus 3	Bus 6	Bus 8
Nazivna snaga, $S_n$ [MVA]	100	100	100
Maksimalna jalova snaga, $Q_{\max}$ [p.u.]	0.24	0.4	0.24
Minimalna jalova snaga, $Q_{\min}$ [p.u.]	-0.06	0	-0.06
Maksimalni napon, $V_{\max}$ [p.u.]	1.2	1.2	1.2
Minimalni napon, $V_{\min}$ [p.u.]	0.8	0.8	0.8

Najveći je generator Gen1 s djelatnom snagom 450 MW (prividna snaga 615 MVA), generatori Gen2 i Gen3 imaju snagu 40 MW, a generatori Gen4 i Gen5 rade s djelatnom snagom 23.5 MW. Ostali podaci generatora dani su u tablici 4.2. U scenarijima 5 i 6 je dio sinkronih generatora isključen i nadomješten obnovljivim izvorom energije spojenim preko invertera.



Slika 4.1 Standardni IEEE 14 bus system u Power Factory sučelju

Tablica 4.2 Podaci generatora

	G1	G2	G3	G4	G5
Lokacija	Bus 1	Bus 3	Bus 2	Bus 6	Bus 8
$S_n$ [MVA]	615	60	60	25	25
$U_n$ [kV]	69	69	69	18	13.8
$V_{set}$ [p.u.]	1	1.01	1.045	1.09	1.07
$r_{str}$ [p.u.]	0	0.0031	0.0031	0.0014	0.0014
$x_d$ [p.u.]	0.8979	1.05	1.05	1.25	1.25
$x_q$	0.646	0.98	0.98	1.22	1.22
$x_d'$ [p.u.]	0.2998	0.185	0.185	0.232	0.232
$x_q'$ [p.u.]	0.646	0.36	0.36	0.715	0.715
$x_d''$ [p.u.]	0.23	0.13	0.13	0.12	0.12
$x_q''$ [p.u.]	0.4	0.13	0.13	0.12	0.12
$T_d'$ [s]	2.470788	1.074762	1.074762	0.8816	0.8816
$T_{d0}'$ [s]	7.4	6.1	6.1	4.75	4.75
$T_{q0}'$ [s]	0	0.099	0.099	1.5	1.5
$T_d''$ [s]	0.02301534	0.02810811	0.02810811	0.03103448	0.03103448
$T_{d0}''$ [s]	0.03	0.04	0.04	0.06	0.06
$T_{q0}''$ [s]	0.003	0.099	0.099	0.21	0.21
$H$ (rtd to $S_{gn}$ ) [s]	5.148	6.54	6.54	5.06	5.06
$P$ [MW]	450	40	40	23.5	23.5
$Q$ [Mvar]	100	0	0	0	0
Tip generatora	Hidro	Turbo	Turbo	Turbo	Turbo

Generatori su modelirani kao sustav trećeg reda sa dinamičkim modelom uzbude, a svi generatori su opremljeni AVR-om, čiji su podaci dani u tablici 4.3. AVR je standardni IEEE model s parametrima postavljenim preporukama navedenim u IEEE standardu za uzbudne krugove [3]. Pojačanje AVR je najveće za generator G1, najveći generator u sustavu. Osim AVR-a na jedan generator u sustavu je ugrađen PSS, čija lokacija i parametriranje je napravljeno sukladno predloženoj metodologiji.

Tablica 4.3 Podaci automatskih regulatora napona

	G1	G2	G3	G4	G5
Kašnjenje mjerenja, $T_f$ [s]	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Pojačanje kontrolera, $K_a$ [p.u.]	200	20	20	20	20
Vremenska konstanta kontrolera, $T_a$ [p.u.]	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Konstanta uzbude, $K_e$ [p.u.]	1	1	1	1	1
Vremenska konstanta uzbude, $T_e$ [s]	0.2	1.98	1.98	0.7	0.7
Pojačanje stabilizacijske staze, $K_f$ [p.u.]	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001
Vremenska konstanta stabilizacijske staze, $T_f$ [s]	1	1	1	1	1
Faktor zasićenja, $E_1$ [p.u.]	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9
Faktor zasićenja, $S_{e1}$ [p.u.]	0.0195	0.0195	0.0195	0.0195	0.0195
Faktor zasićenja, $E_2$ [p.u.]	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2
Faktor zasićenja, $S_{e2}$ [p.u.]	0.0641	0.0641	0.0641	0.0641	0.0641
Min. izlazni napon, $V_{rmin}$ [p.u.]	0	0	0	1.395	1.395
Max. izlazni napon, $V_{wmax}$ [p.u.]	7.2	4.38	4.38	6.81	6.81

Osim navedenih elemenata u mreži se nalaze četiri transformatora snage 100 MVA (podaci su dani tablicom 4.4) prijenosnih omjera 69/13.8 kV, odnosno 18/13.6 kV.

Tablica 4.4 Podaci transformatora

	T2	T3	T4	T5
Lokacija	Bus 5 – Bus 6	Bus 4 – Bus 9	Bus 4 – Bus 7	Bus 8 – Bus 7
Snaga, $S_n$ [MVA]	100	100	100	100
Nazivni napon, $U_1/U_2$ [kV]	69/13.8	69/13.8	69/13.8	18/13.8
Napon kratkog spoja, $u_{k\%}$ [%]	25.202	55.618	20.912	17.615

Za povezivanje elemenata sustava koristi se osam prijenosnih vodova i osam kabela sa podacima prikazanim u tablici 4.5. Kabeli su korišteni za povezivanje naponskih razina 13.8 kV dok su nadzemni vodovi za povezivanje prijenosne mreže napona 69 kV.

Tablica 4.5 Podaci o vodovima i kabelima

	Tip	Nazivna struja, $I_n$ [kA]	Djelatni otpor, $R$ [ $\Omega$ ]	Reaktancija, $X$ [ $\Omega$ ]	Nazivni napon, $U_n$ [kV]
L1-2	Vod	0.837	0.922	2.812	69
L1-5	Vod	0.837	2.5724	10.619	69
L10-9	Kabel	4.18	0.06058	0.161	13.8
L11-10	Kabel	4.18	0.1562	0.366	13.8
L12-13	Kabel	4.18	0.4207	0.381	13.8
L13-14	Kabel	4.18	0.3255	0.6628	13.8
L2-4	Vod	0.837	2.767	8.394	69
L2-5	Vod	0.837	2.7114	8.278	69
L3-2	Vod	0.837	2.2372	9.425	69
L3-4	Vod	0.837	3.1903	8.14	69
L5-4	Vod	0.837	0.6356	2.005	69
L6-11	Kabel	4.18	0.1809	0.379	13.8
L6-12	Vod	0.837	0.2341	0.487	13.8
L6-13	Kabel	4.18	0.12598	0.248	13.8
L9-14	Kabel	4.18	0.2421	0.515	13.8
L9-7	Kabel	4.18	0	0.2095	13.8

U mreži se nalazi 11 potrošača čiji su podaci dani u tablici 4.6. Na sabirnicu 1 je spojena vanjska mreža što predstavlja spoj sa ostatkom elektroenergetskog sustava i definirana je kao referentna.

Tablica 4.6 Snaga potrošača

Potrošač	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Sabirnica	5	2	6	4	14	12	10	9	11	13	3
Djelatna snaga [MW]	7.6	21.7	11.2	47.8	14.9	6.1	9	29.5	3.5	13.5	94.2
Jalova snaga [MVar]	1.6	12.7	7.5	4	5	1.6	5.8	16.6	1.8	5.8	19

## 4.2 Scenariji

Za sve scenarije analiziran je utjecaj malog poremećaja, trofaznog kratkog spoja na sabirnici 4 i za dva različita vremena trajanja kvara. Iako se kratki spoj smatra velikim poremećajem, u ovom slučaju se zbog vremena trajanja i veličine sustava smatra malim poremećajem budući da ne dolazi do prekida napajanja potrošača. Razmatra se ukupno šest scenarija, za različita vremena trajanja kratkog spoja i različite konfiguracije mreže.

*Scenarij 1* – Za višestrojni sustav, IEEE testni sustav sa 14 sabirnica, se provodi modalna analiza i provjerava postoje li niskofrekvencijske oscilacije. Ukoliko postoji, provodi se procedura postavljanja i odabira parametara stabilizatora elektromehaničkih oscilacija prema predloženoj analitičkoj metodi. Promatrani poremećaj je kratki spoj na sabirnici 4 u trajanju 50 ms. Ovaj scenarij je ujedno osnovni te se odabir lokacije, strukture i početnih parametara provodi u odnosu na početne pretpostavke u ovom scenariju.

*Scenarij 2* – Za isti poremećaj i konfiguraciju mreže se provodi procedura postavljanja stabilizatora elektromehaničkih oscilacija i odabir njegovih parametara korištenjem metoda mekog računarstva. Primjenjuju se metoda roja čestica, genetski algoritam, simulirano kaljenje i tabu pretraživanje. Optimizacija se provodi za različite početne uvjete te se analiziraju dobiveni rezultati. Optimalna vrijednost se uspoređuje s analitičkom metodom.

*Scenarij 3* – U trećem scenariju se za osnovni sustav iz Scenarija 1 odabiru parametri ukoliko poremećaj traje 250 ms. Provode se modalna analiza i RMS simulacije s ciljem određivanjem optimalnih vrijednosti parametara stabilizatora elektromehaničkih oscilacija.

*Scenarij 4* – Za isti poremećaj i konfiguraciju mreže kao u scenariju 3 se provodi procedura postavljanja stabilizatora elektromehaničkih oscilacija i odabir njegovih parametara korištenjem metoda mekog računarstva. Optimalna vrijednost dobivena u ovom scenariju se uspoređuje s analitičkom metodom.

*Scenarij 5* – U sustavu su integrirani obnovljivi izvori energije, spojeni preko invertera. Zbog toga se dio generatora (Gen3 i Gen4) isključuje, a generatoru Gen1 se smanjuje snaga kako bi proizvodnja u sustavu ostala jednaka. Trajanje poremećaja je 50 ms, a promatra se kratki spoj na sabirnici 4.

*Scenarij 6* – Za scenarij 6, sustav s visokim udjelom obnovljivih izvora energije, se provodi postavljanje stabilizatora elektromehaničkih oscilacija korištenjem metoda mekog računarstva. Dobiveni rezultati se uspoređuju s rezultatima u scenariju 5.

### 4.3 Rezultati

Parametriranje stabilizatora elektromehaničkih oscilacija se parametrira prema metodologiji predstavljenoj u poglavlju 3. Za višestrojni sustav, u ovom slučaju IEEE testni sustav sa 14 sabirnica i 5 generatora, potrebno je utvrditi postoje li niskofrekvencijske oscilacije i potreba za ugradnjom stabilizatora elektromehaničkih oscilacija. U tu svrhu provodi se modalna analiza sustava i simulacije u vremenskoj domeni.

Rezultati modalne analize prikazani su tablicom 4.7. Promatraju se sljedeći parametri: prigušenje  $\alpha$ , frekvencija prigušenja  $\omega$ , iskazane kao 1/s (odnosno u rad/s) koji ukazuju na postojanje niskofrekvencijskih oscilacija u sustavu. Dodatno se analizira frekvencija te relativni koeficijent prigušenja. Iz rezultata se može zaključiti da postoji ukupno 55 modova, odnosno cijeli sustav se može u potpunosti opisati sa 55 diferencijalnih jednadžbi.

Tablica 4.7 Svojstvene vrijednosti IEEE sustava sa 14 sabirnica bez stabilizatora elektromehaničkih oscilacija

Mod	Prigušenje, $\alpha$ [1/s]	Frekvencija prigušenja, $\omega$ [rad/s]	Frekvencija, Hz	Relativni koeficijent prigušenja, $\zeta$
01	0	0	0	0
02	-0.016645554	0	0	1
03	-0.602911288	8.600128618	1.368753	0.069933
04	-0.602911288	-8.600128618	1.368753	0.069933
05	-0.615577556	0.672422170	0.107019	0.675242
06	-0.615577556	-0.672422170	0.107019	0.675242
07	-0.642830804	0.348936891	0.055535	0.878870
08	-0.642830804	-0.348936891	0.055535	0.878870
09	-0.855531786	0	0	1
10	-0.894942906	0	0	1
11	-1	0	0	1
12	-1	0	0	1
13	-1.000229056	0	0	1
14	-1.002305995	0	0	1
15	-1.004805227	0	0	1
16	-1.008772479	0	0	1
17	-1.092577272	1.344581537	0.213997	0.630629

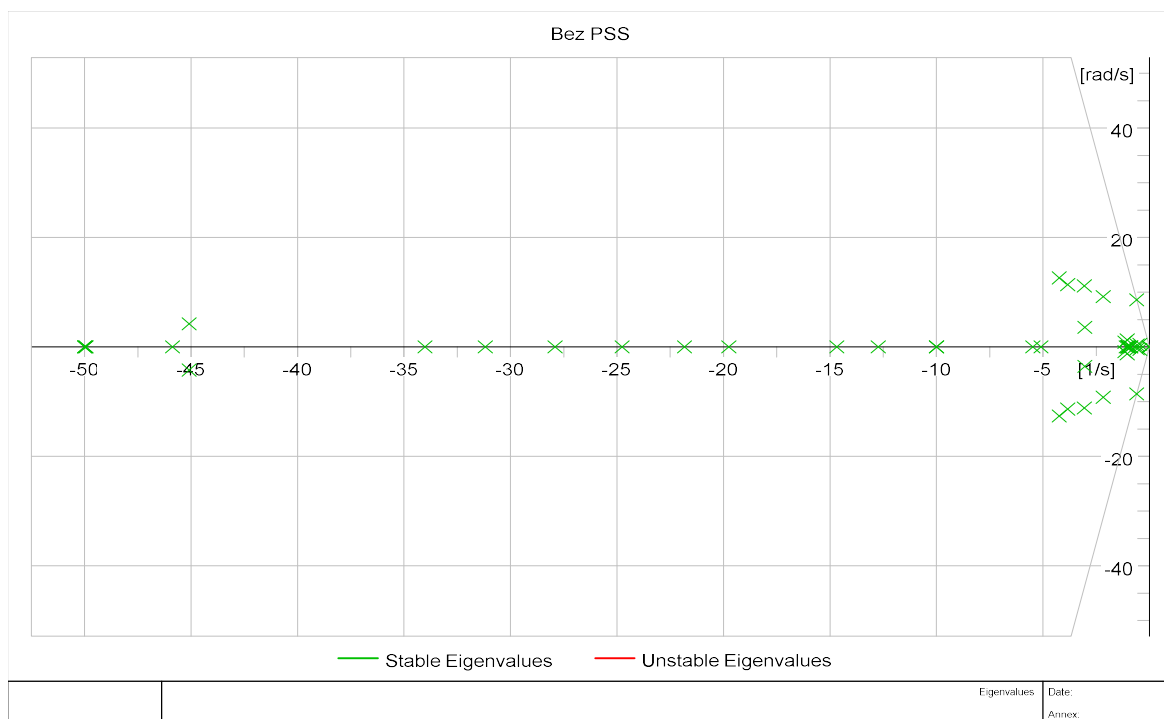
Parametriranje stabilizatora i ispitivanje na višestrojnom sustavu

Mod	Prigušenje, $\alpha$ [1/s]	Frekvencija prigušenja, $\omega$ [rad/s]	Frekvencija, Hz	Relativni koeficijent prigušenja, $\zeta$
18	-1.092577272	-1.344581537	0.213997	0.630629
19	-1.093755631	0	0	1
20	-1.220309039	0.943381035	0.150144	0.791155
21	-1.220309039	-0.943381035	0.150144	0.791155
22	-3.049568063	3.558216391	0.566308	0.650751
23	-3.049568063	-3.558216391	0.566308	0.650751
24	-3.088827589	9.137191440	1.454229	0.320246
25	-3.088827589	-9.13719144	1.454229	0.320246
26	-3.319931887	0	0	1
27	-3.366802131	10.69534373	1.702217	0.300266
28	-3.366802131	-10.69534373	1.702217	0.300266
29	-3.788693564	11.81970982	1.881165	0.305242
30	-3.788693564	-11.81970982	1.881165	0.305242
31	-4.522290947	12.58427938	2.002850	0.338187
32	-4.522290947	-12.58427938	2.002850	0.338187
33	-5.393889253	0	0	1
34	-9.99999712	0	0	1
35	-9.99999806	0	0	1
36	-11.65449002	0	0	1
37	-13.74819725	0	0	1
38	-19.26810953	0	0	1
39	-21.61495998	0	0	1
40	-24.99933097	0	0	1
41	-28.13005554	0	0	1
42	-31.46373199	0	0	1
43	-34.05308609	0	0	1
44	-45.08707785	4.232500947	0.673623	0.995623
45	-45.08707785	-4.232500947	0.673623	0.995623
46	-45.87180314	0	0	1
47	-49.92986212	0	0	1
48	-49.9435486	0	0	1



Mod	Prigušenje, $\alpha$ [1/s]	Frekvencija prigušenja, $\omega$ [rad/s]	Frekvencija, Hz	Relativni koeficijent prigušenja, $\zeta$
49	-49.99273604	0	0	1
50	-49.99721764	0	0	1
51	-999.9999757	0	0	1
52	-999.9999916	0	0	1
53	-1000.000001	0	0	1
54	-1000.000001	0	0	1
55	-1000.000051	0	0	1

Svi modovi se prikazuju u kompleksnoj frekvencijskoj ravni, tzv. krivulji mjesta korijena. U ukupnom broju modova, ističe se 11 kompleksno-konjugiranih parova koji rezultiraju oscilatornom nestabilnošću (slika 4.2). Uzroci tih oscilatornih modova mogu biti različiti - sinkroni generatori, utjecaj ostatka prijenosne mreže ili elementi uzbudnog kruga generatora, o čemu će ovisiti postavke stabilizatora za njihovo otklanjanje ili prigušenje. Frekvencija oscilacija ukazuje na uzroke, a pravilnim parametriranjem stabilizatora za frekvencije lokalnog moda (frekvencija 6-12 rad/s) uspješno će biti prigušene i niže frekvencije karakteristične za niskofrekventni i međupodručni mod. Stoga će se u daljnjoj analizi izdvojiti i dodatno analizirati upravo modovi tog raspona frekvencija.



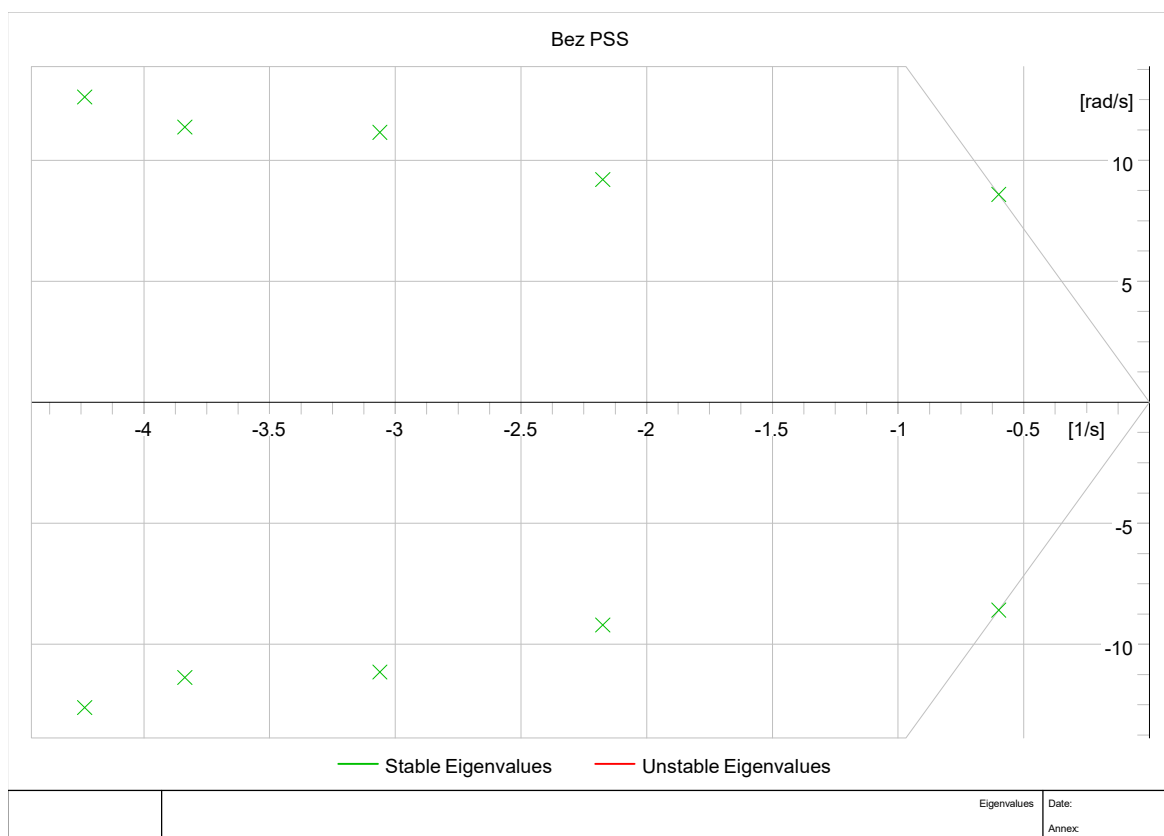
Slika 4.2 Krivulja mjesta korijena za sustav bez stabilizatora elektromehaničkih oscilacija

Kada se izdvoje modovi interesnog raspona frekvencija dođe se do ukupno pet kompleksno-konjugiranih parova prikazanih tablicom. Iz tablice 4.8 se može uočiti da se par modova 3 i 4 sa iznosom prigušenja  $\alpha_{\text{dom}} = -0.602911288$  nalazi najbliže ishodištu i određuju granicu stabilnosti.

Tablica 4.8 Svojstvene vrijednosti lokalnih modova - bez stabilizatora elektromehaničkih oscilacija

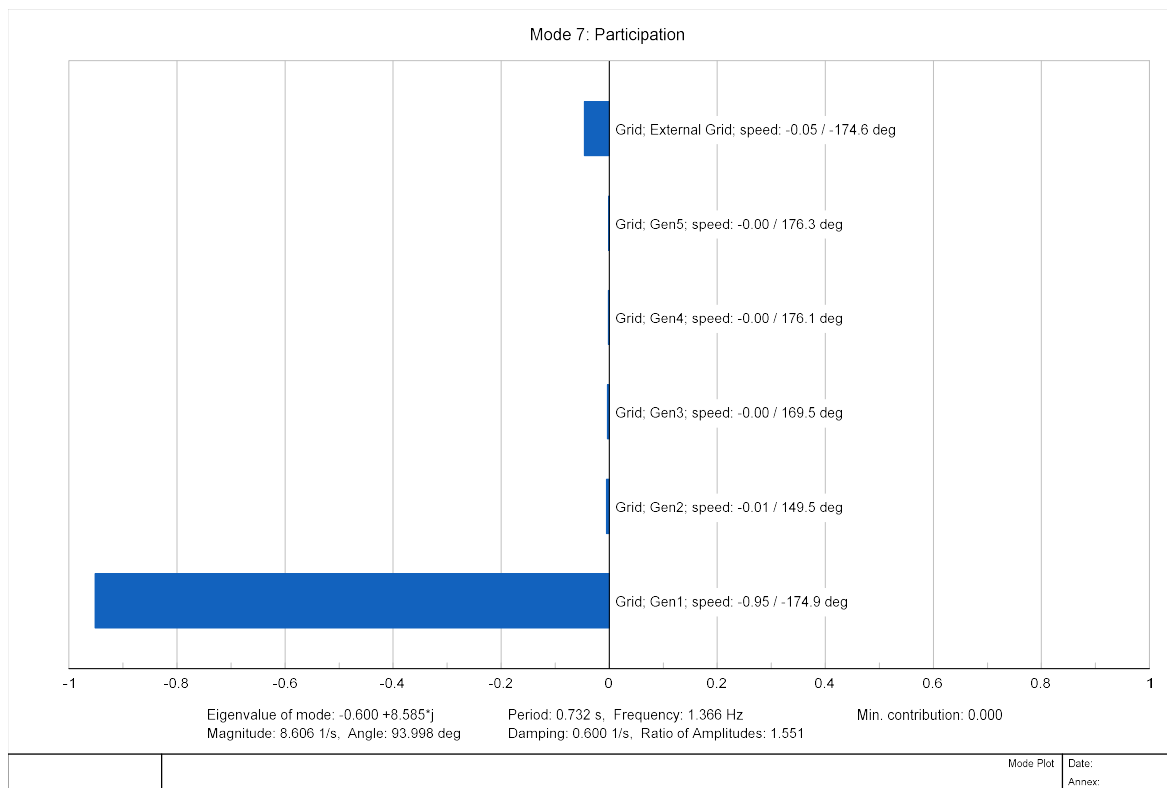
Mod	Prigušenje, $\alpha$ [1/s]	Frekvencija prigušenja, $\omega$ [rad/s]	Frekvencija, Hz	Relativni koeficijent prigušenja, $\zeta$
3, 4	-0.602911	$\pm 8.600128$	1.368753	0.069933
24, 25	-3.088827	$\pm 9.137191$	1.454229	0.320246
27, 28	-3.366802	$\pm 10.695343$	1.702217	0.300266
29, 30	-3.788693	$\pm 11.819709$	1.881165	0.305242
31, 32	-4.522290	$\pm 12.584279$	2.00285	0.338187

Položaj oscilatornih modova je prikazan i slikom 4.3 na kojoj se jasno vidi koliko je dominantni mod blizu ishodišta. Međutim, iz slike nije jasno koji element izaziva oscilacije i taj dominantni mod stoga se provodi participacijska analiza.



Slika 4.3 Oscilatorni modovi sustava sa 14 sabirnica bez stabilizatora elektromehaničkih oscilacija

Participacijska analiza, temeljena na dekompoziciji matrice  $A$ , se provodi za dominantni mod. Veličina za koju se traži participacija je brzina, a uzimaju se u obzir svi doprinosi veći od 0.0001 čime se uzimaju u obzir svih pet generatora i nadređena mreža (interkonekcija). Slikom 4.4 prikazani su rezultati iz kojih je jasno da s participacijom 0.954 najveći utjecaj ima generator Gen1. Taj generator je najveći u sustavu, što se može vidjeti iz podataka o testnoj mreži i u njegov uzбудni krug se ugrađuje stabilizator elektromehaničkih oscilacija. Utjecaj ostalih generatora u dominantnom modu je gotovo zanemariv što se potvrđuje i pri smanjenju doprinosa ispod 0.001.



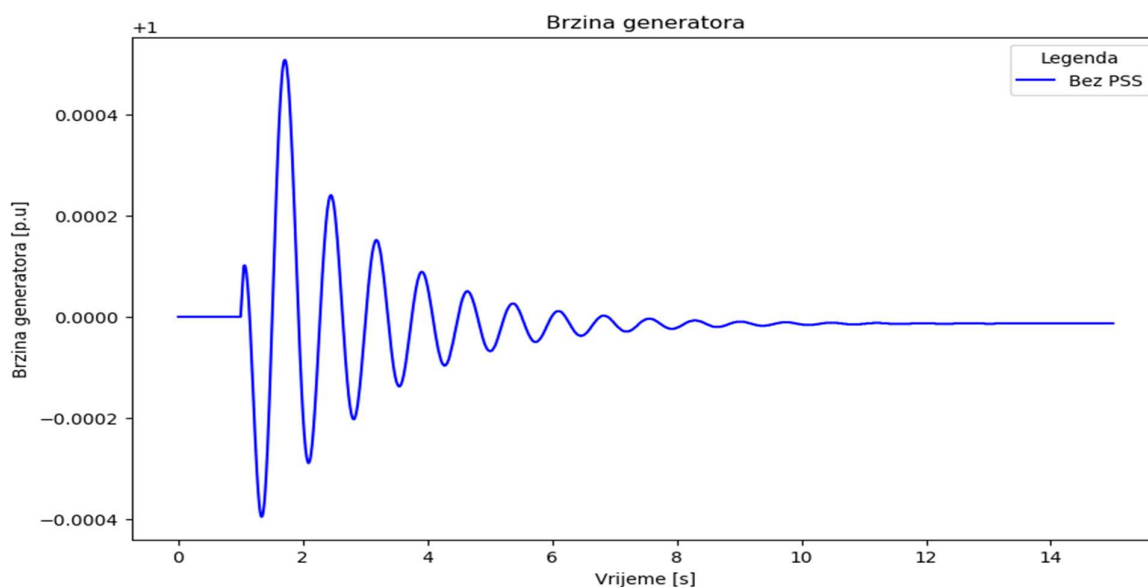
Slika 4.4 Participacijska analiza dominantnog moda

Participacijska analiza pokazuje da je uzrok niskofrekvencijskih oscilacija generator Gen1 stoga se u vremenskoj domeni promatra odziv tog generatora na uvedeni poremećaj. Rezultati modalne i participacijske analize ostaju isti neovisno o tipu poremećaja i njegovom trajanju.

#### 4.4 Scenarij 1 - Analitička metoda parametriranja stabilizatora elektromehaničkih oscilacija za trajanje poremećaja 50 ms

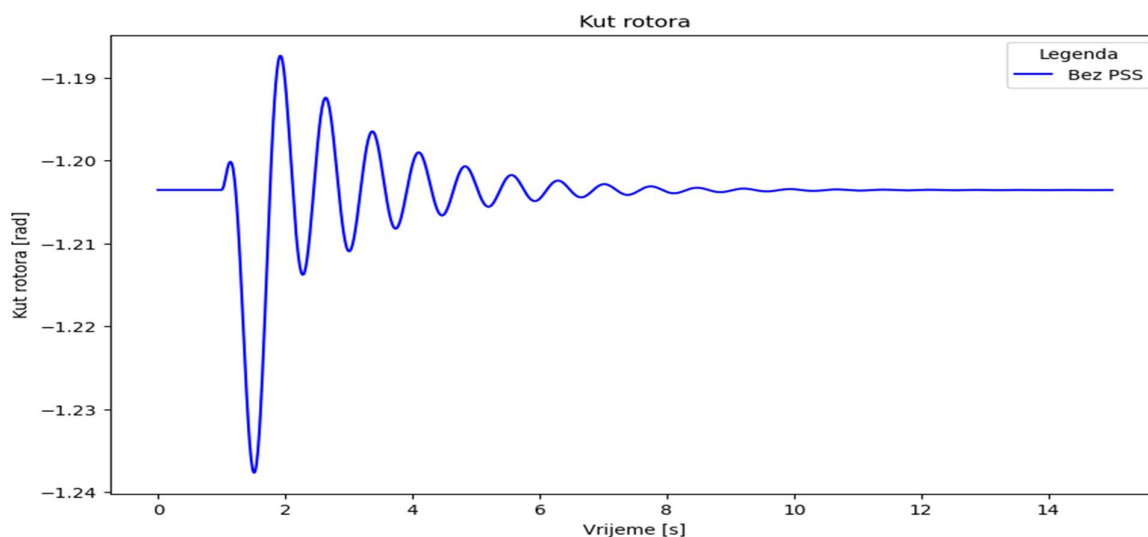
Analiza se provodi za poremećaj na sabirnici 4, trofazni kratki spoj koji u složenom sustavu neće dovesti do ispada dijela sustava ili prekida isporuke električne energije. Oscilogrami koji prikazuju promjene brzine, kuta rotora i djelatne snage generatora su prikazani slikama 4.5-4.7. Ustaljena vrijednost brzine generatora (slika 4.5.) je 1 p.u. Nakon nastupanja poremećaja vrijednost brzine

oscilira između najveće vrijednosti 1.00051 p.u. i najmanje od 0.9996 p.u. Razlika brzine je gotovo beznačajna, međutim oscilacije traju skoro 10 sekundi tokom kojih će oscilirati i frekvencija. Ukoliko se tokom tog poremećaja dogodi još neki poremećaj, sustav može postati nestabilan.



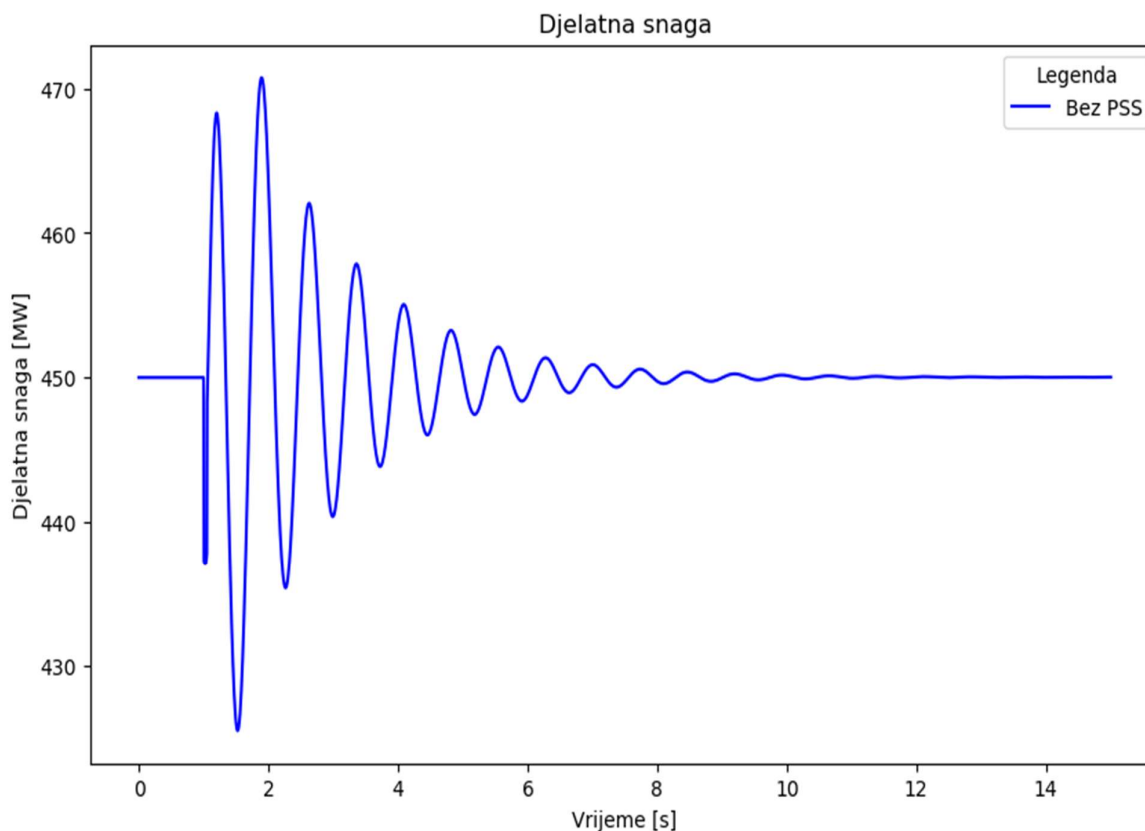
Slika 4.5 Brzina generatora nakon poremećaja u trajanju 50 ms bez stabilizatora elektromehaničkih oscilacija, scenarij 1

Slikom 4.6 prikazana je promjena kuta rotora nakon malog poremećaja. Kut rotora se mijenja od početne vrijednosti -1.2035 rad i oscilira između vrijednosti -1.238 rad do -1.187 rad. Također, kao i kod slučaja brzine generatora amplituda oscilacija nije značajno velika. Oscilacije su prigušene i nakon desetak sekundi se ponovno postiže vrijednost kao i prije poremećaja bez izraženih oscilacija.



Slika 4.6 Kut rotora generatora nakon poremećaja u trajanju 50 ms bez stabilizatora elektromehaničkih oscilacija, scenarij 1

Za razliku od prethodne dvije veličine, djelatna snaga nakon poremećaja (slika 4.7) oscilira između vrijednosti 425 MW i 472 MW. S obzirom da je vrijednost prije poremećaja 450 MW ova razlika predstavlja značajno odstupanje. Također, isporuka snage preko 450 MW se treba negdje disipirati. U slučaju velikog opterećenja na vodu može doći i do prorade zaštite i isključenja voda. Oscilacije traju desetak sekundi kao i u prethodnom slučaju. Dok njihanje brzine i kuta i nije toliko problematično, oscilacija snage može dovesti do ozbiljnog narušavanja strujno-naponskih prilika i stabilnosti sustava koje se moraju čim prije otkloniti i smanjiti njihov negativni utjecaj.



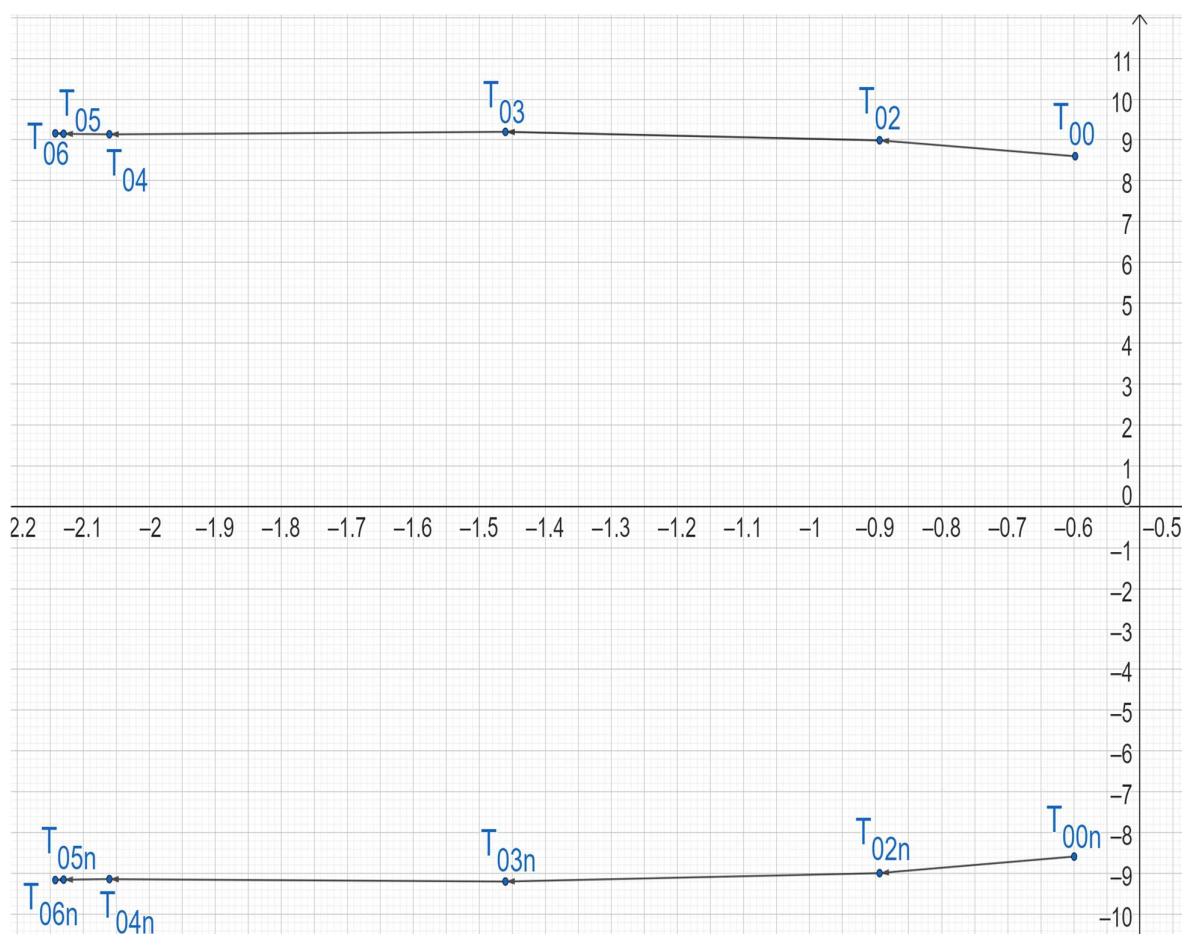
Slika 4.7 Djelatna snaga generatora nakon poremećaja u trajanju 50 ms bez stabilizatora elektromehaničkih oscilacija, scenarij 1

Prema rezultatima participacijske analize određeno je mjesto ugradnje stabilizatora elektromehaničkih oscilacija. Najjednostavnija struktura je stabilizator s jednom ulaznom veličinom (PSS1A) za koju je proces parametriranja i najjednostavniji. Kao ulazni signal bira se brzina generatora budući da se na taj način izravno utječe na povećanje prigušnog momenta. Početna vrijednost parametara se uzima prema potpoglavlju 3.1.3 uz predložena pojednostavljenja. Tako će vrijednost vremenska konstanta visokopropusnog bloka  $T_w$  čija je vrijednost predložena u literaturi iznositi 10 s, vrijednost vremenskih konstanti  $T_2$  i  $T_4$  blokova za faznu kompenzaciju  $T_2 = T_4 = 0.02$  s. Početna vrijednost vremenskih konstanti se uzima kao  $T_1 = T_3 = T = 0.2$  s; pojačanje se prema izrazu

(3-38) računa za inercijsku konstantu  $H = 5.148$  s i prigušenje dominantnog pola  $\alpha_{dom} = -0.602911288$

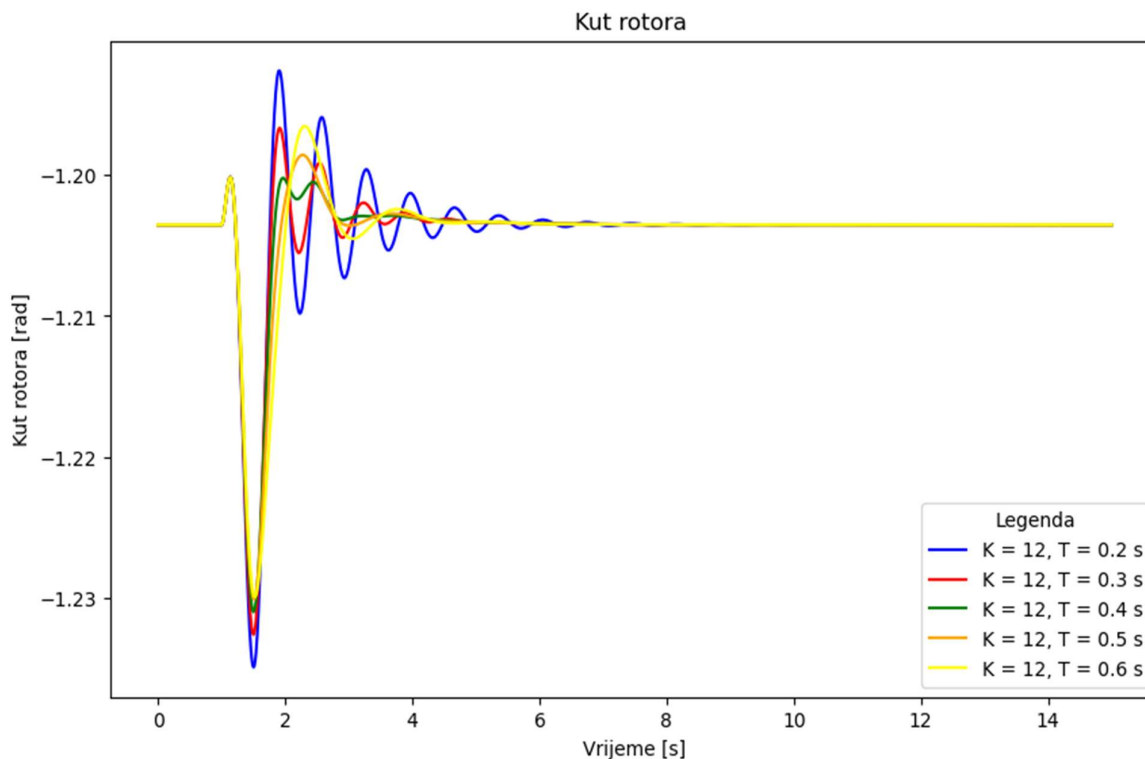
$$K_{init} = -\alpha_{dom} \cdot 4 \cdot H = -(-0.602911288) \cdot 4 \cdot 5.148 = 12.4515$$

Dakle, početne vrijednosti parametara koji se optimiraju su odabrane - početna vremenska konstanta  $T_{init} = 0.2$  s i početno pojačanje  $K_{init} = 12$ , ali oni nisu nužno najbolji nego je potrebno provesti dodatno ugađanje kako bi se dobile vrijednosti uz koje će se poboljšati oscilatorna i tranzijentna stabilnost. Stoga se uz konstantnu vrijednost pojačanja provodi postupak određivanja vremenske konstante stabilizatora elektromehaničkih oscilacija tako što se iterativnim postupkom dolazi do najboljeg rješenja. Odabran je prvi set vrijednosti kojeg sačinjava ukupno pet vrijednosti u rasponu od 0.2 s do 0.6 sekundi te se za njih provodi modalna analiza i simulacije u vremenskoj domeni za promatrane signale (kut rotora, brzina i djelatna snaga). Rezultati modalne analize su dani slikom 4.8 i jasno se uočava da se povećanjem vremenske konstante dominantni pol pomiče u lijevu stranu kompleksne ravnine čime se poboljšava stabilnost sustava.



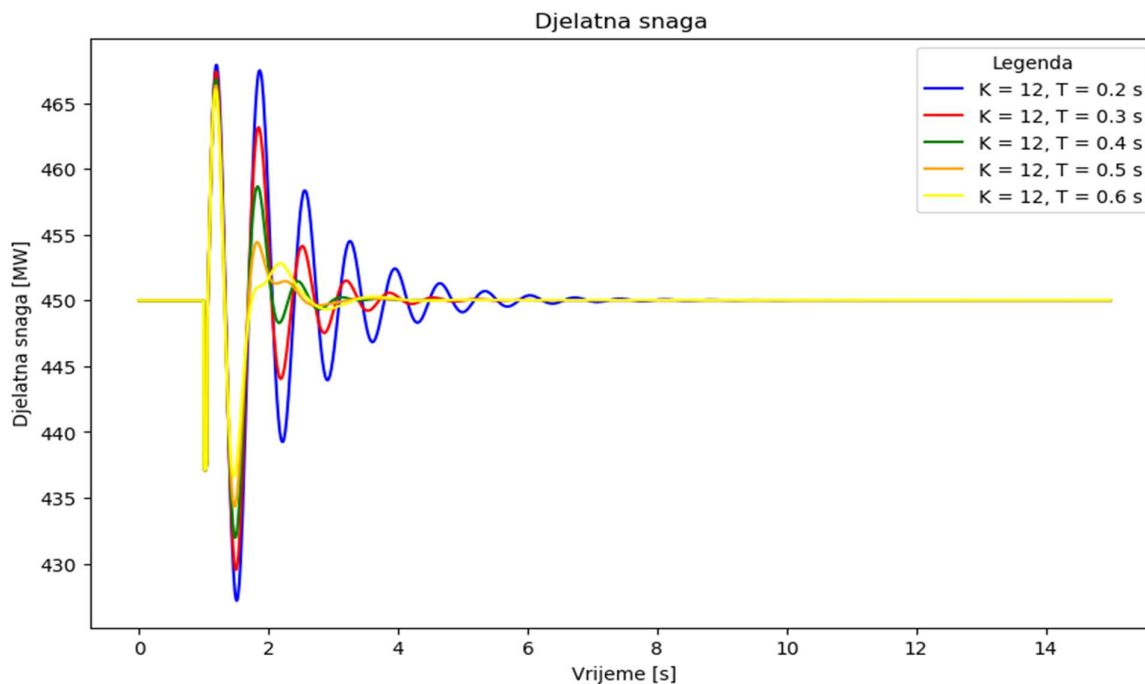
Slika 4.8 Položaj polova u kompleksnoj ravni pri promjeni vremenske konstante stabilizatora, scenarij 1

U prvoj iteraciji se svi polovi u manjoj ili većoj mjeri pomiču u lijevu stranu. Međutim, kako se vremenska konstanta povećava tako sljedeći mod preuzima ulogu dominantnog i djelovanje na poboljšanje stabilnosti sustava se ograničava. Nakon određenog broja iteracija čak dolazi do pogoršanja oscilatorne stabilnosti. Iz toga se može zaključiti da se djelovanjem stabilizatora elektromehaničkih oscilacija pozitivno djelovalo na oscilatornu stabilnost. Za analizu djelovanja u vremenskoj domeni, odnosno utjecaja na tranzijentnu stabilnost, nužno je prikazati i vrednovati odzive generatora. Slikom 4.9 prikazana je promjena kuta rotora za promjenu vremenske konstante.



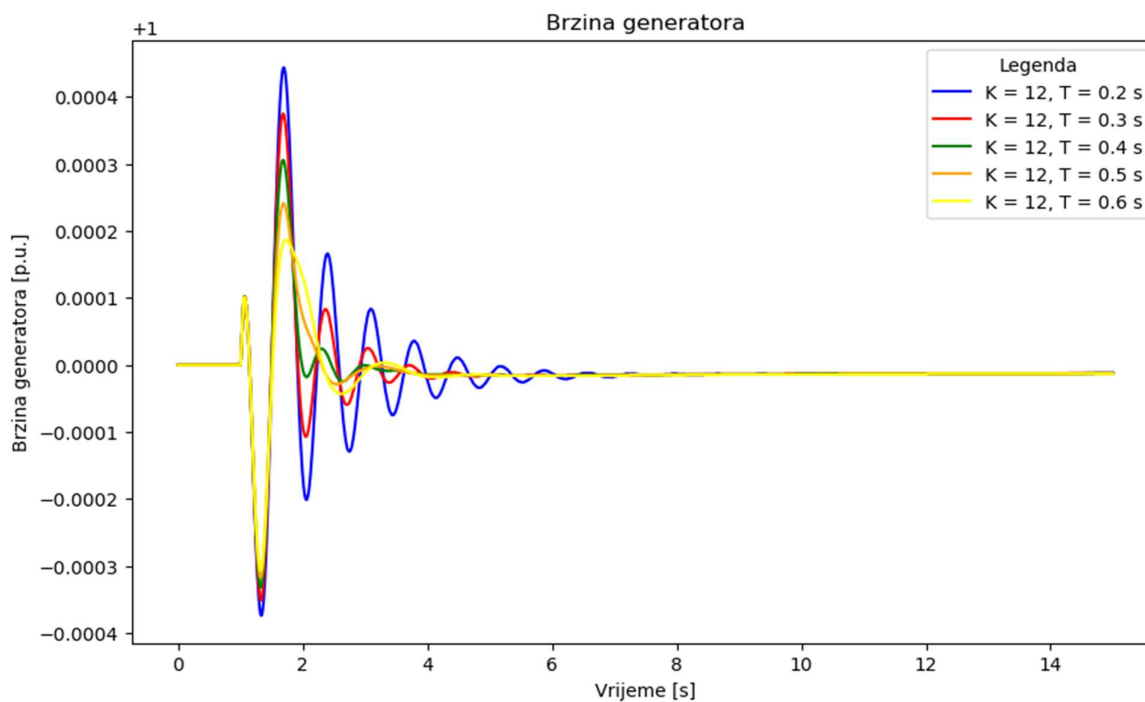
Slika 4.9 Kut rotora za različite vrijednosti vremenske konstante, scenarij 1

Promjenom vremenske konstante smanjuje se nadvišenje kratko nakon pojave kratkog spoja. Time se zapravo smanjuje odstupanje veličine od njezine vrijednosti u prethodnom, ustaljenom stanju. Cilj je smanjiti odstupanja, kao i vrijeme stabilizacije veličine. Sa slike se može uočiti da iako veća vremenska konstanta rezultira većim nadvišenjem, vrijeme ustaljivanja je znatno kraće. Kao i u prethodnom primjeru, djelatna snaga također brže postiže ustaljenu vrijednost što je vremenska konstanta stabilizatora veća. Međutim, djelatna snaga s povećanjem vremenske konstante ima i sve manje nadvišenje - oscilacije snage se smanjuju.



Slika 4.10 Djelatna snaga za različite vrijednosti vremenske konstante, scenarij 1

Odzivi brzine za varijaciju vremenske konstante stabilizatora su prikazani slikom 4.11. Povećanje vremenske konstante će i u ovom slučaju rezultirati smanjenjem nadvišenja i smanjenjem oscilacija te brže dostizanje vrijednosti prije poremećaja.



Slika 4.11 Brzina generatora za promjenu vremenske konstante, scenarij 1

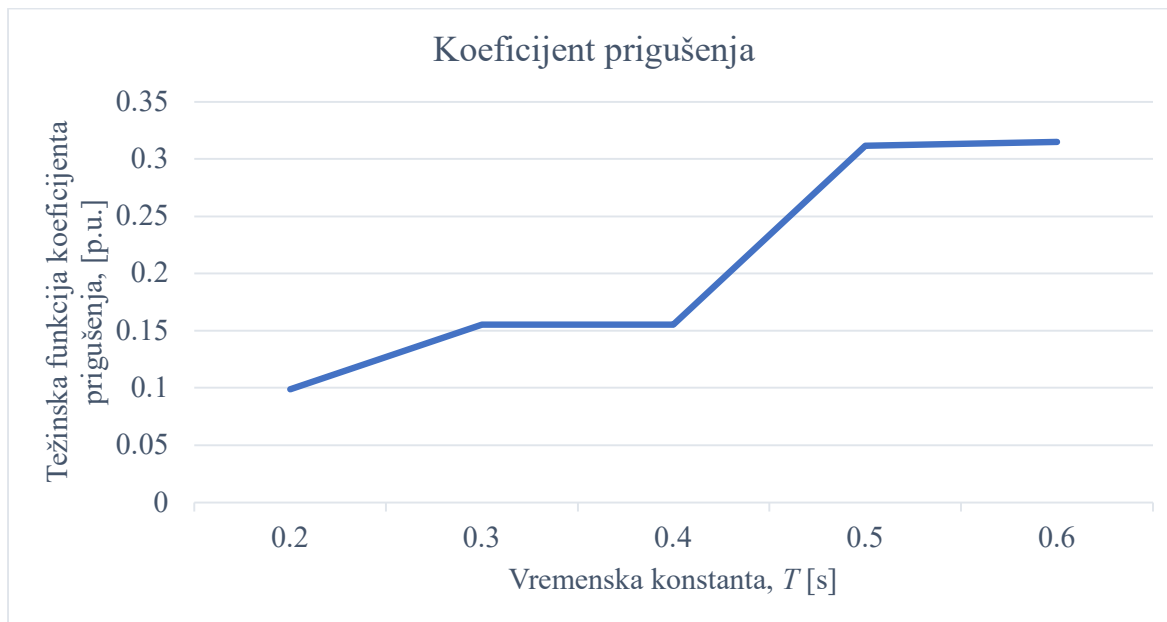


Iz prethodnih slika i razmatranja se može uočiti da se povećanjem vremenske konstante postiže poboljšanje tranzijentne stabilnosti. Iz priloženih rezultata se ne može donijeti jednoznačan zaključak o tome koja vrijednost vremenske konstante daje najbolji odziv pa se stoga dobivene vrijednosti uvrštavaju u izraze za težinske funkcije (3-41) - (3-43) i ukupnu težinsku izraženu pomoću jednadžbe (3-44). Rezultati su prikazani tablicom 4.9.

Tablica 4.9 Težinske funkcije za varijacije vremenske konstante za  $t = 50$  ms, scenarij 1

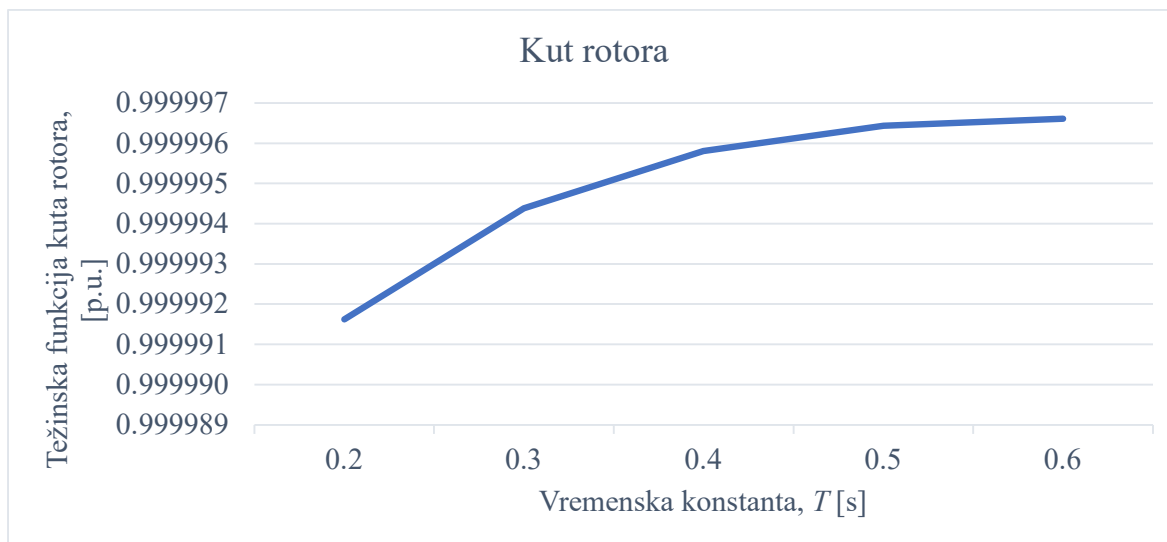
Vremenska konstanta, $T$ [s]	Koeficijent prigušenja	Kut rotora	Djelatna snaga	Brzina generatora	Ukupna težinska funkcija
0.2	0.098707	0.999992	0.980327	0.877948	2.956973
0.3	0.155248	0.999994	0.984528	0.918704	3.058475
0.4	0.155248	0.999996	0.985901	0.941869	3.083014
0.5	0.311748	0.999996	0.985241	0.954695	3.251681
0.6	0.314983	0.999997	0.981473	0.950626	3.247078

Prva težinska funkcija koja je prikazana je za relativni koeficijent prigušenja. Kao što se vidi sa slike 4.12, kako raste vremenska konstanta, tako se i koeficijent povećava. Za promatrani period ne postoji jasno određen maksimum nego s povećanjem konstante raste koeficijent prigušenja.



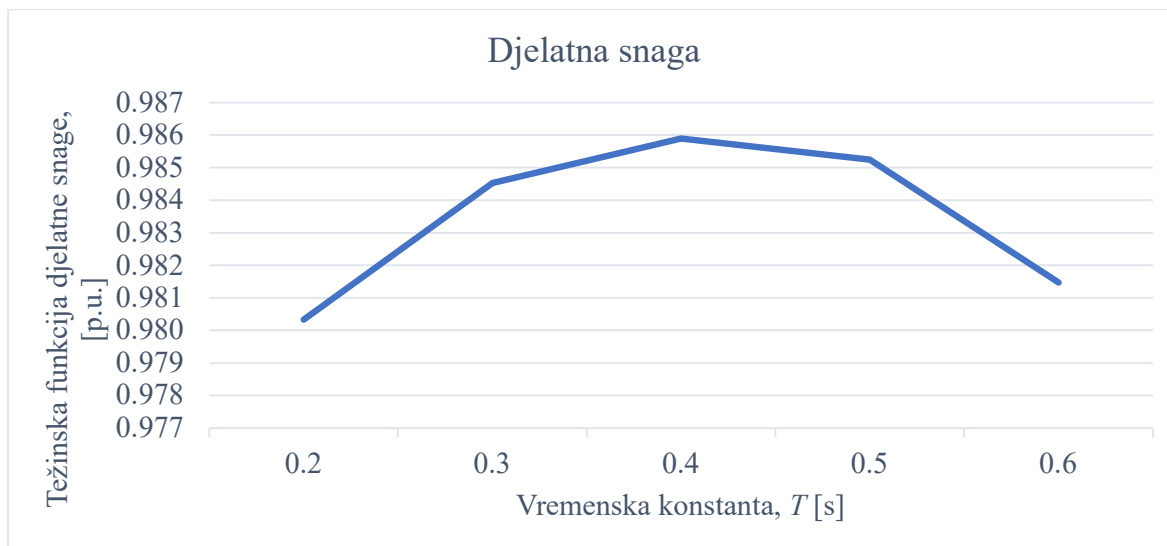
Slika 4.12 Težinska funkcija prigušenja za različite vrijednosti vremenske konstante, scenarij 1

Težinska funkcija kuta rotora prikazana je slikom 4.13. Povećanje vremenske konstante rezultira manjim odstupanjem kuta rotora u odnosu na vrijednost prije poremećaja.



Slika 4.13 Težinska funkcija kuta rotora za različite vrijednosti vremenske konstante, scenarij 1

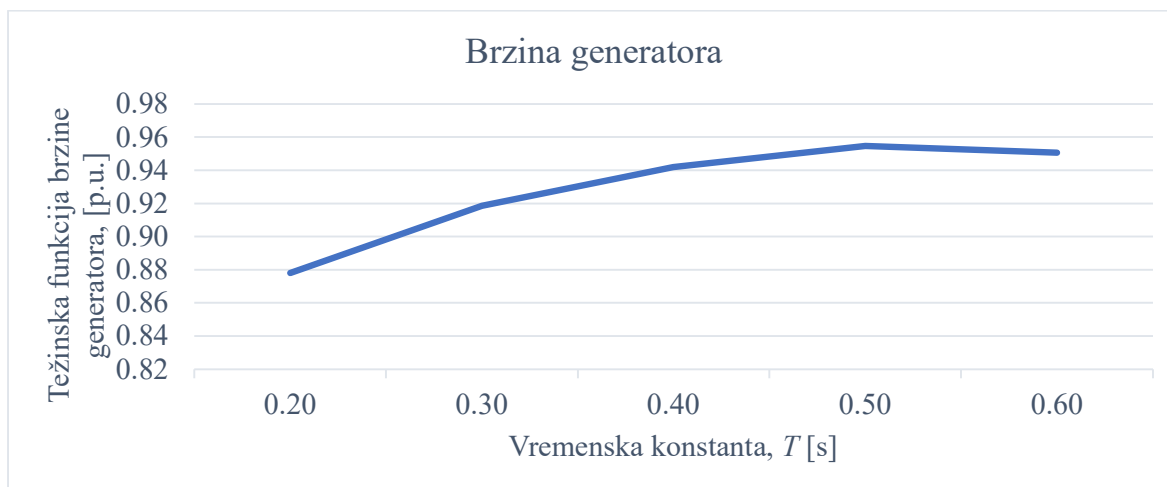
Težinska funkcija kuta rotora pokazuje malo smanjenje kako vremenska konstanta stabilizatora raste, odnosno odstupanje vrijednosti kuta rotora se smanjuje sa povećanjem vremenske konstante. Prema tome, povećanje vremenske konstante bi vodilo prema sve manjem nadvišenju kao i bržem otklanjanju poremećaja. Za razliku od kuta rotora, težinska funkcija djelatne snage (slika 4.14) ima lokalni maksimum za vrijednost vremenske konstante  $T = 0.4$  s. Daljnjim povećanjem će se povećati i odstupanje trenutne vrijednosti u odnosu na vrijednost djelatne snage prije poremećaja.



Slika 4.14 Težinska funkcija djelatne snage za različite vrijednosti vremenske konstante, scenarij 1

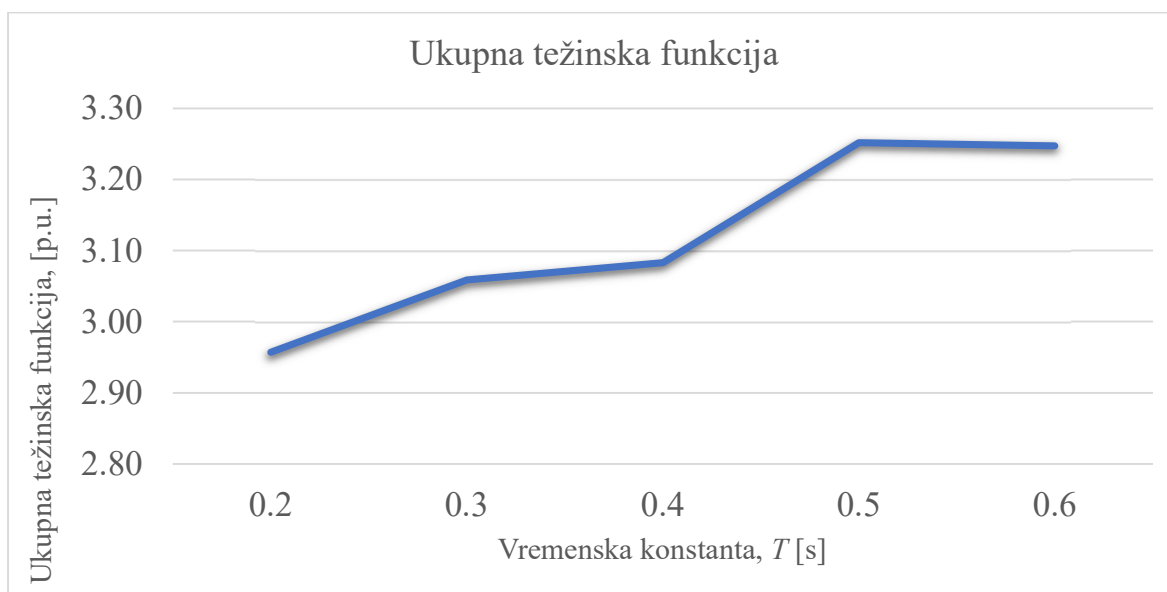
Zadnja pojedinačna težinska funkcija je za brzinu generatora (slika 4.15). Odstupanje brzine generatora se smanjuje povećanjem vremenske konstante. Budući da je iznos težinske funkcije,

skupa s težinskom funkcijom kuta rotora jako malen, ukupnu težinsku funkciju će određivati težinska funkcija prigušenja i djelatne snage.



Slika 4.15 Težinska funkcija brzine generatora za različite vrijednosti vremenske konstante, scenarij 1

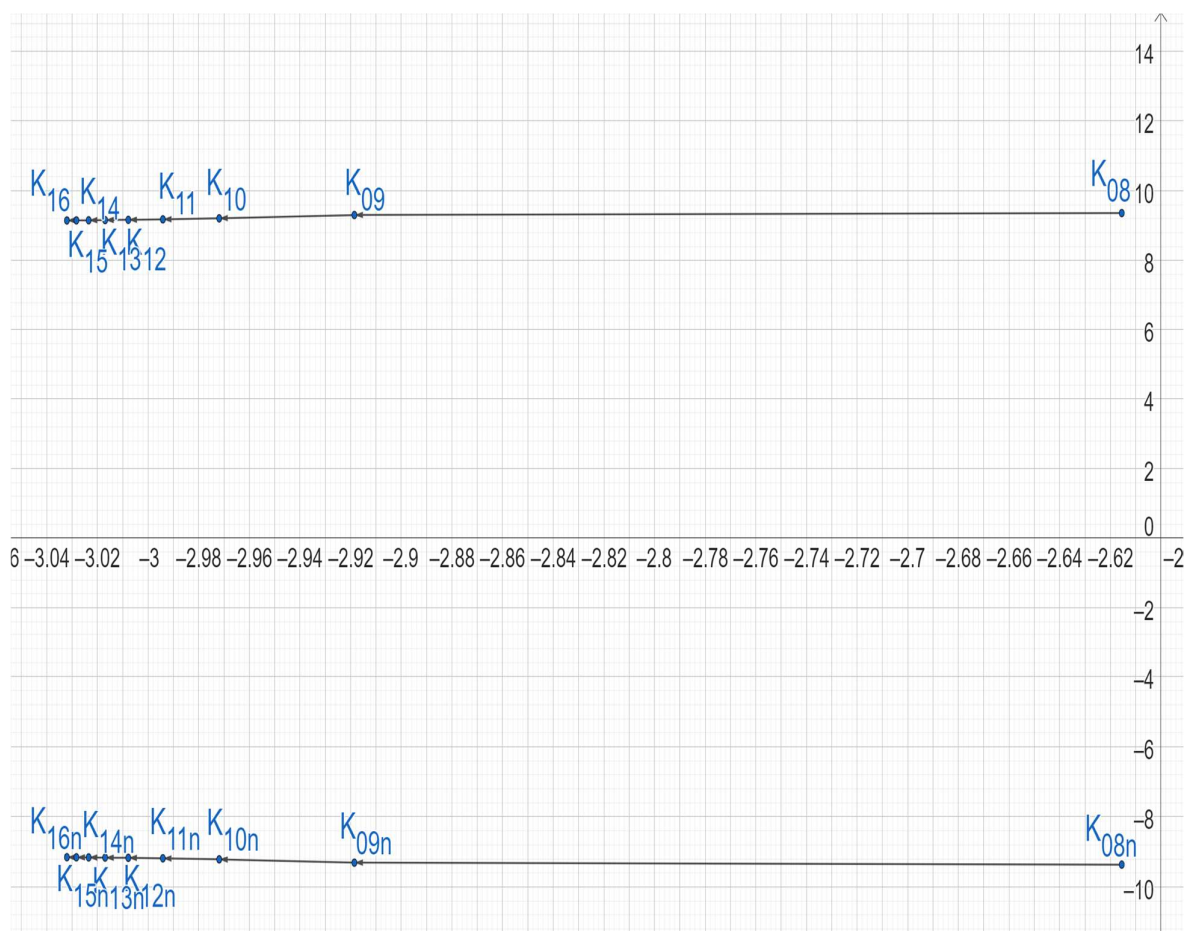
Ukupna težinska funkcija je prikazana slikom 4.16, a iz nje se vidi da je optimalna vrijednost vremenske konstante  $T = 0.5$  s. Prema prethodim rezultatima, ukupnu težinsku funkciju određuju funkcija koeficijenta prigušenja i djelatne snage. Prema rezultatima iz kompleksne frekvencijske domene, vremenska konstanta treba biti što viša i za promatrani skup vrijednosti bi bila  $T = 0.6$  s. Rezultati iz vremenske domene pak ukazuju da vremenska konstanta  $T = 0.4$  s rezultira najmanjim odstupanjem djelatne snage od njezine vrijednosti prije poremećaja. Međutim, kada se uzme u obzir utjecaj svih veličina dolazi se do optimuma  $T = 0.5$  sekundi i ta vrijednost se dalje koristi pri varijacijama pojačanja dok se ne pronade optimalna vrijednost.



Slika 4.16 Ukupna težinska funkcija za različite vrijednosti vremenske konstante, scenarij 1

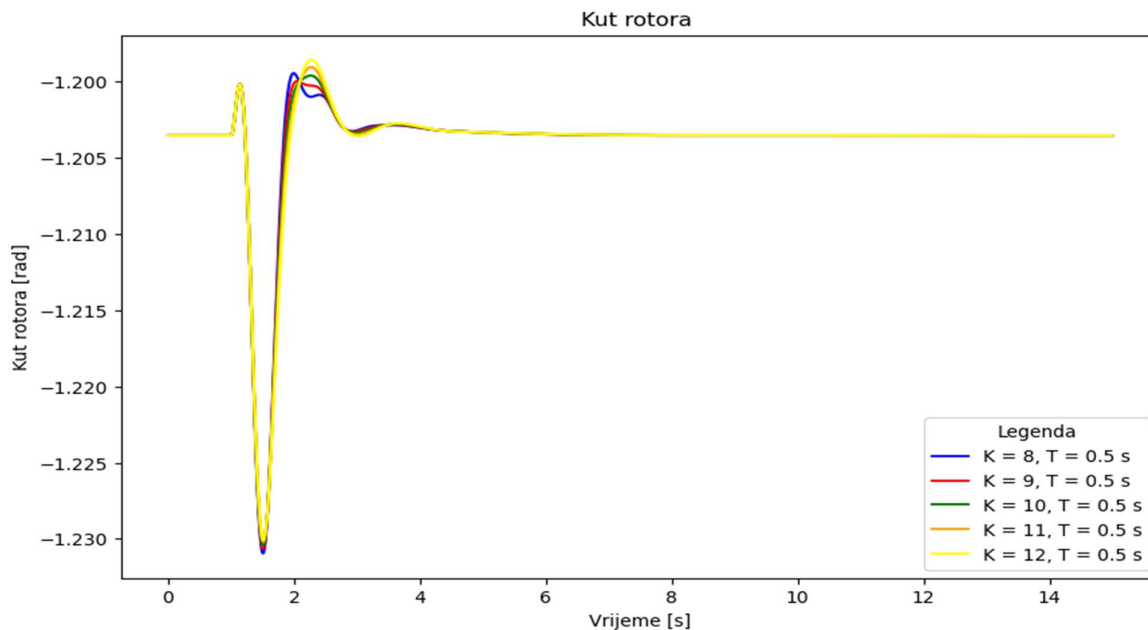
Zadnji korak parametriranja je određivanje pojačanja. Prema metodologiji iz potpoglavlja 3.1.5, formiraju se dva skupa vrijednosti - viši od početnog pojačanja koji se dobije dodavanjem +1 na početnu vrijednost pojačanja i nižeg koji se formira tako što se oduzima 1 od početnog pojačanja. Za oba seta vrijednosti vremenska konstanta je jednaka i iznosi  $T = 0.5$  sekundi.

Slika 4.17 prikazuje krivulju mjesta korijena za promjenu vrijednosti pojačanja. Povećanjem pojačanja prigušenje raste, odnosno poboljšava se oscilatorna stabilnost. Međutim, u nekom trenutku se trenutni dominantni pol zamjenjuje drugim tako da se povećanjem pojačanja iznad određenog iznosa negativno djeluje na druge modove sustava. Mod za koji je stabilizator parametriran će imati neznatne promjene u prigušenju, ali svako daljnje povećanje će rezultirati time da se pojavljuje novi dominantni mod.



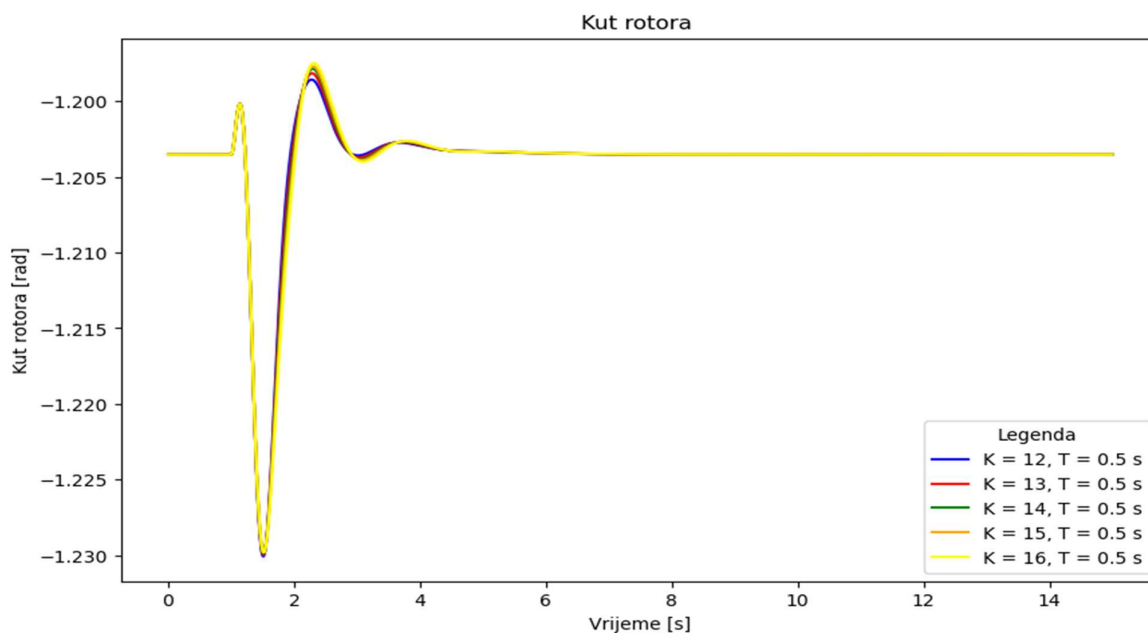
Slika 4.17 Utjecaj povećanja pojačanja na oscilatorne modove, scenarij 1

Odzivi veličina na poremećaj prikazani u vremenskoj domeni prikazani su slikama 4.18 - 4.23. Za razliku od utjecaja promjene vremenske konstante, promjenom pojačanja neće nužno biti jasno uočljive promjene veličina (primjer odziva djelatne snage). Međutim, kako bi promjene bile jasnije odzivi su prikazani na posebnim slikama za više i niže skupove vrijednosti.



Slika 4.18 Kut rotora za različite vrijednosti pojačanja u donjem skupu vrijednosti, scenarij 1

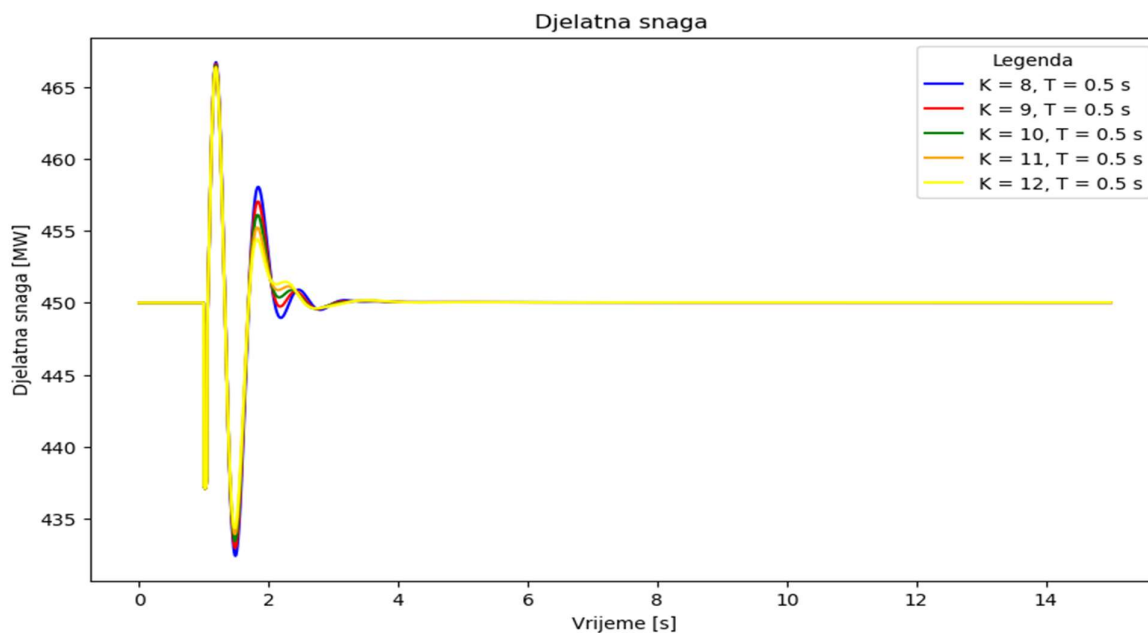
Kut rotora se smanjuje povećanjem pojačanja. Za donji skup, najbolji odziv je pri pojačanju 8 jer je nadvišenje najmanje, a oscilacije se najprije priguše pri tom iznosu. U skupu viših vrijednosti pojačanja, najbolji rezultati su pri pojačanju 12, a najlošiji pri 16. Iako postoje, razlike nisu toliko izražene te će se za odabir optimalne vrijednosti kao i u prethodnim slučajevima odlučivati na temelju težinskih funkcija.



Slika 4.19 Kut rotora za različite vrijednosti pojačanja u gornjem skupu vrijednosti, scenarij 1

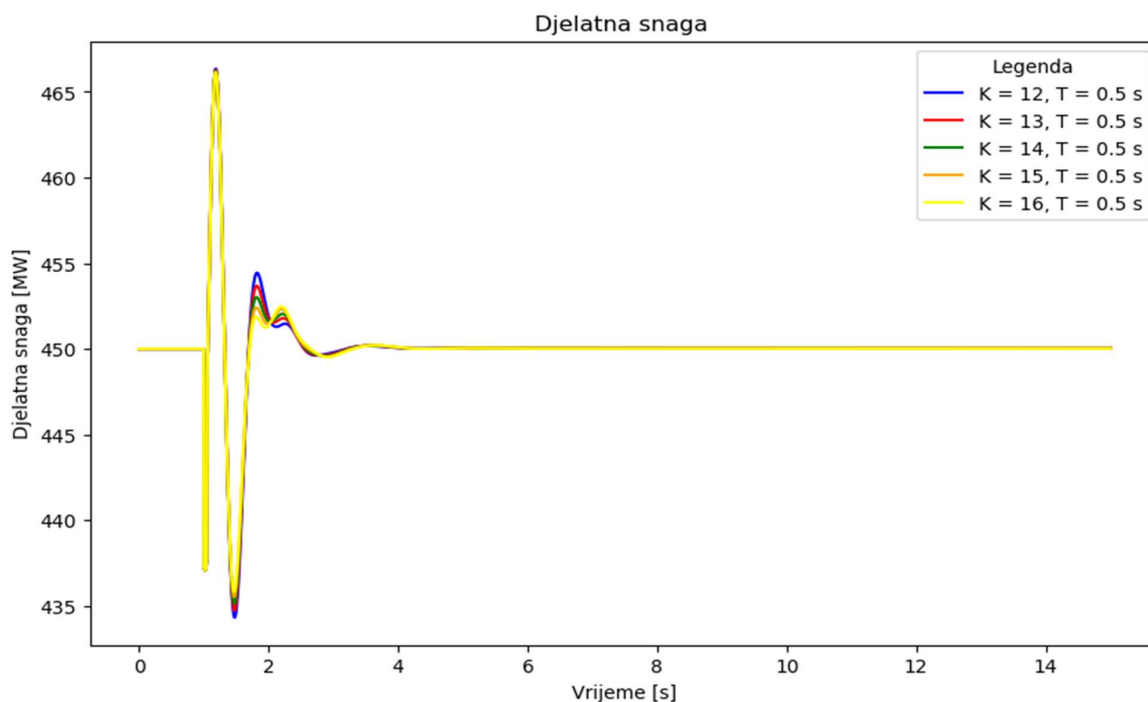
I kod odstupanja djelatne snage (slike 4.20 i 4.21) se uočava neznatno odstupanje za različite vrijednosti pojačanja te se ne može donijeti jednoznačna odluka samo na temelju odziva. Za niži set

vrijednosti odstupanja su gotovo zanemariva, međutim kako se vrijednost povećava iznad početne ( $K = 12$ ), nadvišenje se povećava kao i vrijeme prigušenja oscilacija.



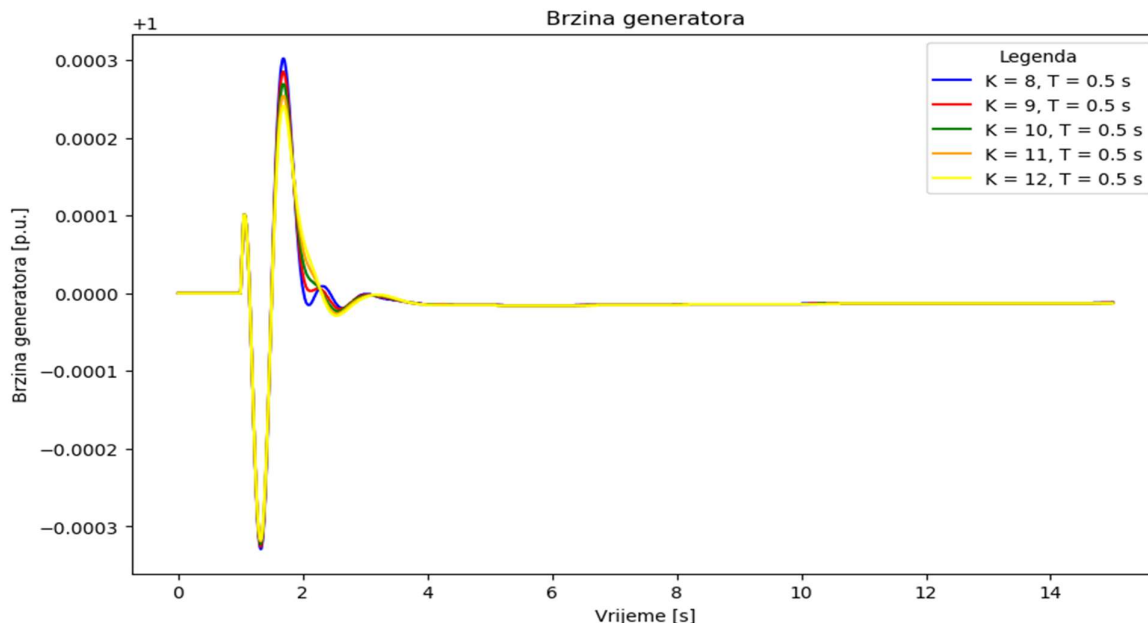
Slika 4.20 Djelatna snaga za različite vrijednosti pojačanja u donjem skup vrijednosti, scenarij 1

Iz navedenih oscilograma se može uočiti da bi daljnje povećanje pojačanja dovelo do još većih odstupanja te da se optimalna vrijednost pojačanja nalazi upravo unutar promatranog skupa vrijednosti.



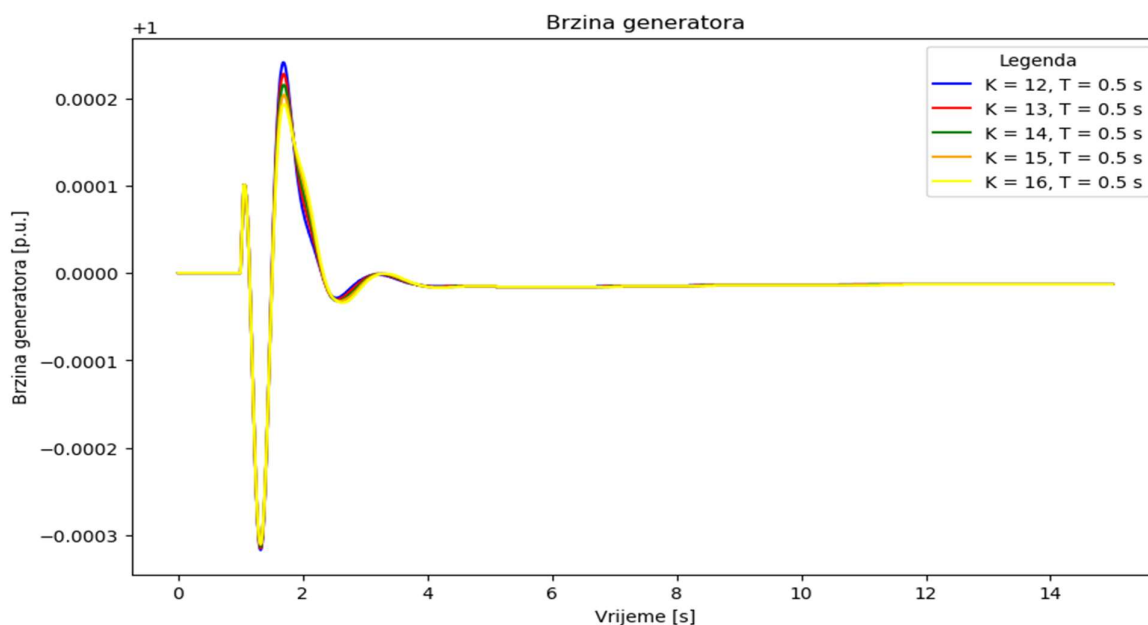
Slika 4.21 Djelatna snaga za različite vrijednosti pojačanja u gornjem skupu vrijednosti, scenarij 1

Brzina generatora (prikazana slikama 4.22 i 4.23) se kao i prethodne veličine neznatno mijenja s promjenom pojačanja. Promjene postaju značajnije pri većim iznosima pojačanja. Prema tome, za kraće trajanje poremećaja pri varijaciji pojačanja se malom promjenom pojačanja ne postiže značajno poboljšanje tranzijentne stabilnosti.



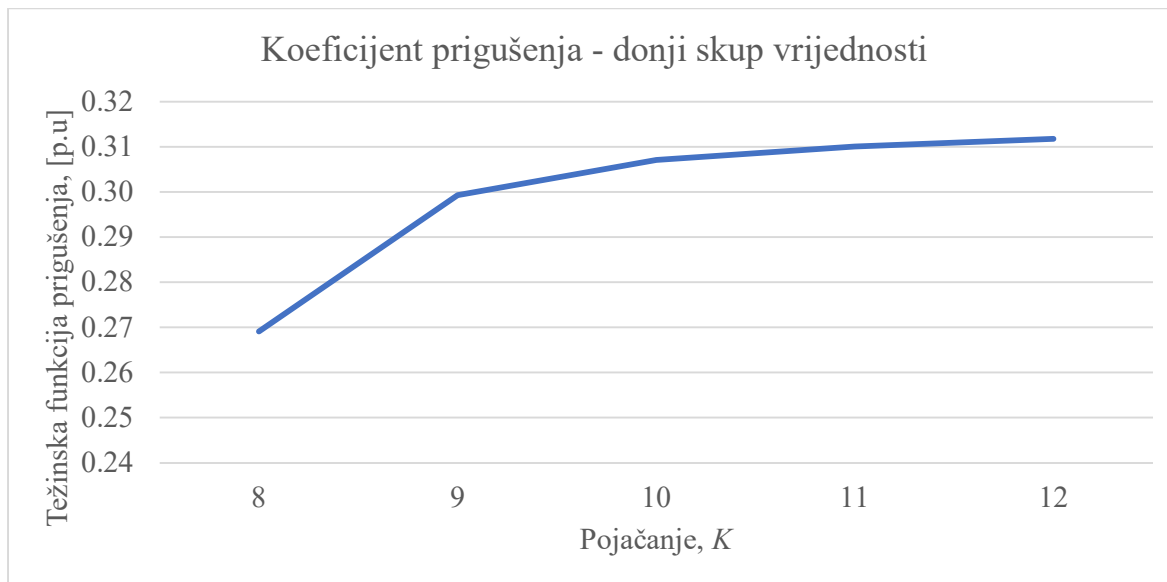
Slika 4.22 Brzina generatora za različite vrijednosti pojačanja u donjem skupu vrijednosti, scenarij 1

Većom vrijednošću pojačanja, u ovom slučaju pri vrijednosti  $K = 16$  i više, dolazi do narušavanja tranzijentne stabilnosti što treba imati na umu pri odabiru vrijednosti pojačanja stabilizatora.



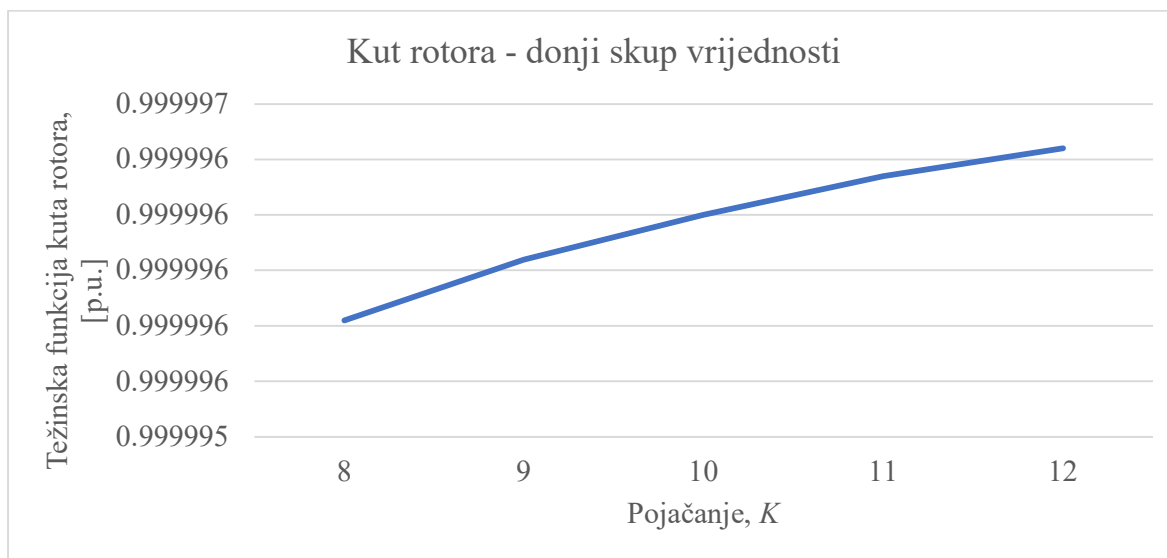
Slika 4.23 Brzina generatora za različite vrijednosti pojačanja u gornjem skupu vrijednosti, scenarij 1

Iz slike 4.24 se vidi utjecaj pojačanja na koeficijent prigušenja. Vrijednost prigušenja naglo raste za vrijednosti između 8 i 10, nakon čega će porast pojačanja gotovo neznatno utjecati na koeficijent prigušenja. Pri parametriranju po kompleksnoj frekvencijskoj domeni odabrani koeficijent bi bio što bliži početnoj vrijednosti pojačanja ( $K_{\text{init}} = 12$ ) i idealno bi bilo da je vrijednost što viša.



Slika 4.24 Težinska funkcija prigušenja za različite vrijednosti pojačanja u donjem skupu vrijednosti, scenarij 1

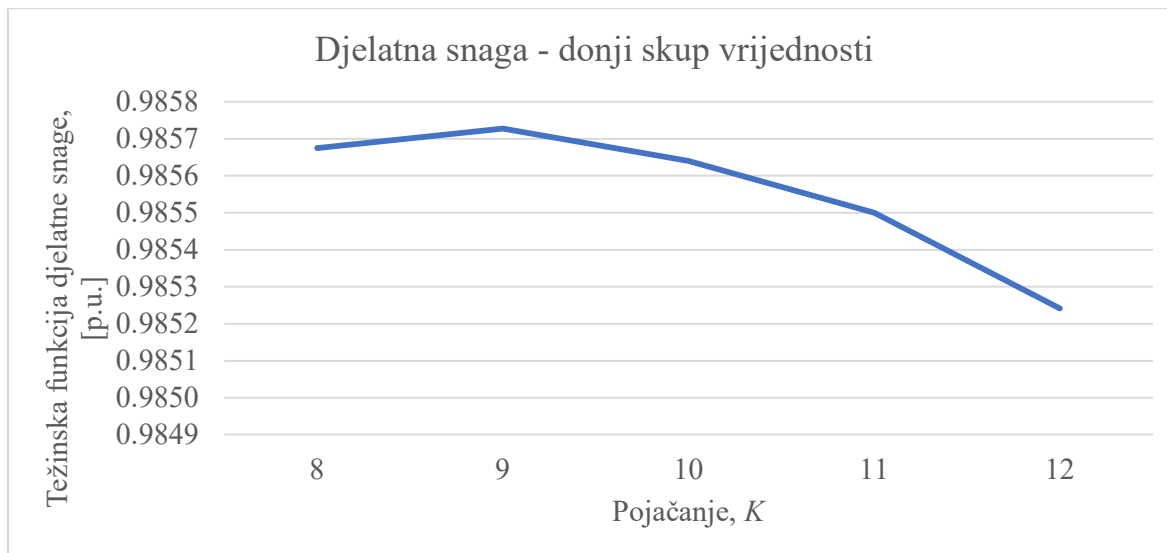
Težinska funkcija kuta rotora za donji skup vrijednosti pojačanja je prikazana slikom 4.25. Vrijednost odstupanja kuta je jako mala, gotovo beznačajna i prema tome neće značajno utjecati na odabir pojačanja. Kako pojačanje raste, tako je i odstupanje sve manje.



Slika 4.25 Težinska funkcija kuta rotora za različite vrijednosti pojačanja u donjem skupu vrijednosti, scenarij 1

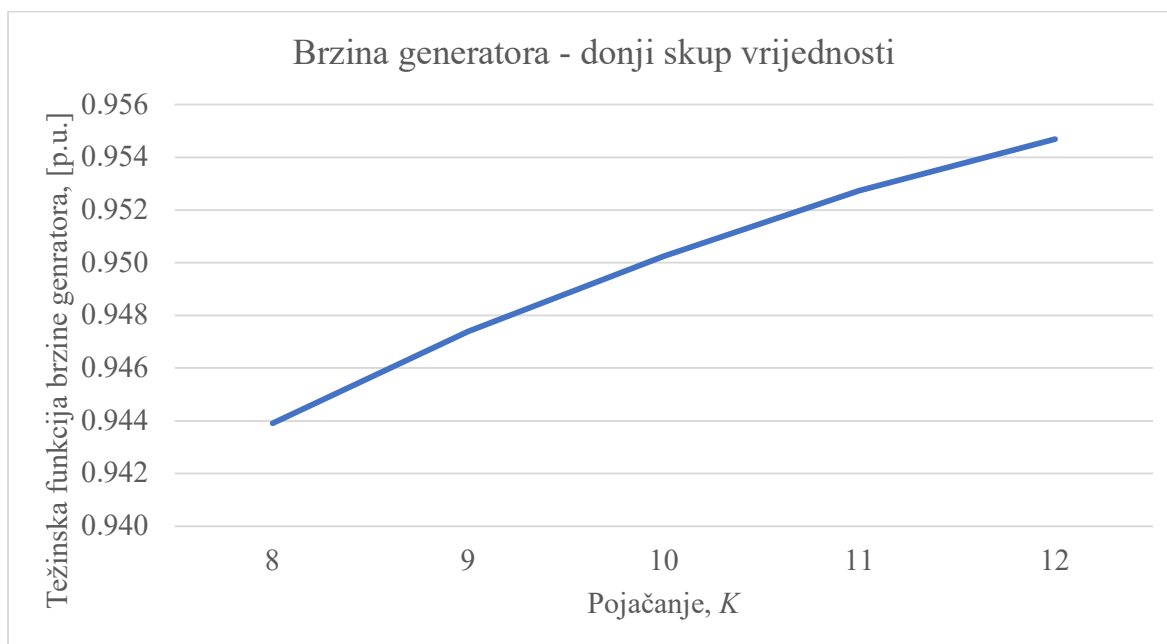


Za razliku od pojačanja, odstupanja djelatne snage su sve veća kao se pojačanje povećava (slika 4.26). Najmanje odstupanje je pri pojačanju  $K = 9$ . Uspoređujući iznose težinskih funkcija jasno je da će u ukupnoj težinskoj funkciji djelatna snaga biti odlučujuća, kao što je bio slučaj i za varijacije vremenske konstante.



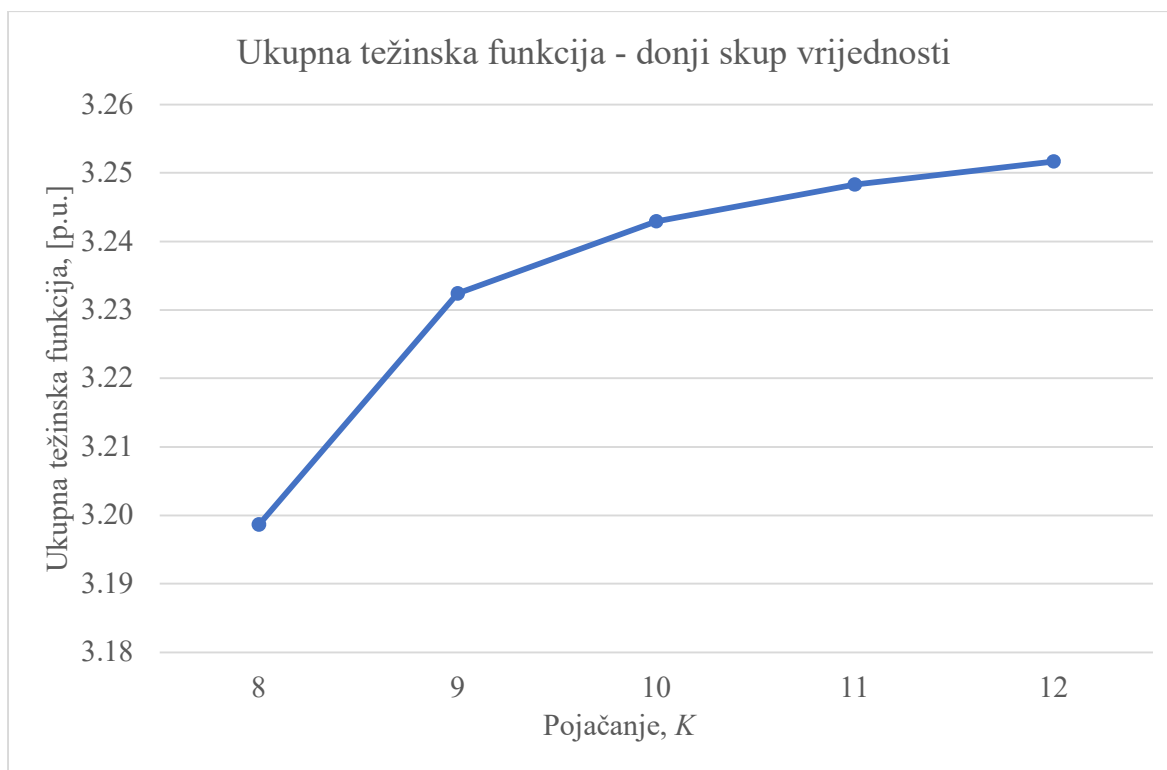
Slika 4.26 Težinska funkcija djelatne snage za različite vrijednosti pojačanja u donjem skupu vrijednosti, scenarij 1

Težinska funkcija brzine generatora za donji skup vrijednosti pojačanja prikazana je slikom 4.27. Povećanjem pojačanja odstupanje brzine od početne vrijednosti se smanjuje i najnižu vrijednost ima pri zadnjoj vrijednosti iz skupa,  $K = 12$  gdje težinska funkcija ima najveću vrijednost.



Slika 4.27 Težinska funkcija brzine generatora za različite vrijednosti pojačanja u donjem skupu vrijednosti, scenarij 1

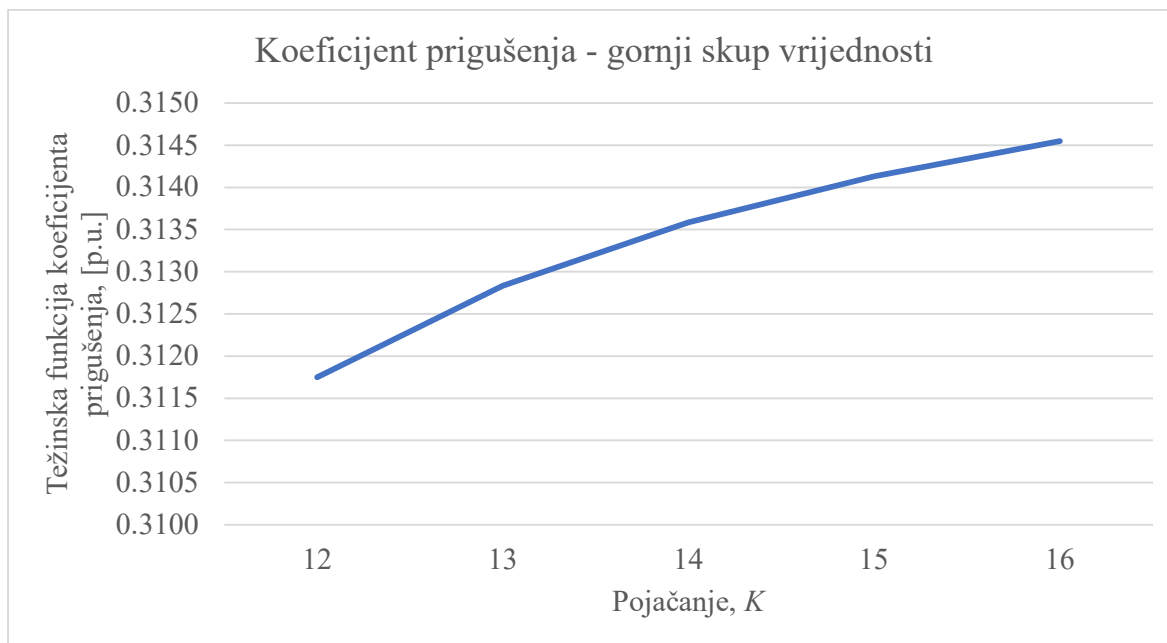
Nakon što su prethodnim slikama prikazane pojedinačne težinske funkcije, slikom 4.28 prikazana je konačna ukupna težinska funkcija za donji skup vrijednosti pojačanja



Slika 4.28 Ukupna težinska funkcija za različite vrijednosti pojačanja u donjem skupu vrijednosti, scenarij 1

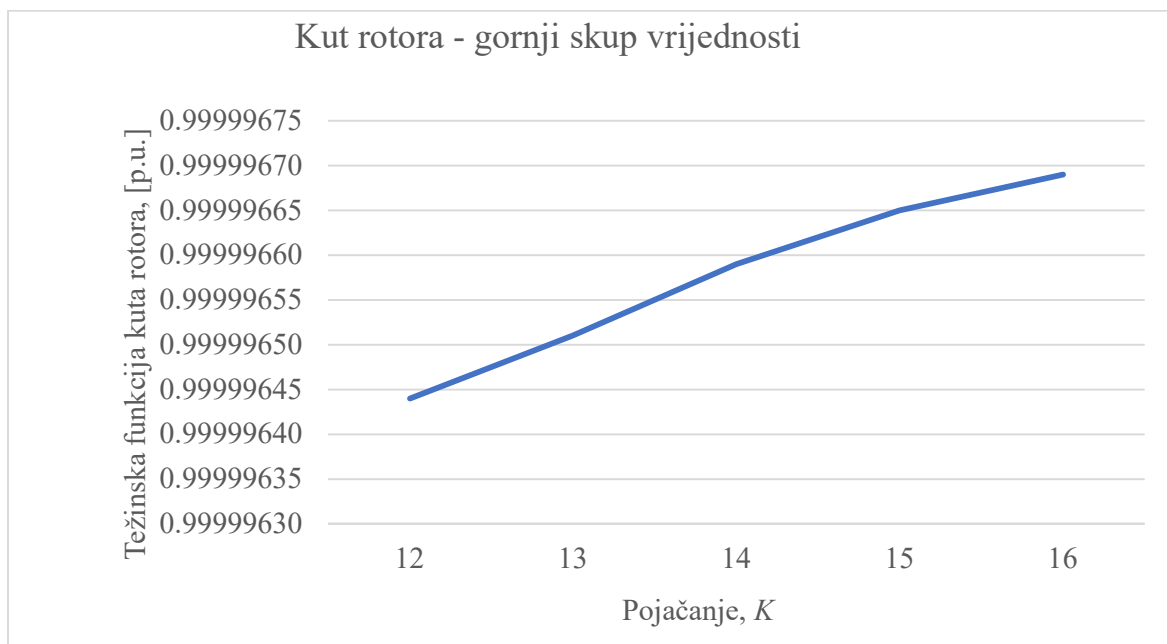
Iz slike se može zaključiti da vrijednost pojačanja  $K = 8$  rezultira najnižom vrijednošću težinske funkcije, ali konačnu odluku o maksimumu funkcije se ne može donijeti isključivo na temelju toga budući da vrijednosti pojačanja u rasponu 10-12 daju gotovo jednake rezultate. S gotovo neznatnom razlikom, pojačanje  $K = 12$  rezultira maksimalnom vrijednošću težinske funkcije te se kao pojačanje nižeg skupa vrijednosti bira upravo ta vrijednost.

U gornjem skupu vrijednosti pojačanja se odmah uočava porast težinske funkcije prigušenja (slika 4.29), odnosno relativnog koeficijenta prigušenja, kako pojačanje raste. U ovom skupu minimum funkcije je za najnižu vrijednost pojačanja u skupu, koji je u prethodnom skupu zapravo bio optimalna vrijednost.



Slika 4.29 Težinska funkcija koeficijenta prigušenja za različite vrijednosti pojačanja u gornjem skupu vrijednosti, scenarij 1

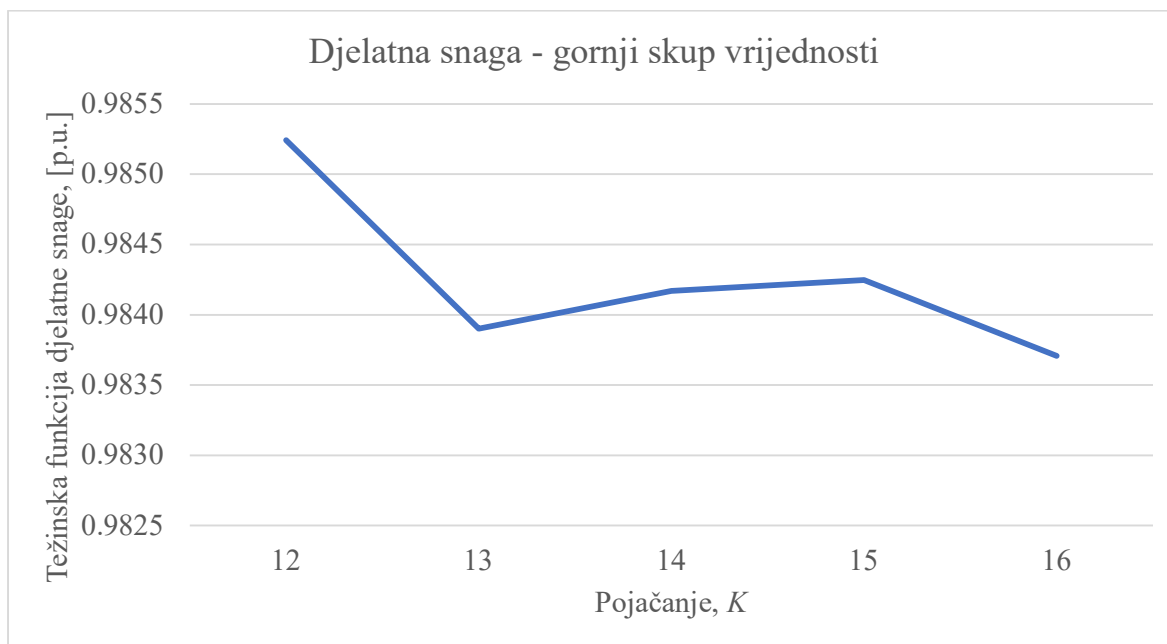
Ako se promatra u smislu oscilatorne stabilnosti, jasno je da se povećanjem pojačanja poboljšava taj vid stabilnosti. Također, veći iznos pojačanja rezultira manjim odstupanjem kuta rotora od početne vrijednosti (slika 4.30) što se ogleda u smanjenju vrijednosti težinske funkcije.



Slika 4.30 Težinska funkcija kuta rotora za različite vrijednosti pojačanja u gornjem skupu vrijednosti, scenarij 1

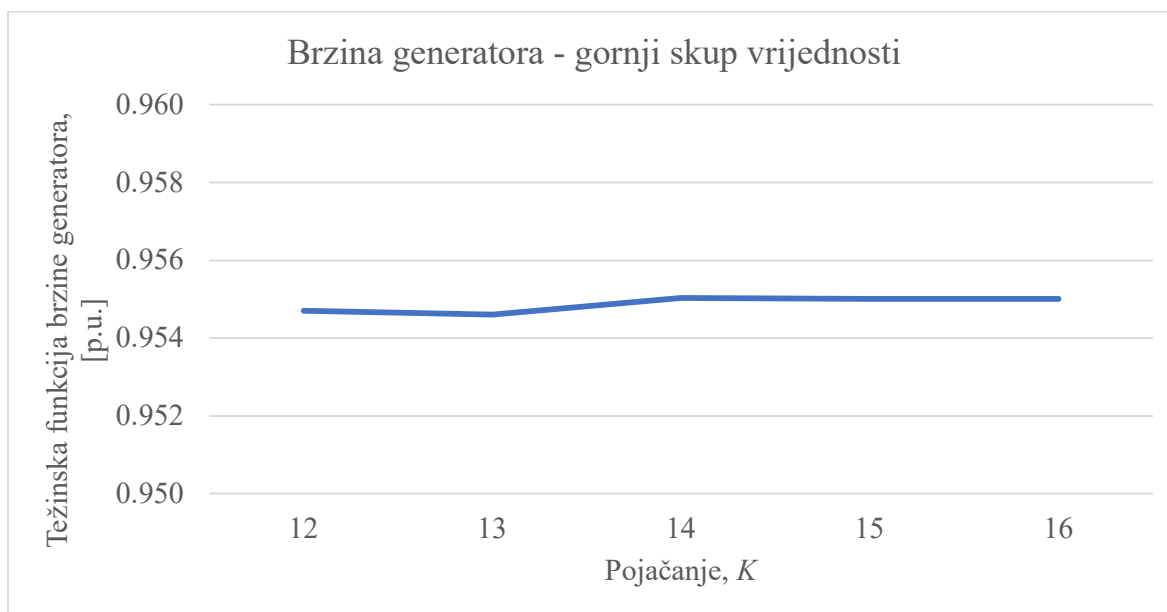
Porastom pojačanja odstupanje djelatne snage (slika 4.31) se povećava u odnosu na vrijednost u ustaljenom stanju. Ako se pogledaju oscilogrami djelatne snage za različite vrijednosti pojačanja,

može se uočiti da odstupanja nisu bila značajna, ali će svakako utjecati na konačnu odluku o izboru parametara stabilizatora.



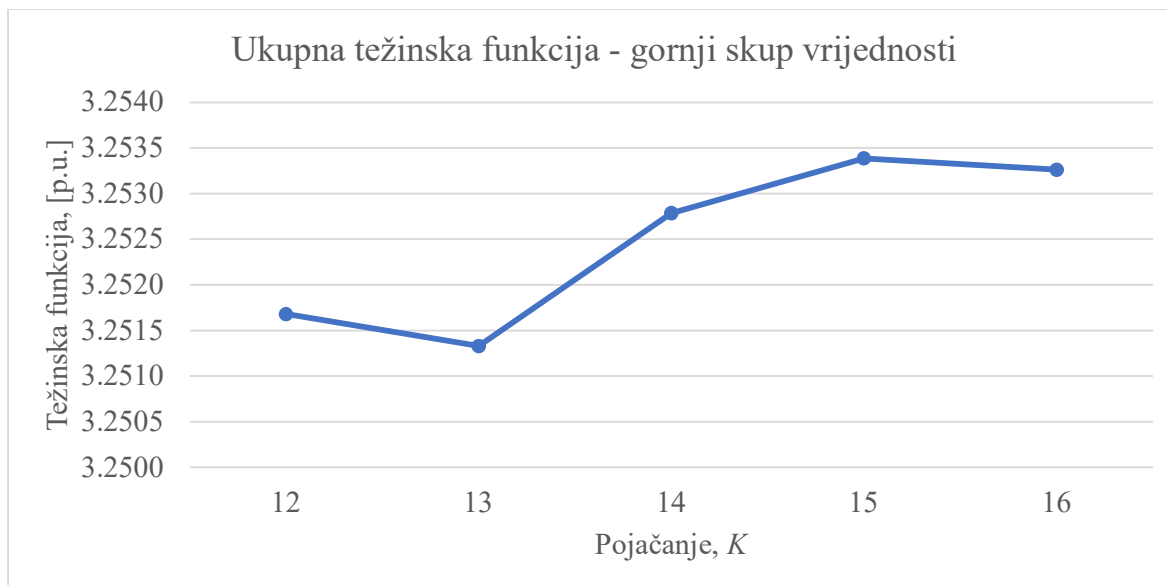
Slika 4.31 Težinska funkcija djelatne snage za različite vrijednosti pojačanja u gornjem skupu vrijednosti, scenarij 1

Brzina generatora, slika 4.32, pak s povećanjem pojačanja opada, za razliku od djelatne snage s iznosima odstupanja značajno višim nego što su za ostale veličine. Kao i u prethodnim slučajevima, ukupnu težinsku funkciju će određivati upravo brzina generatora, dok će prevagu koje će biti optimalno rješenje donijeti težinska funkcija djelatne snage.



Slika 4.32 Ukupna težinska funkcija za različite vrijednosti pojačanja u gornjem skupu vrijednosti, scenarij 1

Ukupna težinska funkcija prikazana je slikom 4.33. Najveću vrijednost postiže za iznos pojačanja  $K = 12$  nakon čega značajno opada. Prema prethodnim razmatranjima, za donji skup kao i gornji, jasno je da u oba skupa najveću vrijednost težinska funkcija ima upravo za taj iznos pojačanja.



Slika 4.33 Ukupna težinska funkcija za različite vrijednosti pojačanja u gornjem skupu vrijednosti, scenarij 1

Odstupanja težinskih funkcija u rasponu 10-13 su gotovo zanemariva te se bilo koja vrijednost u tom rasponu može uzeti kao konačan rezultat bez prevelikog utjecaja na oscilatornu i tranzijentnu stabilnost. Rezultantne težinske funkcije su prikazane tablicom 4.10 i na temelju njih se donosi odluka o tome koju vrijednost pojačanja treba uzeti kao konačnu.

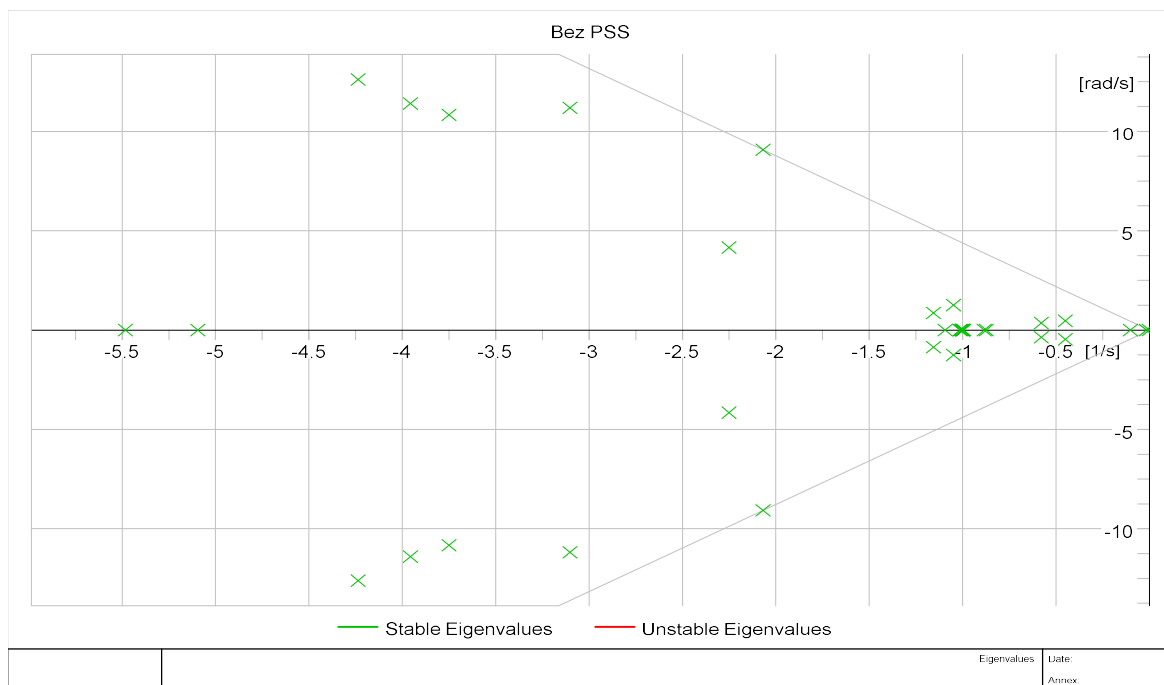
Tablica 4.10 Težinske funkcije za varijacije pojačanja za  $t = 50$  ms, scenarij 1

Pojačanje, $K$	Koeficijent prigušenja	Kut rotora	Djelatna snaga	Brzina generatora	Ukupna težinska funkcija
8	0.269074	0.999996	0.985675	0.943904	3.198649
9	0.299263	0.999996	0.985727	0.947402	3.232388
10	0.307075	0.999996	0.985640	0.950250	3.242961
11	0.310055	0.999996	0.985500	0.952738	3.248289
12	0.311748	0.999996	0.985241	0.954695	3.251680
13	0.312834	0.999996	0.982900	0.955400	3.251130
14	0.313596	0.999996	0.982571	0.956734	3.252897
15	0.314134	0.999996	0.984247	0.959310	3.257687
16	0.314550	0.999996	0.983707	0.960320	3.258573

Kao i u slučaju odabira vremenske konstante, najveći doprinos na ukupnu težinsku funkciju ima prigušenje iz kompleksne frekvencijske domene, odnosno djelatna snaga iz vremenske domene. U ovom slučaju, najveći iznos težinske funkcije, koji zadovoljava uvjete predloženog algoritma ima

pojačanje  $K = 12$ . Međutim, razlika između vrijednosti  $K = 10$  do  $K = 14$  je gotovo zanemariva, što znači da će svaki odabrani iznos povoljno utjecati na smanjenje oscilacija. Iz analize se može zaključiti i da je konačna vrijednost pojačanja jednaka početnoj što nije iznenađujuće s obzirom da početna vrijednost ovisi o parametrima generatora i pojačanju dominantnog moda određenog tim istim generatorom. U konačnici, nakon provedene procedure parametriranja odabran je stabilizator elektromehaničkih oscilacija sa jednom ulaznom veličinom, PSS1A. Kao ulazna veličina odabrana je brzina generatora te su odabrani i postavljeni parametri regulatora - vremenska konstanta visokopropusnog filtera  $T_w = 10$  s, vremenske konstante bloka za faznu kompenzaciju  $T_2 = T_4 = 0.2$  s,  $T_1 = T_3 = T = 0.5$  s i pojačanje  $K = 12$ .

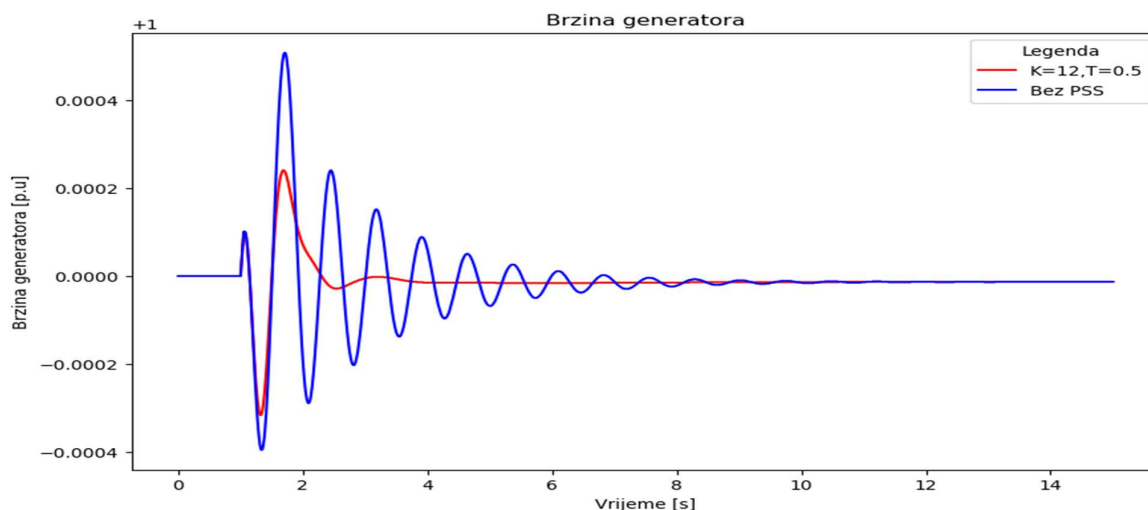
Nakon konačnog odabira parametara stabilizatora elektromehaničkih oscilacije preostaje još samo provesti verifikaciju rezultata koja se provodi usporedbom krivulje mjesta korijena i vremenskih odziva sa i bez stabilizatora elektromehaničkih oscilacija. Slika 4.34 prikazuje oscilatorne modove sa frekvencijama koje odgovaraju lokalnom modu i jasno se uočava da je granica stabilnosti pomjerena u lijevu stranu kompleksne ravnine pri čemu dominantni mod ima prigušenje  $\alpha_{\text{dom}} = -2.9077568735$ , što je znatno veća (apsolutna) vrijednost nego bez stabilizatora elektromehaničkih oscilacija.



Slika 4.34 Krivulja mjesta korijena nakon parametriranja stabilizatora elektromehaničkih oscilacija

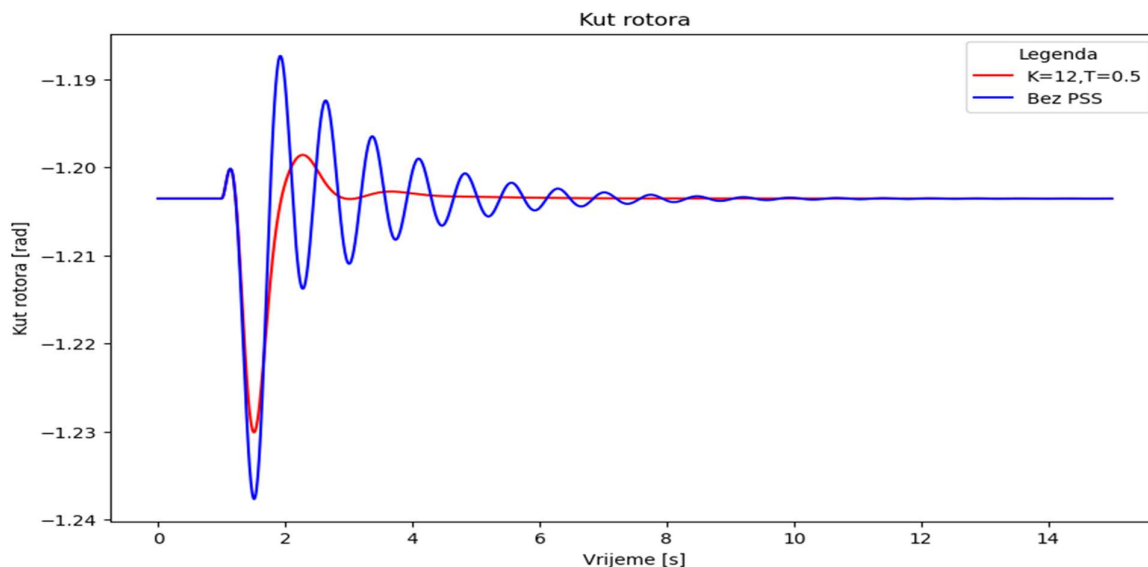
Usporedbom vrijednosti brzine (slika 4.35) prije implementacije stabilizatora elektromehaničkih oscilacija (plava vrijednost) i nakon implementacije stabilizatora (crvena krivulja), čiji su

parametri određeni predloženom metodologijom uočava se značajno smanjenje nadvišenja oscilacija brzine nakon poremećaja. Također, smetnja se brže eliminira te se brže postiže vrijednost kao i prije poremećaja.



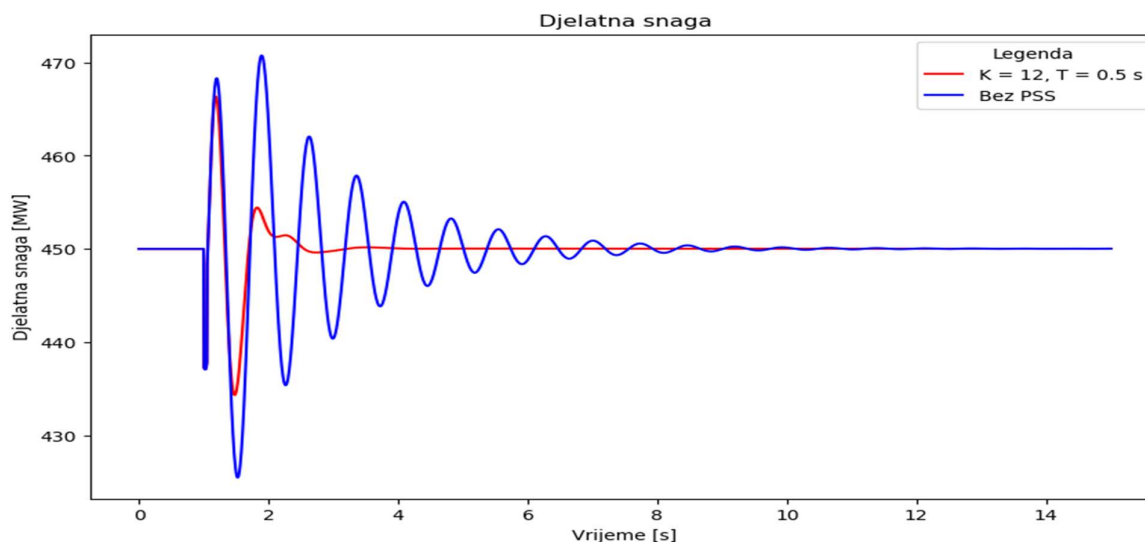
Slika 4.35 Usporedba brzine generatora sa i bez stabilizatora elektromehaničkih oscilacija za  $t = 50 \text{ ms}$ , scenarij 1

Kut rotora (slika 4.36) se nakon ugradnje stabilizatora elektromehaničkih oscilacija (crvena linija) znatno manje mijenja nakon poremećaja nego bez stabilizatora (plava linija). Pojavljuje se samo jedno veće nadvišenje, koje ima amplitudu manju nego osnovni slučaj, a ustaljena vrijednost se postiže nakon otprilike tri sekunde, što je tri puta brže nego bez stabilizatora.



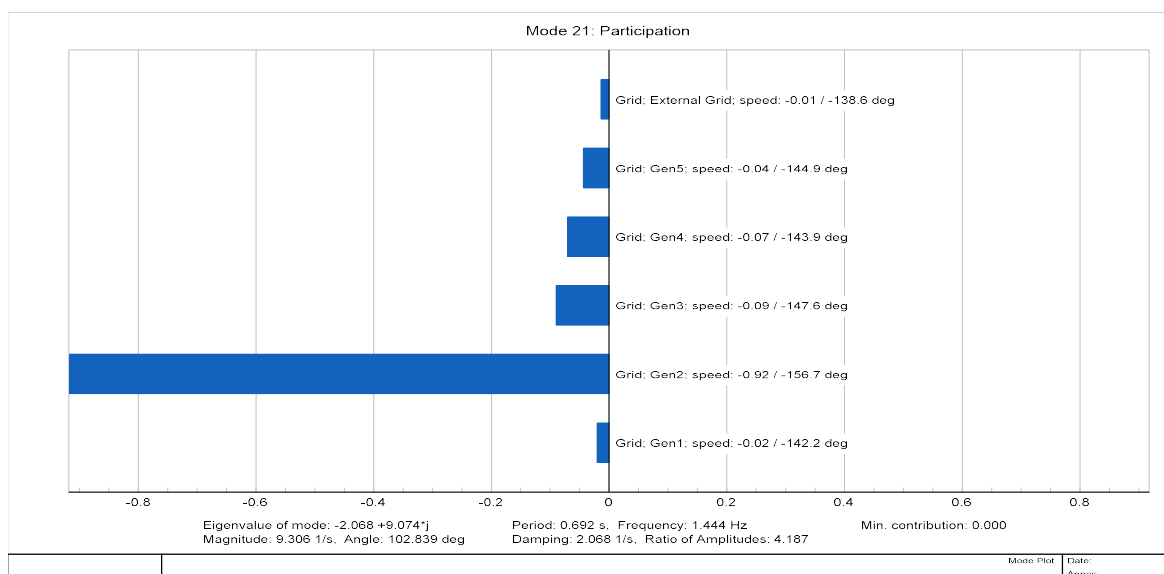
Slika 4.36 Kut rotora sa i bez stabilizatora elektromehaničkih oscilacija za  $t = 50 \text{ ms}$ , scenarij 1

Prednost ugradnje stabilizatora se uočava i kod odziva djelatne snage (slika 4.37). Vrijeme ustaljivanja je znatno kraće, a amplitude oscilacija su manje. Time se smanjuje opasnost od prorade zaštite i isključenja voda.



Slika 4.37 Usporedba djelatne snage generatora sa i bez stabilizatora elektromehaničkih oscilacija za  $t = 50$  ms, scenarij 1

Konačno, u zadnjem koraku verifikacije rezultata potrebno je provesti participacijsku analizu dominantnog moda. Rezultati analize, koja se provodi za isti minimalni doprinos od 0.001 u varijabli brzine pokazuje da je novi dominantni mod izazvan generatorom Gen2 čija je participacija 0.829 (slika 4.38). Ovim se još jednom potvrđuje opravdanost i učinkovitost primjene stabilizatora elektromehaničkih oscilacija.



Slika 4.38 Participacijska analiza dominantnog moda nakon ugradnje stabilizatora elektromehaničkih oscilacija, scenarij 1



## 4.5 Scenarij 2 - Primjena metoda mekog računarstva

U potpoglavlju 4.3 parametri stabilizatora elektromehaničkih oscilacija su odabrani primjenom analitičke metode. Parametriranje se provodi uzastopnom modalnom analizom te simulacijama u vremenskoj domeni u području oko početnih uvjeta što zahtjeva određeno vrijeme računanja, pogotovo ako se za simulacije ne koriste kosimulacijski alati. Kako bi se napravila usporedba, za isti višestrojni sustav se provodi parametriranje stabilizatora primjenom metode mekog računarstva i to četiri različite metode: optimizacija rojem čestica, genetskim algoritmom, simuliranim kaljenjem i tabu pretraživanjem.

### 4.5.1 Metoda roja čestica

Prvi korak je određivanje početnog roja čestica kao skupa mogućih rješenja. U početnom roju su obuhvaćena sva moguća rješenja za kombinaciju pojačanja  $K$  između 1 i 50 te vremensku konstantu  $T$  u rasponu između 0.2 i 1.5 sekundi, što su ujedno donja i gornja granica varijabli. Odabirom početnog roja se definira područje mogućih rješenja unutar kojih se nalazi optimum. Budući da u zadanim rasponima postoji neograničeni broj kombinacija, pojačanje se mijenja u koraku od +1, a vremenska konstanta s korakom 0.1 s te se dobije ukupni broj od 700 mogućih kombinacija. Početni broj iteracija se postavlja na 1000, nakon čega se broj povećava na 1500 i 2000.

Vrijednosti težinskog koeficijenta inercije pri proračunu brzine se uobičajeno uzima kao  $\omega = 0.5$ , a koeficijenti ubrzanja koji ukazuju na sklonost čestice za postizanjem najboljeg osobnog i globalnog položaja  $c_1 = c_2 = 2$ . Rezultati optimizacije su prikazani tablicom 4.11 za različite vrijednosti početnog roja čestica i za različit broj iteracija.

Tablica 4.11 Rezultati metode optimizacije roja čestica, scenarij 2

Broj iteracija	Početni roj	Pojačanje, $K$	Vremenska konstanta, $T$ [s]	Vrijeme optimizacija, $t$ [s]
1000	100	17.61	0.654	3.246
1000	200	13.99	0.517	6.114
1000	300	4.72	0.367	9.218
1000	400	13.34	0.649	11.976
1000	500	25.32	0.976	15.002
1500	100	17.61	0.654	4.902
1500	200	13.99	0.517	8.971
1500	300	4.72	0.367	13.456
1500	400	13.34	0.649	18.165
1500	500	25.32	0.976	22.622

Povećanje broja iteracija utječe na trajanje simulacije, ali nema izravan utjecaj na rezultate. Promjena osnovnog roja čestica, povećanje ili smanjenje broja početnih rješenja dovodi do značajnih odstupanja rezultata. Pretraga cijelog prostora rezultira znatno većim vrijednostima pojačanja i

vremenske konstante jer prepoznaje lokalni ekstrem kao optimalno rješenje. U verifikaciji rezultata zbog jednostavnosti iznos pojačanja se zaokružuje na dvije značajne znamenke, a vremenska konstanta na tri.

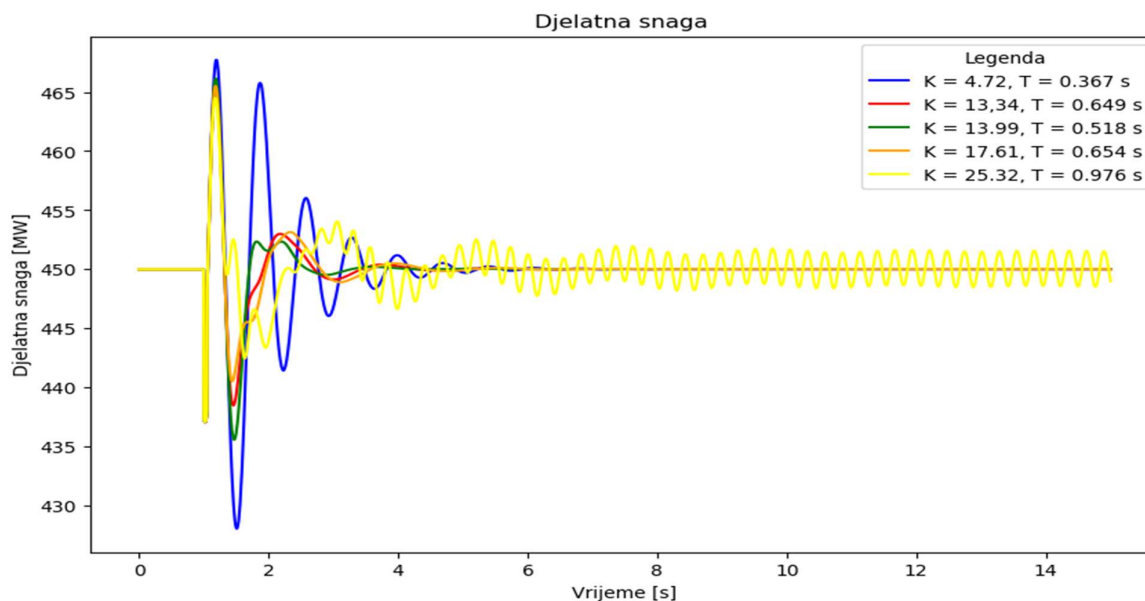
Rezultati dobiveni metodom roja čestica se ispituju modalnom analizom i u vremenskoj domeni kako bi se utvrdila kakvoća parametara. Modalna analiza za svaku kombinaciju parametara pokazuje dobro prigušenje oscilatornih modova, osim u slučaju kada je pojačanja  $K = 25.32$ . Povećanje pojačanja može izazvati negativan učinak na sustav, odnosno može dovesti do oscilatorne nestabilnosti, što se i dogodilo. Tablicom 4.11 prikazani su svi oscilatorni modovi koji odgovaraju lokalnom modu ili su posljedica prigušenja lokalnog moda. Crveno označeni mod je u desnoj strani kompleksne ravnine i uzrokuje oscilatornu nestabilnost sustava.

Tablica 4.12 Oscilatorni modovi za parametre određene metodom roja čestica, scenarij 2

	$K = 4.72,$ $T = 0.367 \text{ s}$	$K = 13.34,$ $T = 0.649 \text{ s}$	$K = 13.99,$ $T = 0.518 \text{ s}$	$K = 17.61,$ $T = 0.654 \text{ s}$	$K = 25.32,$ $T = 0.976 \text{ s}$
1	-1.12557332 $\pm 8.872032839$	-3.0438779542 $\pm 9.1422353425$	-3.0277043181 $\pm 9.1519302203$	-3.0494930485 $\pm 9.1412260888$	-3.0574712806 $\pm 9.1397182653$
2	-3.0997579257 $\pm 9.1411271345$	-3.3828804229 $\pm 10.661793194$	-3.4039350409 $\pm 10.633615842$	-3.3782188108 $\pm 10.667247869$	-3.3736842674 $\pm 10.674569005$
3	-3.3648593211 $\pm 10.700575672$	-3.7821991831 $\pm 11.798334724$	-3.802943328 $\pm 11.742913705$	-3.7822012274 $\pm 11.804587033$	-3.783518492 $\pm 11.810542851$
4	-3.7893040028 $\pm 11.822126808$	-4.5213958944 $\pm 12.584469667$	-4.3951231529 $\pm 12.242944747$	-3.87831322 $\pm 17.105790242$	-4.5219517744 $\pm 12.5843974$
5	-4.5223113685 $\pm 12.584302178$	-4.6163365003 $\pm 15.115981718$	-4.5268343286 $\pm 12.58362021$	-4.5217167171 $\pm 12.584444547$	1.2382366097 $\pm 24.68100439$

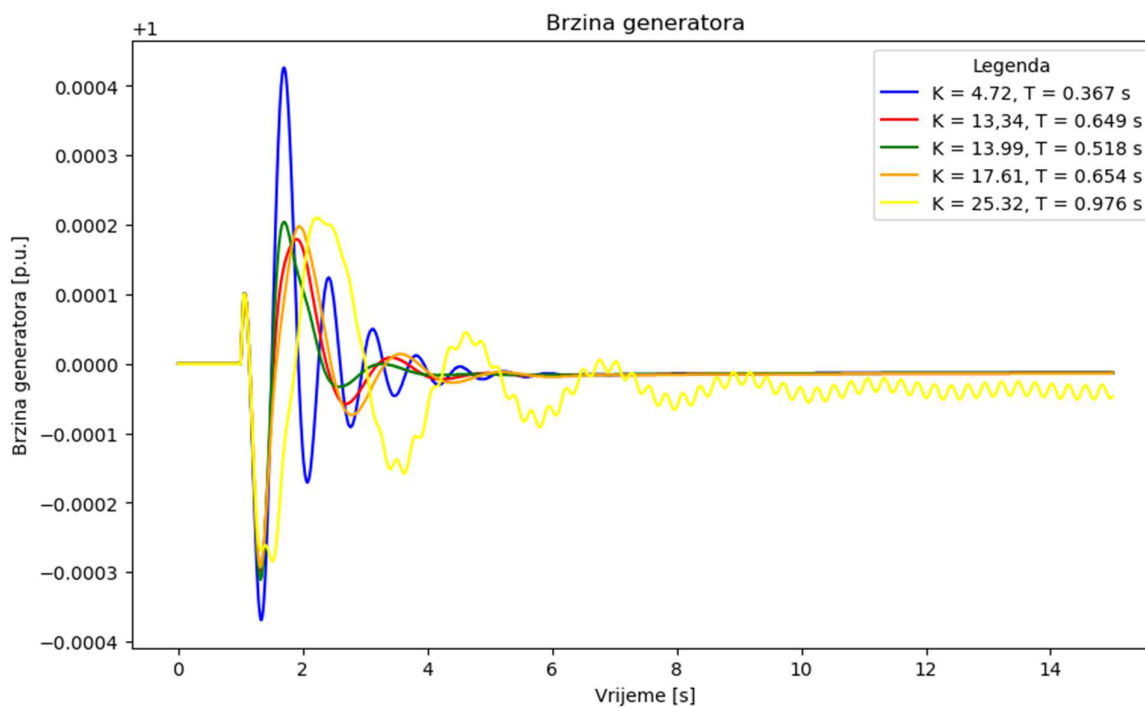
Ukoliko se promatra dominantni pol, najveći pomak dominantnog pola u lijevu stranu kompleksne ravnine daje stabilizator sa parametrima  $K = 17.61$  i  $T = 0.654 \text{ s}$ . Međutim, samo rezultat iz frekvencijske domene ne daje dovoljan uvid u kvalitetu regulacije stoga se promatraju oscilogrami djelatne snage, brzine generatora i kuta rotora (slike 4.39 - 4.43). Slikama 4.39 i 4.40 prikazan je odziv djelatne snage za rezultate dobivene metodom roja čestica. Kao što se može uočiti na slici 4.39 gotovo svi rezultati u konačnici prigušuju oscilacije.

Rezultat  $K = 4.72$ ,  $T = 0.367 \text{ s}$  rezultira značajnijim odstupanjem od vrijednosti snage prije poremećaja, iako se pojavljuje značajno nadvišenje veličine nakon poremećaja i oscilacije duže trajaju. U usporedbi s ostalim rezultatima, ovaj pokazuje najlošiji odziv i može se odbaciti kao moguće rješenje. Rezultat metode optimizacije za veći početni uzorak, koji kao rezultat ima pojačanje  $K = 25.32$  i vremensku konstantu  $T = 0.976 \text{ s}$ , rezultira trajnim oscilacijama. Ovim se potvrđuje da se i ta vrijednost može odbaciti kao mogući rezultat budući da se tim postavkama sustav dovodi u područje oscilatorne, ali i tranzijentne stabilnosti.



Slika 4.39 Djelatna snaga generatora za rezultate dobivene metodom roja čestica, scenarij 2

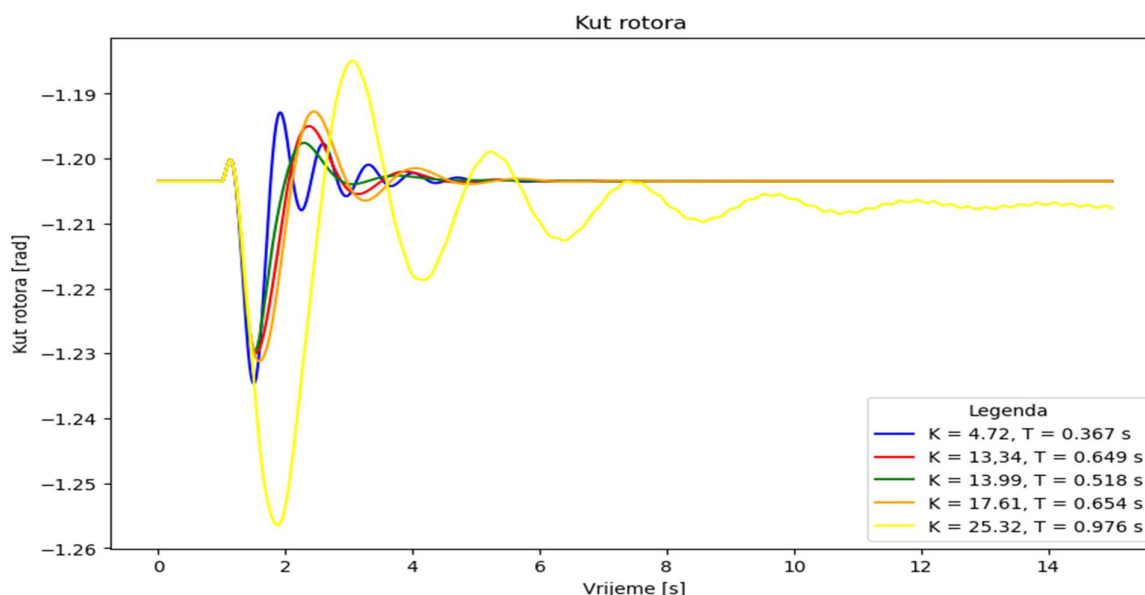
Identični rezultati su i za brzine generatora, prikazan slikom 4.40 prikazan, a rezultatom  $K = 17.61$ ,  $T = 0.654$  s dovodi do neznatno niže konačne brzine generatora i većih oscilacija. Usporedbom preostala dva rezultata jasno je da rezultat dobiven sa 200 početnih čestica,  $K = 13.99$  i  $T = 0.518$  s daje bolji odziv i od vrijednosti dobivene analitičkom metodom.



Slika 4.40 Brzina generatora za rezultate dobivene metodom roja čestica, scenarij 2

Iz rezultata se može zaključiti da se rezultati dobiveni sa početnih 300 i 500 čestica mogu odbaciti jer ne daju dobre rezultate. Kut rotora prikazan je slikom 4.41 na kojoj se jasno vidi da je

odstupanje kuta rotora i njegove promjene nakon poremećaja najmanje pri primjeni stabilizatora čije su vrijednosti parametara pojačanja u rasponu 13 do 18, dok se za veliku vrijednost pojačanja i veliku vremensku konstantu pojavljuju značajne oscilacije kuta.



Slika 4.41 Kut rotora za stabilizator parametriran pomoću metode roja čestica, scenarij 2

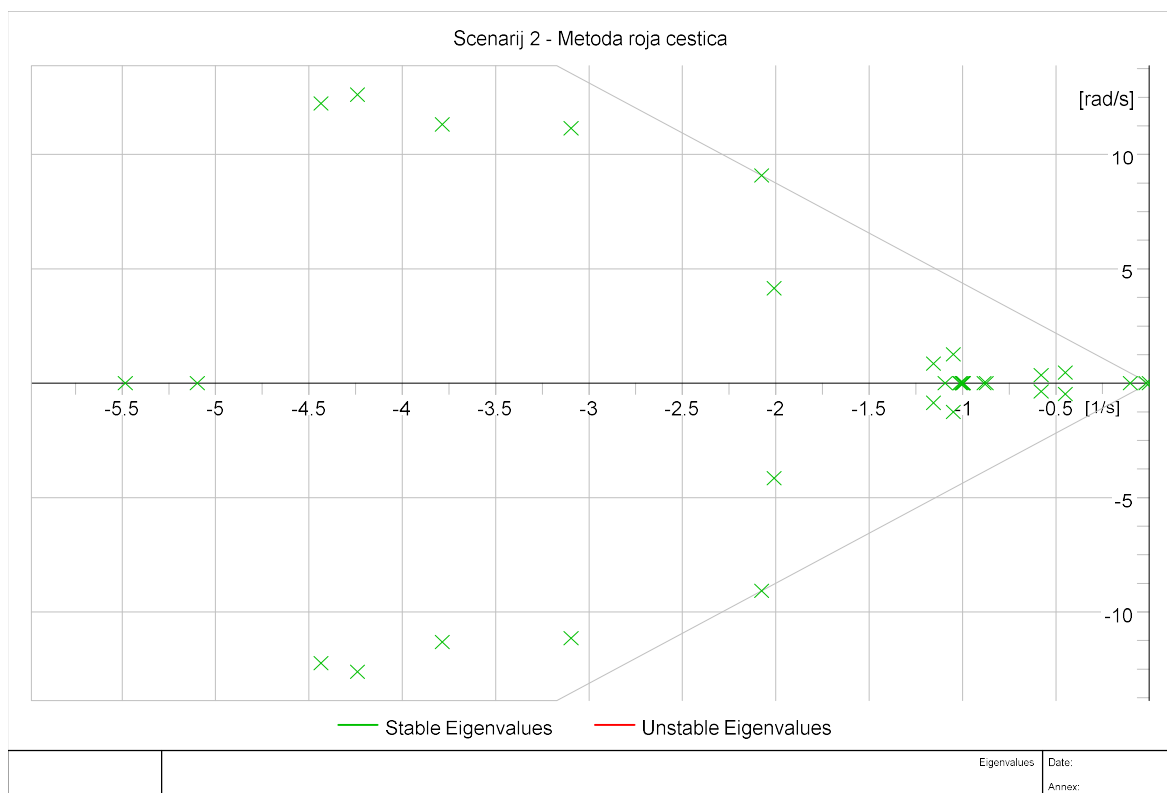
Prema prikazanim rezultatima vidi se da je najmanje nadvišenje i najbrže dostizanje ustaljene vrijednosti za stabilizator parametriran analitičkom metodom. Za rezultate  $K = 4.72$  i  $K = 25.32$  se još jednom potvrđuje da se mogu odbaciti budući da zadnji dovodi do oscilacije kuta rotora, koje su još uočljive i nakon 15 sekundi od pojave poremećaja. Iz rezultata modalne analize i vremenskih odziva mogu se usporediti dobiveni rezultati i odstupanja veličine od ustaljenih vrijednosti. Usporedba se radi preko istih težinskih funkcija kao što su korištene u analitičkoj metodi parametriranja. Koeficijent prigušenja je najveći za rezultat dobiven za početni roj koji sadrži 100 čestica, a za kojeg su parametri  $K = 17.61$ ,  $T = 0.654$  s. Upravo će koeficijent prigušenja utjecati na to da najveću težinsku funkciju, od rezultata koji se uzimaju u razmatranje, ima taj rezultat. Međutim, poboljšanje oscilatorne stabilnosti u ovom slučaju, koje daje najveće prigušenje i smještaj pola duboko u lijevoj strani kompleksne ravnine, nije rezultirao dobrim odzivom u vremenskoj domeni. Tablicom 4.12 prikazane su težinske funkcije određene izrazima 3.40-3.44 za različite parametre pojačanja i vremenske konstante dobivene kao rezultat optimizacijske metode. Rezultati za svaku pojedinačnu funkciju su prikazani kako bi se vidjela razlika vrijednosti funkcija za analitičku i metodu roja čestica.

Tranzijentna stabilnost je narušena budući da se pojavljuju značajne oscilacije u periodu tokom oporavka od kvara i značajnije oscilacije snage. U odnosu na analitičku metodu parametriranja odstupanja su značajno veća što se može vidjeti i sa usporedbenih prikaza rezultata.

Tablica 4.13 Usporedba težinskih funkcija za različite parametre stabilizatora za metodu roja čestica, scenarij 2

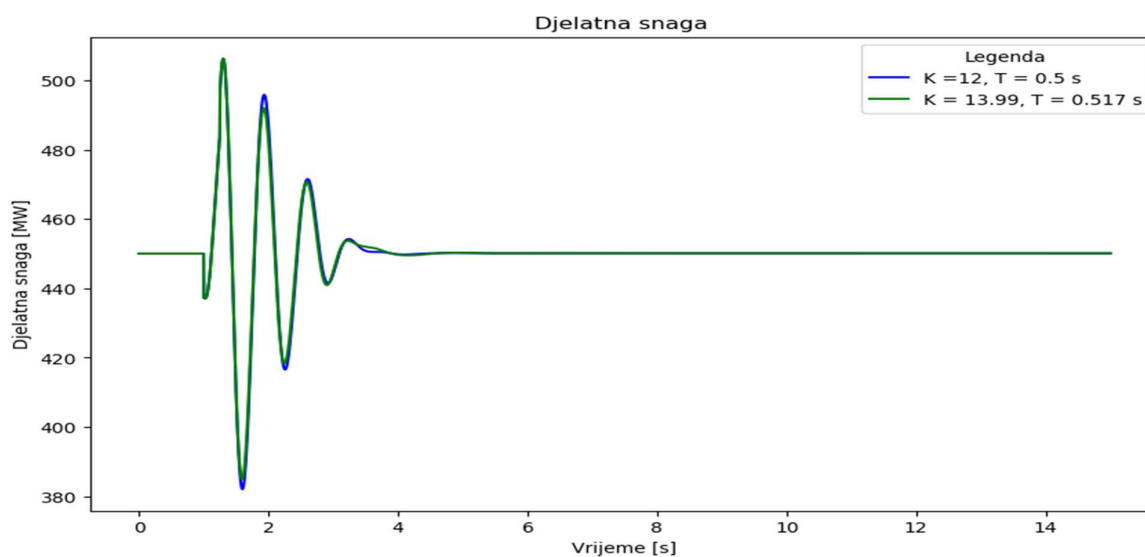
Parametri	Početni broj čestica	Koeficijent prigušenja	Djelatna snaga	Kut rotora	Brzina generatora	Ukupno
$K = 4.72,$ $T = 0.367 \text{ s}$	300	0.125859	-0.244680	0.676284	0.999910	1.557373
$K = 13.34,$ $T = 0.649 \text{ s}$	400	0.315898	0.333754	0.334354	0.999946	1.983952
$K = 13.99,$ $T = 0.518 \text{ s}$	200	0.314085	0.166350	0.512493	0.999939	1.992867
$K = 17.61,$ $T = 0.654 \text{ s}$	100	0.316454	0.455549	0.261295	0.999952	2.033250
$K = 25.32,$ $T = 0.976 \text{ s}$	500	0.317245	0.861727	0.577518	0.999977	2.756467

Kao konačni rezultat odabrano je pojačanje  $K = 13.99$  i vremenska konstanta  $T = 0.518$  sekundi. Krivulja mjesta korijena za stabilizator parametriran metodom roja čestica prikazana je slikom 4.42. Oscilatorni lokalni modovi su prigušeni, pojavljuju se modovi nešto nižih frekvencija koji su također prigušeni u odnosu na sustav bez stabilizatora elektromehaničkih oscilacija.



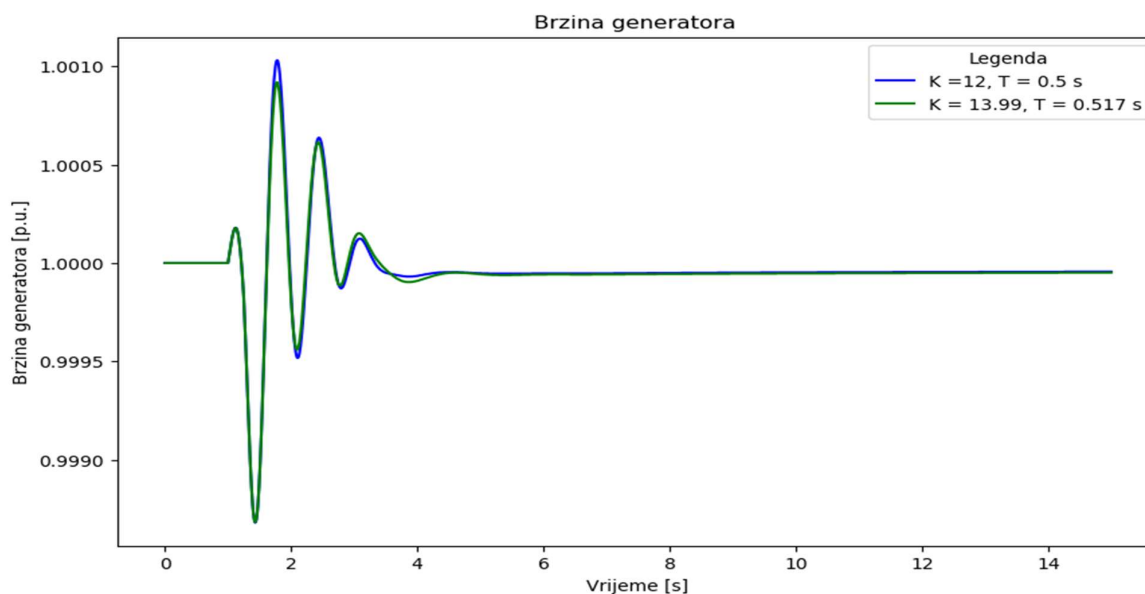
Slika 4.42 Krivulja mjesta korijena, stabilizator elektromehaničkih oscilacija parametriran metodom roja čestica, scenarij 2

Budući da je između te i vrijednosti za 400 čestica ( $K = 13.34$ , vremenska konstanta  $T = 0.649$  sekundi) jako mala razlika, odabrana je vrijednost sa nižom vremenskom konstantom koja pokazuje bolji odziv u vremenskoj domeni, što se očituje i većom vrijednošću ukupne težinske funkcije - u ovom slučaju vrijednosti funkcije cilja. Slikom 4.43 prikazana je usporedba djelatne snage za stabilizator parametriran analitičkom i optimizacijskom metodom iz koje se vidi da je odziv neznatno kvalitetniji pri korištenju optimizacijske metode.



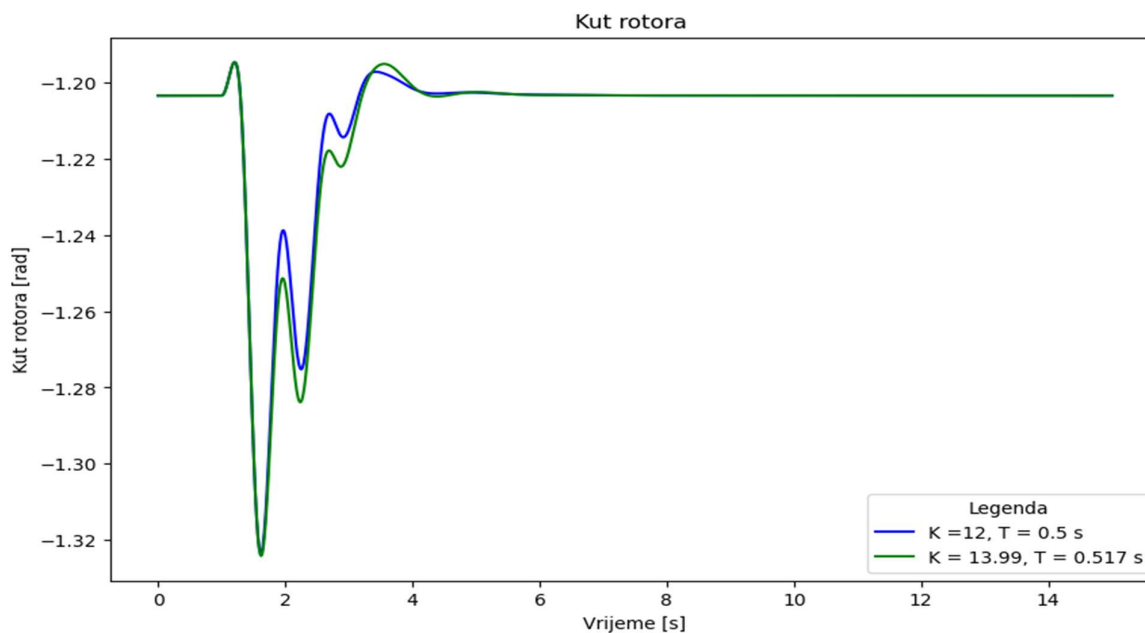
Slika 4.43 Usporedba analitičke i metode roja čestica za djelatnu snagu, scenarij 2

Kao i za djelatnu snagu, i ovdje se vide mala odstupanja koja su posebno prisutna u drugom maksimumu. Međutim, stabilizator elektromehaničkih oscilacija parametriran analitičkom metodom prije dovodi do smirivanja oscilacija i uspostave ustaljenog stanja (slika 4.44).



Slika 4.44 Usporedba analitičke i optimizacijske metode za brzinu generatora, scenarij 2

Kut rotora, odnosno njegovo odstupanje (slika 4.45), ima najmanje promjene pri implementaciji stabilizatora elektromehaničkih oscilacija parametriranog analitičkom metodom.



Slika 4.45 Usporedba analitičke i optimizacijske metode za kut rotora, scenarij 2

#### 4.5.2 Metoda genetskog algoritma

Metodom genetskog algoritma se oponašaju evolucijski procesi te se kao inicijalni korak mora definirati početna populacija. Početnom populacijom se treba obuhvatiti što veći broj mogućih rješenja uz ograničenje parametara pojačanja unutar raspona vrijednosti 1 i 50 te ograničenja vremenske konstante unutar raspona 0.2 do 1.5 sekundi. Početna populacija se generira kao i za metodu roja čestica, a razmatraju se slučajevi različitih brojeva generacija i početne populacije. Za broj generacije se uzimaju vrijednosti 50, 100 i 200, a početna populacija je 100, 200, 300, 400 i 500 jedinki. Rezultati za svaku varijaciju su dani tablicom 4.14.

Tablica 4.14 Rezultati genetskog algoritma za početna ograničenja, scenarij 2

Broj generacija	Broj populacije	Pojačanje, $K$	Vremenska konstanta, $T$ [s]	Vrijeme optimizacije, $t$ [s]
50	100	12.75	0.506	2.149
	200	4.68	1.286	4.305
	300	43.99	1.231	6.492
	400	32.91	0.562	8.539
	500	22.19	0.852	10.746
100	100	10.27	0.602	4.440
	200	35.62	1.454	8.460
	300	23.09	0.306	12.815
	400	30.63	0.762	17.095

Broj generacija	Broj populacije	Pojačanje, $K$	Vremenska konstanta, $T$ [s]	Vrijeme optimizacije, $t$ [s]
	500	4.75	0.292	21.384
200	100	30.92	0.459	8.418
	200	11.11	0.836	16.874
	300	25.39	0.555	25.506
	400	14.62	0.222	34.069
	500	4.62	0.969	42.814

Rezultati pokazuju veliko raspršenje vrijednosti ovisno o početnoj populaciji i broju generacija (mutacijama) pri čemu većina rezultata mogu biti odbačeni budući da ne daju dobar odziv (primjerice izazivaju oscilacije snage ili velika odstupanja brzine i kuta). Razlog tome je veliko područje u kojemu za promatrani sustav jako veliki iznosi pojačanja i vremenskih konstanti ne dovode do poboljšanja stabilnosti već naprotiv, uz njih stabilizator elektromehaničkih oscilacija postaje novi izvor nestabilnosti. Stoga se svi rezultati kod kojih je pojačanje ispod  $K = 10$  i preko  $K = 20$  mogu odbaciti budući da ne dovode do poboljšanja kvalitete regulacije. Za prvi set od 50 generacija se razmatra samo vrijednost koja se dobije pri početnoj populaciji od 100 jedinki, a za koju pojačanje  $K = 12.75$  i vremenska konstanta  $T = 0.506$  sekundi. Ujedno, ova vrijednost je približno jednaka rezultatu dobivenom analitičkom metodom. Za drugi set, 100 generacija se uzima rezultat za početnih 100 jedinki pri čemu je  $K = 10.27$ , a  $T = 0.602$ . Iz trećeg seta u kojemu je mutirano 200 generacija, se uzimaju dvije vrijednosti - za početnu populaciju od 200 i 400 jedinki. Za 200 jedinki pojačanje iznosi 11.11, vremenska konstanta  $T = 0.835$  sekundi, dok je za početnih 400 jedinki pojačanje  $K = 14.62$ , a vremenska konstanta iznosi 0.222 sekunde. Ovi rezultati se nadalje analiziraju s obzirom na utjecaj na oscilatornu i tranzijentnu stabilnost. Oscilatorni modovi za sve kombinacije su prikazane tablicom 4.15.

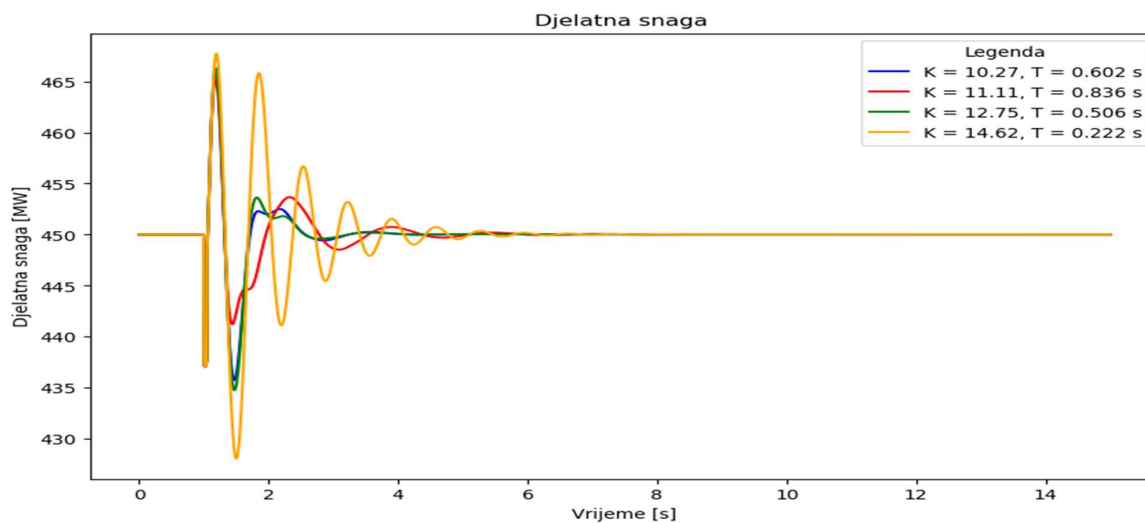
Tablica 4.15 Oscilatorni modovi za parametre određene genetskim algoritmom, scenarij 2

	$K = 10.27,$ $T = 0.602$ s	$K = 11.11,$ $T = 0.836$ s	$K = 12.75,$ $T = 0.506$ s	$K = 14.62,$ $T = 0.222$ s
1	-3.0262146528 ±9.1477705026	-3.0500033663 ±9.1401769017	-3.0170676327 ±9.1595963677	-1.0741495241 ±9.1646126836
2	-3.4085742265 ±10.641695609	-3.378517101 ±10.66840402	-3.4398671574 ±10.603899709	-3.0966907633 ±9.1472178018
3	-3.8115109574 ±11.762305363	-3.782909778 ±11.805090169	-3.8829512367 ±11.842556889	-3.3621570567 ±10.699883746
4	-4.5249646609 ±12.580967142	-4.0112502503 ±17.464280052	-4.0113781804 ±11.342795741	-3.7885759465 ±11.822621408
5	-4.6773288194 ±12.204204089	-4.5217389092 ±12.584415254	-4.5234978446 ±12.584033322	-4.522316574 ±12.584320351

Vrijednosti pojačanja i vremenskih konstanti su približno jednake tako da će o najboljoj vrijednosti odlučivati vrijednost funkcije cilja. Slikom 4.46 prikazana je usporedba djelatne snage nakon

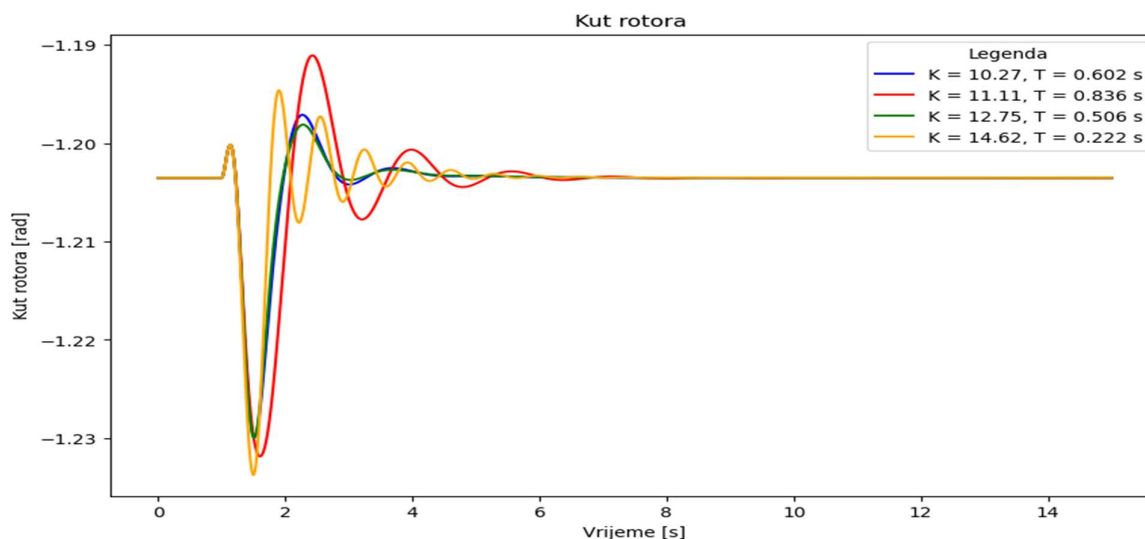


poremećaja uz primjenu stabilizatora elektromehaničkih oscilacija parametriranog genetskim algoritmom s različitim vrijednostima početnih jedinki populacije i broja generacija. Kako se vidi na slici rezultat za pojačanje  $K = 14.62$  i  $T = 0.222$  sekunde (žuta krivulja), dobiven za 200 generacija i 400 početnih jedinki, izaziva značajno nadvišenje u odnosu na ostale varijacije. Stoga se taj rezultat može odbaciti iz daljnje analize. Najmanje nadvišenje je pri pojačanju  $K = 11.11$  i vremenskoj konstanti  $T = 0.836$  sekundi, ali je ujedno za taj slučaj duže vrijeme prigušenja oscilacija. Stoga se preostala dva rezultata mogu pretpostaviti kao potencijalna rješenja.



Slika 4.46 Djelatna snaga generatora za stabilizator parametriran genetskim algoritmom, scenarij 2

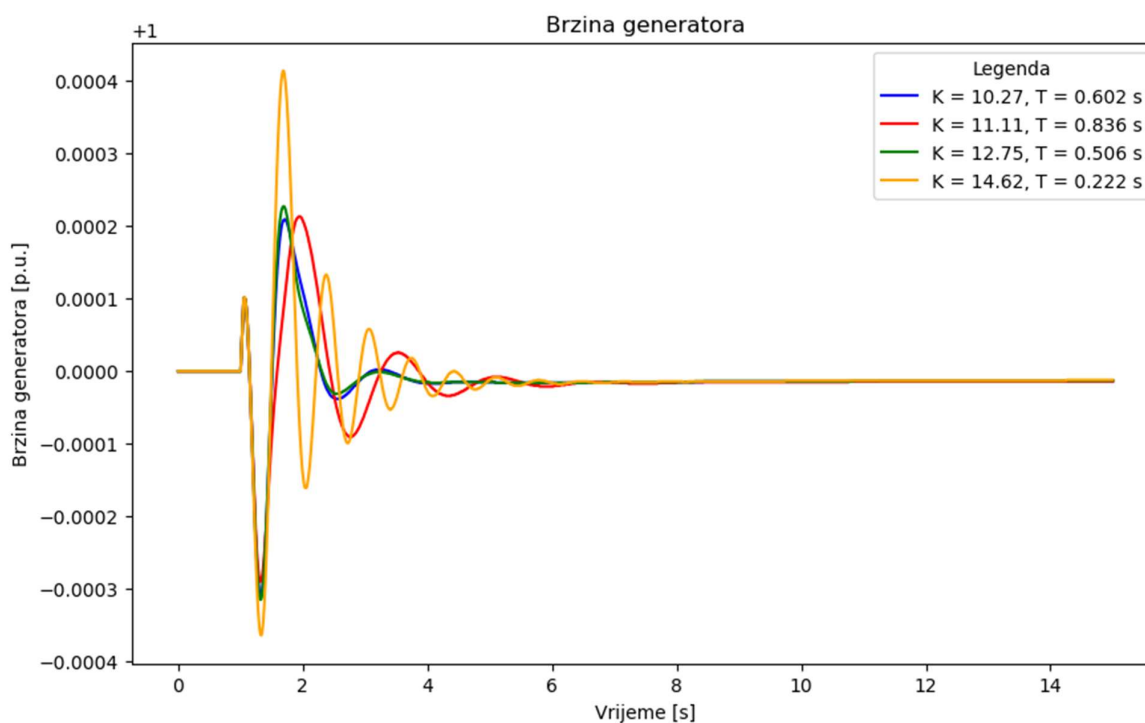
Slično razmatranje vrijedi za kut rotora, prikazano slikom 4.47. Najveće odstupanje je opet za vrijednosti  $K = 14.62$  i  $T = 0.222$  sekunde te pojačanje  $K = 11.11$  i vremensku konstantu  $T = 0.836$  sekundi



Slika 4.47 Kut rotora za stabilizator parametriran genetskim algoritmom, scenarij 2

Usporedbom preostala tri rezultata, jasno je da se najmanje odstupanja kuta postiže kada su parametri stabilizatora određeni analitičkom metodom, odnosno pri primjeni genetskog algoritma za vrijednost koja je približno jednaka tim vrijednostima, pojačanje  $K = 12.75$  i  $T = 0.506$  sekundi, što je vrijednost dobivena pri početnoj populaciji od 100 jedinki i za 50 generacija.

Brzina generatora, prikazana slikom 4.48, ima najveće odstupanje za vrijednost pojačanja  $K = 14.62$  i vremensku konstantu  $T = 0.222$  sekunde, kao i za pojačanje  $K = 11.11$  i vremensku konstantu  $T = 0.836$  sekunde. Zadnja vrijednost ima najmanje nadvišenje, ali i duže vrijeme smirivanja oscilacija kao i nešto nižu konačnu vrijednost. Najbolji rezultat je za slučaj najmanjeg pojačanja,  $K = 10.27$ . U odnosu na odziv sa stabilizatorom parametriranog analitičkom metodom djelovanje je bolje, ali u konačnici se odluka o izboru parametara donosi na temelju vrijednosti funkcije cilja i pripadnih težinskih funkcija promatranih signala.



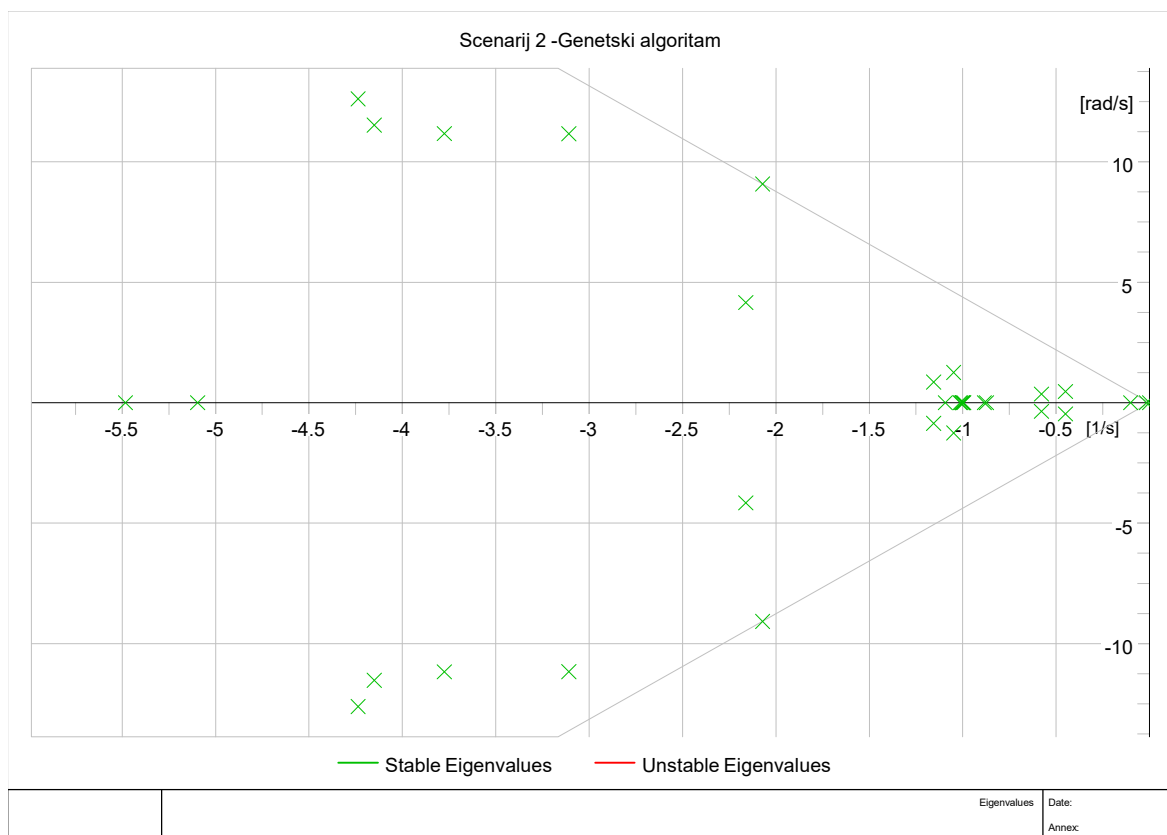
Slika 4.48 Brzina generatora za stabilizator parametriran genetskim algoritmom, scenarij 2

Vrijednosti pojedinačnih težinskih funkcija i funkcije cilja, prikazani su tablicom 4.16 i na temelju njih se određuje konačna vrijednost parametara stabilizatora. Kako se vidi i iz rezultata prikazanih tablicom, najveća težinska funkcija se dobije odziv u kojemu je primijenjen stabilizator parametriran s pojačanjem  $K = 12.75$  i  $T = 0.506$  sekundi. Rezultat s pojačanjem  $K = 10.27$  i  $T = 0.602$ , iako ima nešto veću vrijednost težinske funkcije, daje rezultatno lošije dinamičko vladanje stoga se odbacuje kao potencijalno rješenje.

Tablica 4.16 Usporedba težinskih funkcija za različite parametre stabilizatora za metodu genetskog algoritma, scenarij 2

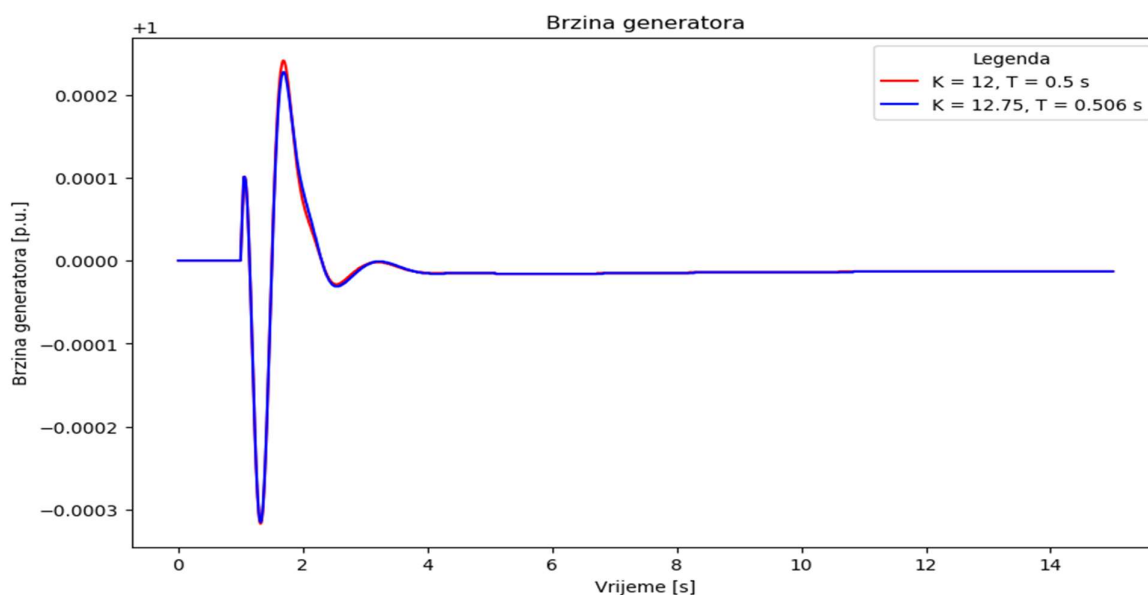
Parametri	$K = 10.27,$ $T = 0.602 \text{ s}$	$K = 11.11,$ $T = 0.836 \text{ s}$	$K = 12.75,$ $T = 0.506 \text{ s}$	$K = 14.62$ $T = 0.222 \text{ s}$
Koeficijent prigušenja	0.314075	0.316534	0.312854	0.320662
Djelatna snaga	0.959340	0.967310	0.956514	0.896997
Kut rotora	0.983999	0.971531	0.984882	1.000000
Brzina generatora	0.999996	0.999996	0.999997	0.
Ukupno	3. 257411	3. 104177	3. 254247	3. 217653

Krivulja mjesta korijena za stabilizator parametriran navedenim vrijednostima prikazana je slikom 4.49. U odnosu na krivulju koja se dobije kada u uzbudni krug generatora nije implementiran stabilizator elektromehaničkih oscilacija, vidi se poboljšanje oscilatorne stabilnosti budući da su polovi pomaknuti u lijevu stranu kompleksne ravnine.



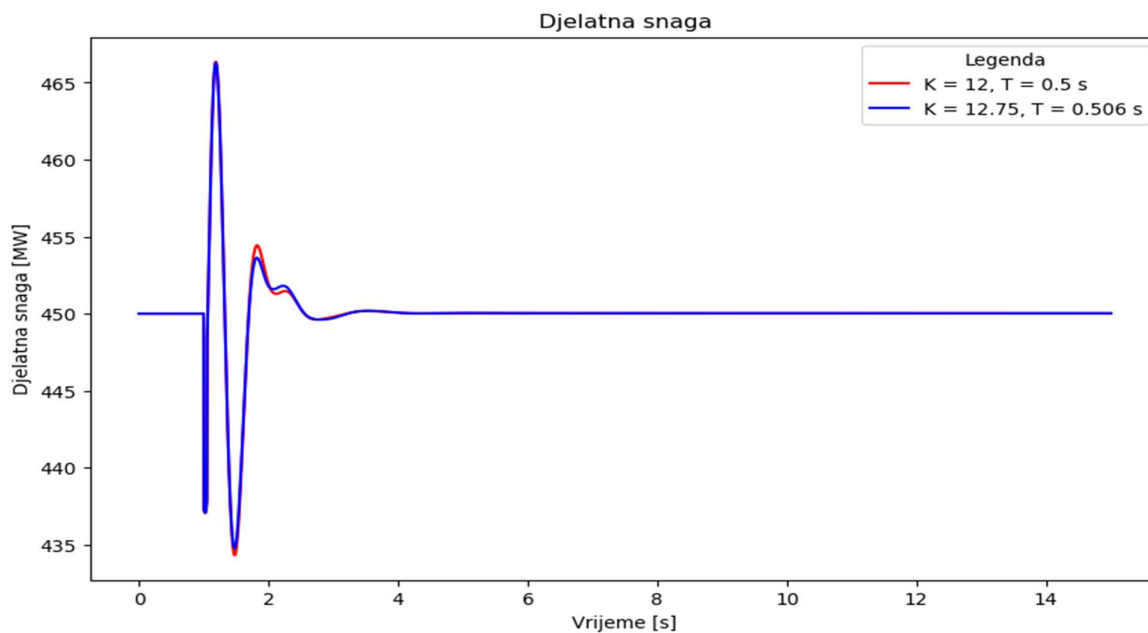
Slika 4.49 Krivulja mjesta korijena, stabilizator elektromehaničkih oscilacija parametriran genetskim algoritmom, scenarij 2

Usporedba odziva sa odzivom stabilizatora parametriranog analitičkom metodom je prikazana slikama 4.50-4.52. Brzina generatora je prikazana prvom slikom i iz nje se vidi da metoda genetskog algoritma rezultira boljim odzivom budući da je nadvišenje niže.



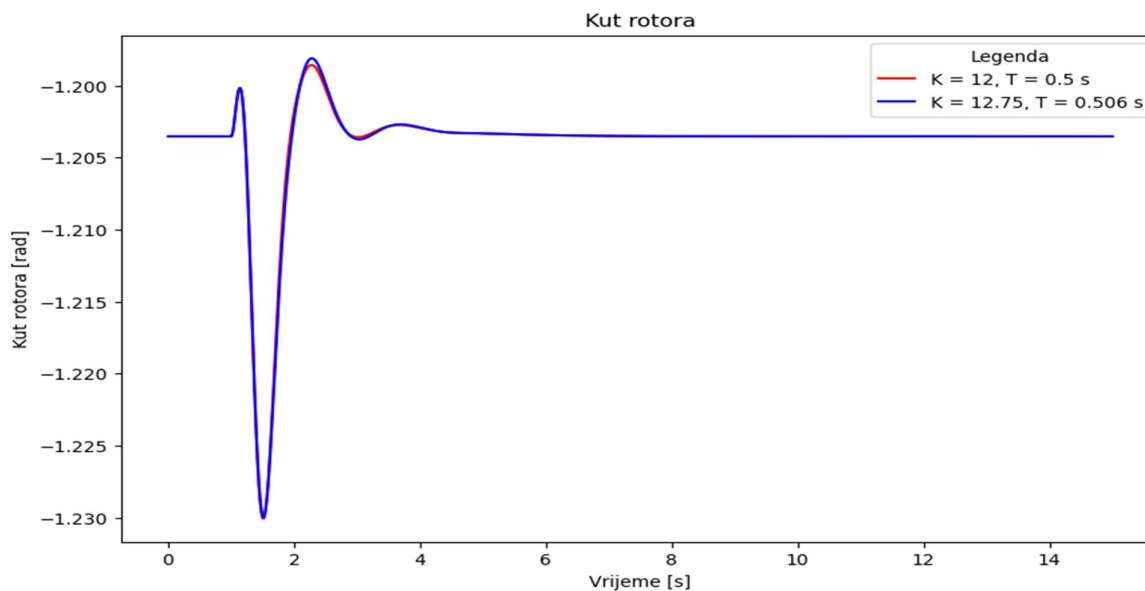
Slika 4.50 Usporedba odziva brzine za analitičku metodu i genetski algoritam, scenarij 2

Ista situacija, manje nadvišenje, je i za slučaj djelatne snage. Vrijednost djelatne snage postiže konačnu vrijednost za isti vremenski period kao i kada se stabilizator parametrira analitičkom metodom, ali se može uočiti manja vrijednost djelatne snage u periodu dok traju oscilacije snage.



Slika 4.51 Usporedba odziva djelatne snage za analitičku metodu i genetski algoritam

Slikom 4.53 prikazana je promjena kuta rotora i tu se uočava da stabilizator parametriran analitičkom metodom dovodi do manje amplitude oscilacija nego stabilizator čiji su parametri određeni metodom genetskog algoritma.



Slika 4.52 Usporedba odziva kuta rotora za analitičku metodu i genetski algoritam

Iz navedenih rezultata se vidi da povećanje broja mutacija na velikom prostoru pretraživanja može dovesti do konvergencije u neželjenom smjeru prema lokalnom minimumu. Manja početna populacija ujedno znači manje područje pretraživanja unutar kojeg se traži lokalni ekstrem. Također, pri formiranju početne populacije uzete su u obzir sve moguće kombinacije, čak i one koje bi već u startu trebale biti odbačene zbog toga što rezultat može odvesti u nestabilnost budući da nije postavljeno dodatno ograničenje prostora koji treba pretražiti nego su granice definirane prema preporukama iz literature. Sužavanjem područja se brže dolazi do konvergencije, ali i približava rješenjima. Od predloženih odziva za različite početne uvjete, dobiveno je rješenje koje je približno jednako kao rješenje dobiveno analitičkom metodom. Poznavanjem područja lokalnih ekstrema i dobrim odabirom broja jedinki se na taj način može dobiti rješenje i optimalni parametri koji će dati jednako dobar odziv kao i u slučaju analitičke metode. Sa druge strane, rezultat može biti i takav da će dovesti do toga da stabilizator elektromehaničkih oscilacija postane izvor nestabilnosti u sustavu.

#### 4.5.3 Metoda simuliranog kaljenja

Metoda koja se često koristi u rješavanju optimizacijskih problema je metoda simuliranog kaljenja. Početni parametri su ograničenje pojačanja  $K$  unutar raspona 1 do 50 te vremenske konstante  $T$  između 0.2 i 1.5 sekundi. Početni uvjeti i moguća rješenja su postavljena kao i za prethodne metode

i odabran je eksponencijalni plan hlađenja s koeficijentom hlađenja 0.95. Analiza osjetljivosti je provedena za različite početne temperature i početne uvjete te za 1500 iteracija. Budući da se uz navedena ograničenja dobiju rezultati čije je pojačanje preko 20, koje je rezultiralo pogoršanim pokazateljima stabilnosti, pojačanje je ograničeno na vrijednosti do  $K = 20$ . Rezultati su prikazani tablicom 4.17 a može se uočiti da su rezultati za različite ulazne parametre jako bliski. Pojačanje u svakoj iteraciji ima istu vrijednost, a vremenska konstanta se neznatno razlikuje za pojedine slučajeve.

Tablica 4.17 Rezultati optimizacije metodom simuliranog kaljenja, scenarij 2

Početna temperatura	Broj iteracija	$K$	$T$ [s]	Vrijeme [s]
500	1500	14	0.331	0.031258
1000	1500	14	0.371	0.031254
1500	1500	14	0.634	0.033191
2000	1500	14	0.330	0.031246

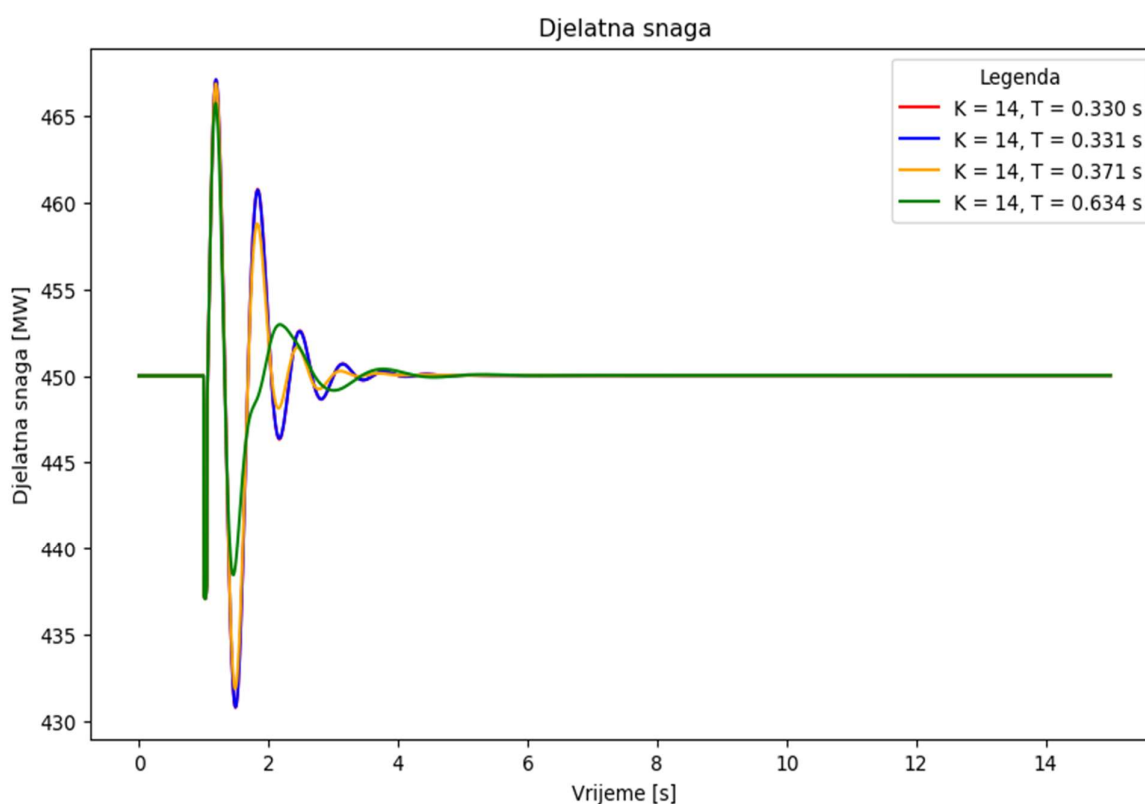
Budući da se rezultati za početnu temperaturu 500 i 2000 podudaraju, u nastavku su analizirane tri kombinacije parametara: pojačanje  $K = 14$  i vremenska konstanta  $T = 0.331$  sekundi, pojačanje  $K = 14$  i vremenska konstanta  $T = 0.371$  sekundi te  $K = 14$  i vremenska konstanta  $T = 0.634$  sekundi. Svojstvene veličine, odnosno oscilatorni modovi za sve tri vrijednosti su prikazane tablicom 4.18. Budući da su vrijednosti bliske, tako su i oscilatorni modovi približno jednakih iznosa.

Tablica 4.18 Oscilatorni modovi za stabilizator parametriran metodom simuliranog kaljenja, scenarij 2

	$K = 14,$ $T = 0.331$ s	$K = 14,$ $T = 0.371$ s	$K = 14,$ $T = 0.634$ s
1	-1.8905822095 ±9.4908505113	-2.35585917 ±9.6642154537	-3.0439214432 ±9.1424296673
2	-3.1179200158 ±9.1759601171	-3.1177160599 ±9.221775954	-3.3827046316 ±10.661643991
3	-3.3561745535 ±10.715113981	-3.3516900545 ±10.732958085	-3.7820004554 ±11.798329319
4	-3.7908075724 ±11.827041189	-3.7930591353 ±11.83066236	-4.521396656 ±12.58448056
5	-4.5224232441 ±12.584306321	-4.5225051075 ±12.584294174	-4.5830302617 ±15.111245867

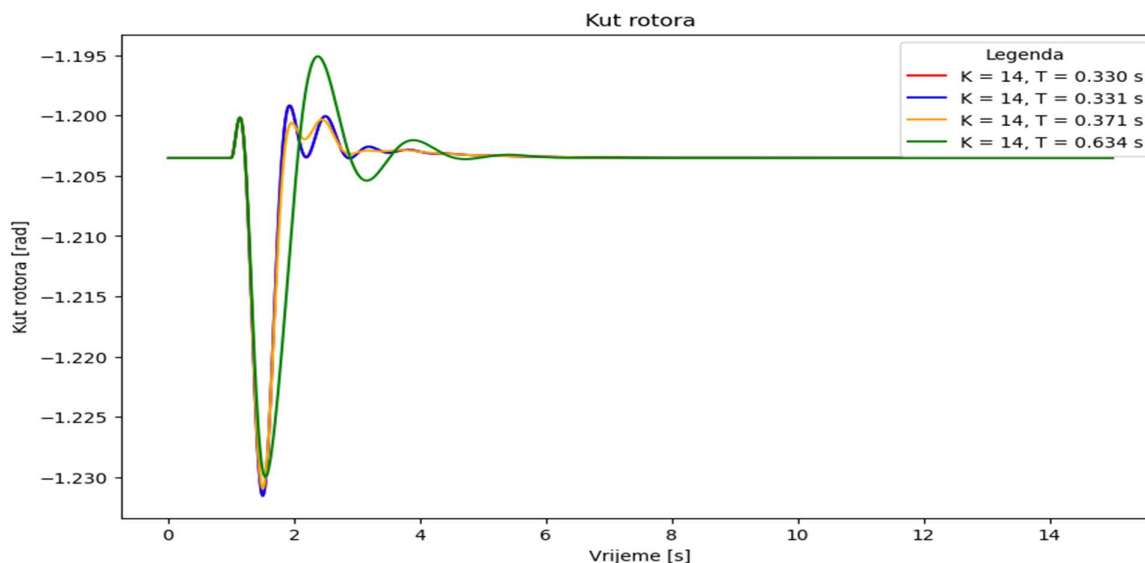
U odnosu na sustav bez stabilizatora elektromehaničkih oscilacija, jasno je da postoji poboljšanje oscilatorne stabilnosti. U vremenskoj domeni se također može uočiti razlika u odzivima, kao što je prikazano slikama u nastavku. Djelatna snaga je prikazana slikom 4.53 i uočavaju se razlike odstupanja veličine pri postavljanju različitih vremenskih konstanti. Povećanjem vremenske konstante smanjuje se oscilacija nakon poremećaja. Amplituda oscilacija je manja, ali je vrijeme postizanja ustaljenog stanja duže.

Najmanje nadvišenje i najkraće vrijeme ustaljivanja se postiže se stabilizatorom parametriranim pojačanjem  $K = 14$  i s vremenskom konstantom  $T = 0.634$  sekunde. U ovom slučaju, s obzirom na manji broj mogućih kombinacija, odzivi su uspoređeni s analitičkom metodom u odnosu na koju se vidi nešto veće odstupanje amplituda oscilacija kao i duže vrijeme ustaljivanja.



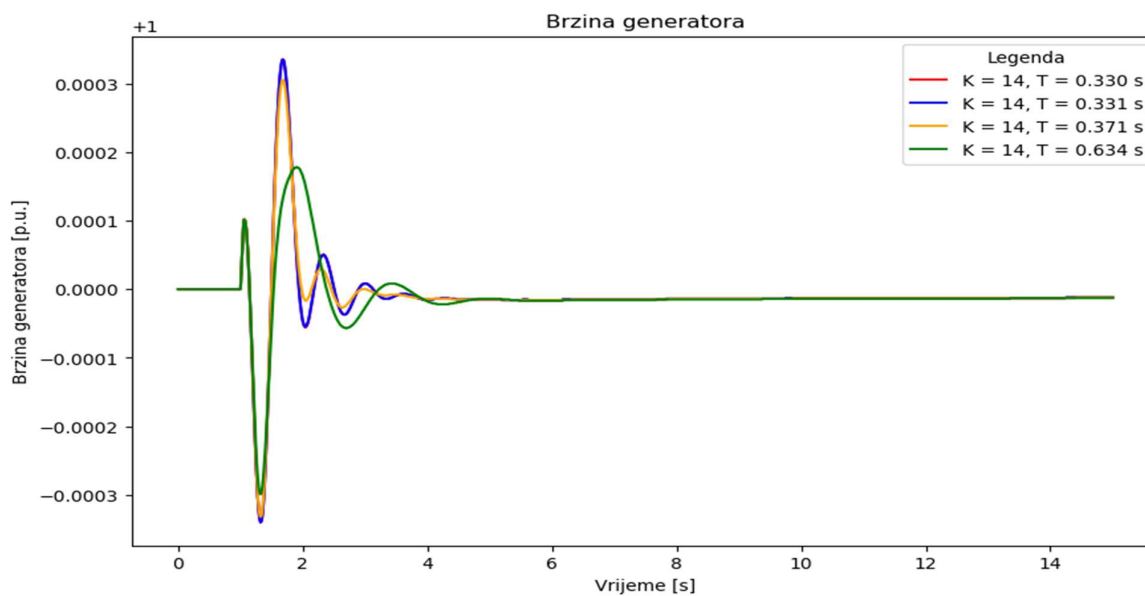
Slika 4.53 Djelatna snaga generatora za stabilizator parametriran metodom simuliranog kaljenja, scenarij 2

Najveće oscilacije kuta rotora (slika 4.54) su rezultat primjene stabilizatora čiji je parametar vremenske konstante  $T = 0.634$  sekunde. Najkraće vrijeme ustaljivanja ima stabilizator s vremenskom konstantom  $T = 0.371$  sekundom uz manja nadvišenja nego za stabilizator parametriran analitičkom metodom.



Slika 4.54 Kut rotora generatora za stabilizator parametriran metodom simuliranog kaljenja, scenarij 2

Kada se usporede brzine generatora (slika 4.55) pri primjeni stabilizatora različitih vremenskih konstanti, uočava se da veća vremenska konstanta rezultira manjim oscilacijama brzine uz brže postizanje vrijednosti kao prije poremećaja.



Slika 4.55 Brzina generatora za stabilizator parametriran metodom simuliranog kaljenja, scenarij 2

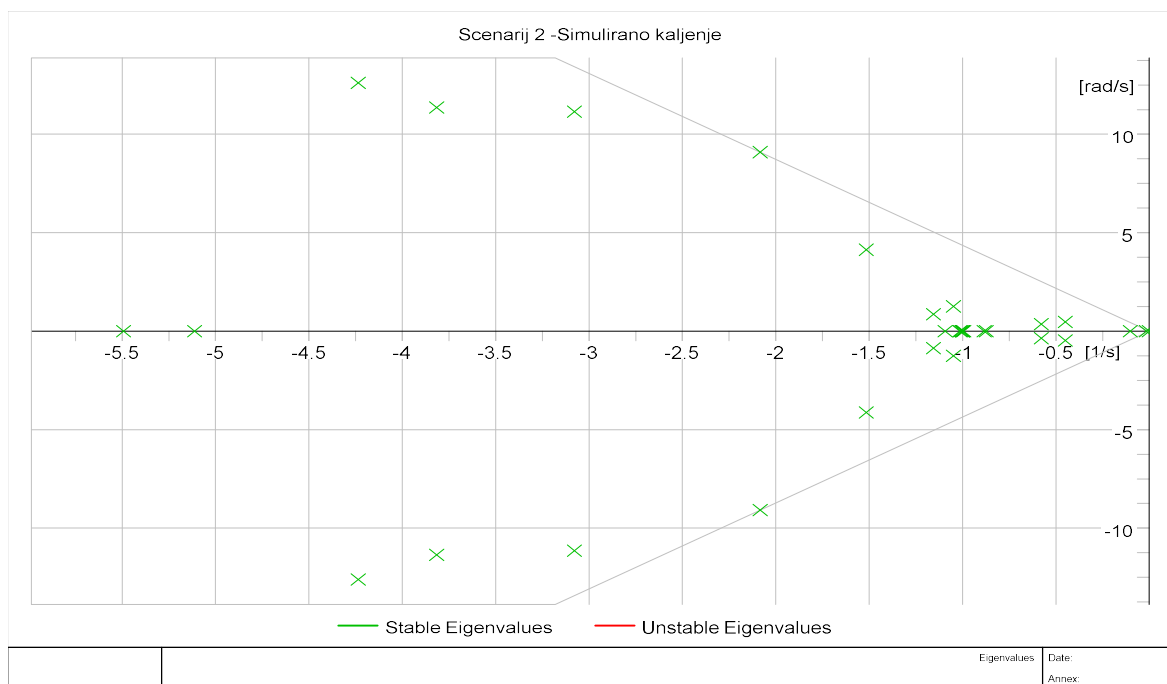
Na slikama 4.53-4.55 se vidi da će se primjenom stabilizatora elektromehaničkih oscilacija parametriranog metodom simuliranog kaljenja postići poboljšanje oscilatorne i tranzijentne stabilnosti, a optimalna vrijednost pojačanja i vremenske konstante se uzima za najveću vrijednost funkcije cilja, prema tablici 4.19.



Tablica 4.19 Usporedba težinskih funkcija za različite parametre stabilizatora, metoda simuliranog kaljenja, scenarij 2

Parametri	$K = 14,$ $T = 0.331$ s	$K = 14,$ $T = 0.371$ s	$K = 14,$ $T = 0.634$ s
Koeficijent prigušenja	0.195362	0.236836	0.315896
Djelatna snaga	0.933082	0.941572	0.965661
Kut rotora	0.985696	0.985995	0.979715
Brzina generatora	0.999995	0.999996	0.999997
Ukupno	3.114135	3.164399	3.261268

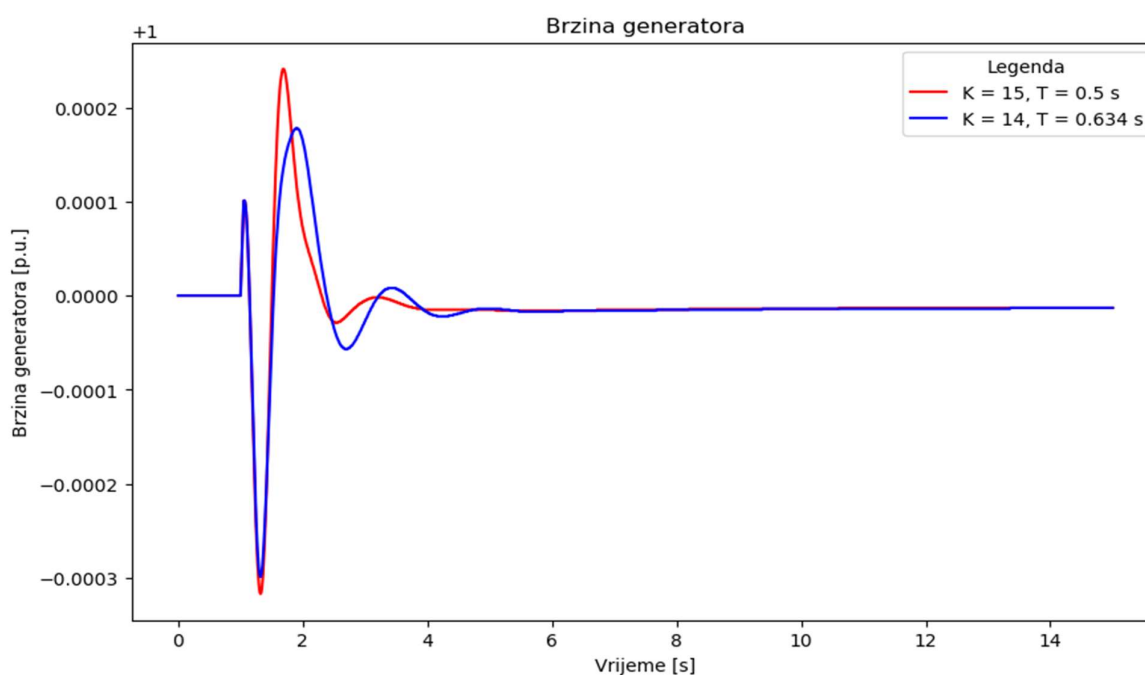
Iz ukupnih rezultata jasno se može razaznati da kombinacija parametara, pojačanje  $K = 14$  i vremenska konstanta  $T = 0.634$  sekunde, ima značajno veću ukupnu težinsku funkciju od ostalih kombinacija. Slika 4.56 prikazuje krivulju mjesta korijena iz koje se vidi značajno unaprjeđenje oscilatorne stabilnosti. Dominantni mod ima prigušenje  $-3.0439214432$  1/s što znači da je, u odnosu na sustav bez stabilizatora, oscilatorna stabilnost poboljšana.



Slika 4.56 Krivulja mjesta korijena, stabilizator elektromehaničkih oscilacija parametriran metodom simuliranog kaljenja, scenarij 2

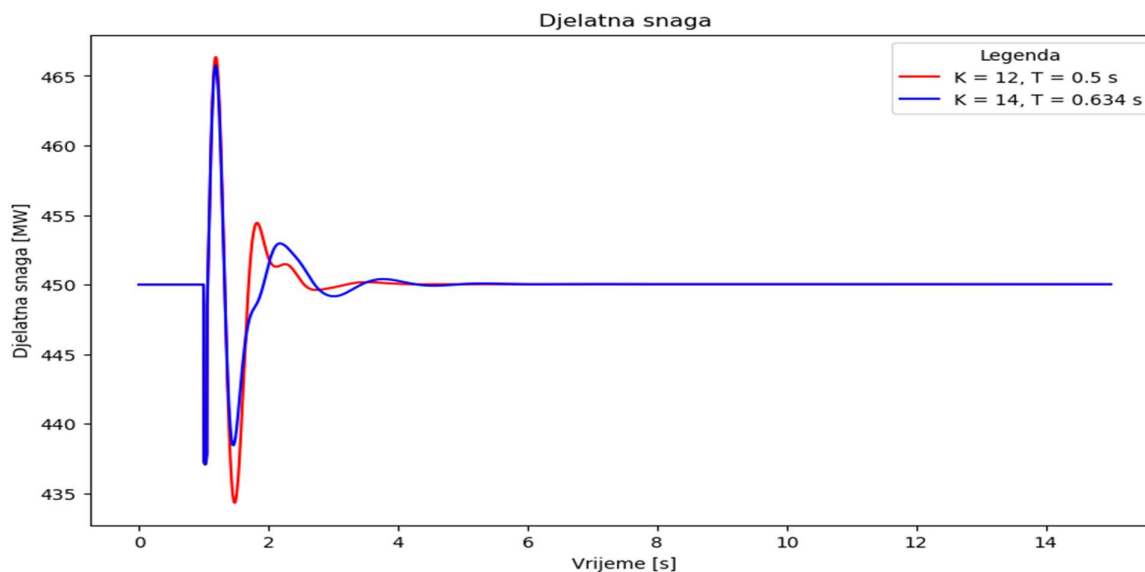
Utjecaj pokazatelja kompleksne frekvencijske domene ne predstavlja odlučujući faktor tako da se može uzeti vrijednost koja rezultira najmanjim odstupanjima i oscilacijama veličina u vremenskoj domeni. U konačnici, prikazuje se usporedba metoda analitičkog određivanja parametara stabilizatora elektromehaničkih oscilacija s parametrima određenim metodom simuliranog kaljenja.

Usporedba odziva brzine uz primjenu stabilizatora parametriranog analitičkom metodom s parametrima  $K = 12$  i  $T = 0.5$  sekundi sa stabilizatorom parametriranim metodom simuliranog kaljenja i parametara  $K = 14$ ,  $T = 0.634$  sekunde dana je slikom 4.57. Stabilizatorom parametriranim analitičkom metodom se postiže manja valovitost veličine, odnosno brže postizanje vrijednosti kao prije poremećaja. Međutim, oscilacije su neznatno više nego primjenom stabilizatora parametriranog optimizacijskom metodom.



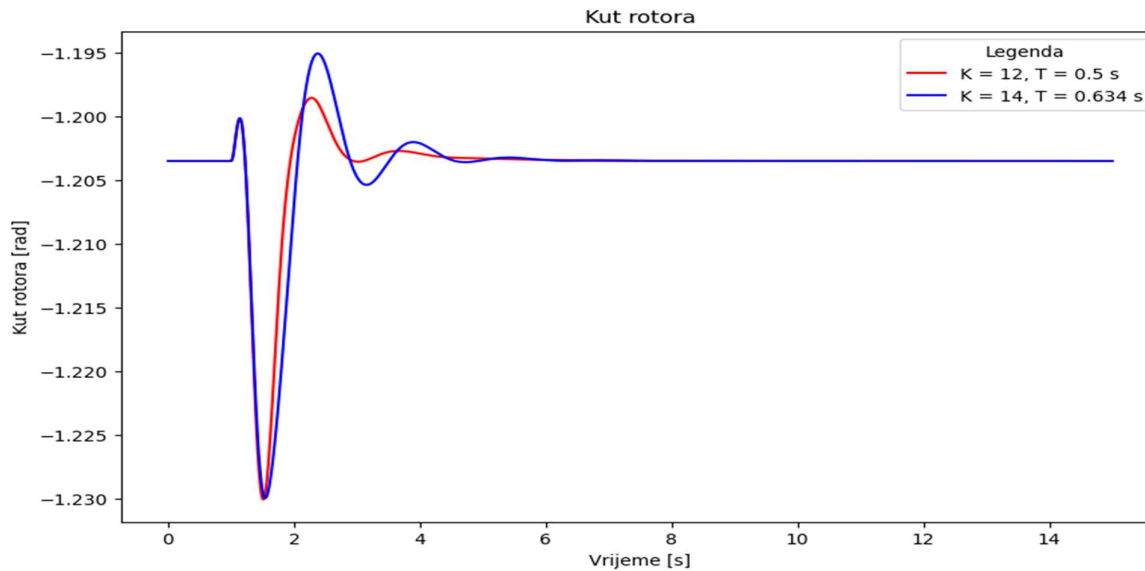
Slika 4.57 Usporedba odziva brzine generatora za analitičku metodu i simulirano kaljenje, scenarij 2

Slični su rezultati i za djelatnu snagu (slika 4.58). Stabilizator parametriran metodom simuliranog kaljenja daje bolji rezultat po pitanju oscilacija snage kratko nakon poremećaja, međutim oscilacije duže traju - potrebno je skoro pet sekundi da se postigne vrijednost snage kao prije poremećaja. Pored većih oscilacija i vrijeme postizanja ustaljene vrijednosti traje duže u odnosu na odziv stabilizatora parametriranog analitičkom metodom.



Slika 4.58 Usporedba odziva djelatne snage za analitičku metodu i simulirano kaljenje, scenarij 2

Slika 4.59 pokazuje usporedbu kuta rotora za stabilizator parametriran analitičkom i metodom simuliranog kaljenja. Iako se uočavaju poboljšanja odziva brzine generatora i djelatne snage, stabilizator parametriran predloženom optimizacijskom metodom dovodi do većih oscilacija vrijednosti kuta nakon poremećaja.



Slika 4.59 Usporedba odziva kuta rotora za analitičku metodu i simulirano kaljenje

#### 4.5.4 Tabu pretraživanje

Tabu pretraživanje je metaheuristička metoda kojom se provodi lokalno pretraživanje u cilju pronalaska optimuma. Metoda je ispitana na istom početnom sustavu kao i prethodne metode, a rezultati se promatraju za različit broj iteracija. Ovisno o broju iteracija, rezultati se mogu razlikovati

budući da se pretražuje različito područje i postoji mogućnost izlaska iz područja lokalnog ekstrema koje u nekim slučajevima može biti i optimalno rješenje. Rezultati tabu pretraživanja za 500, 1000, 1500 i 2000 iteracija su prikazani tablicom 4.20. Kod ove metode je specifično što je pretraživanje jako brzo, rezultat se dobije gotovo trenutno zbog čega vrijeme nije prikazano u tablici.

Tablica 4.20 Rezultati optimizacije metodom tabu pretraživanja, scenarij 2

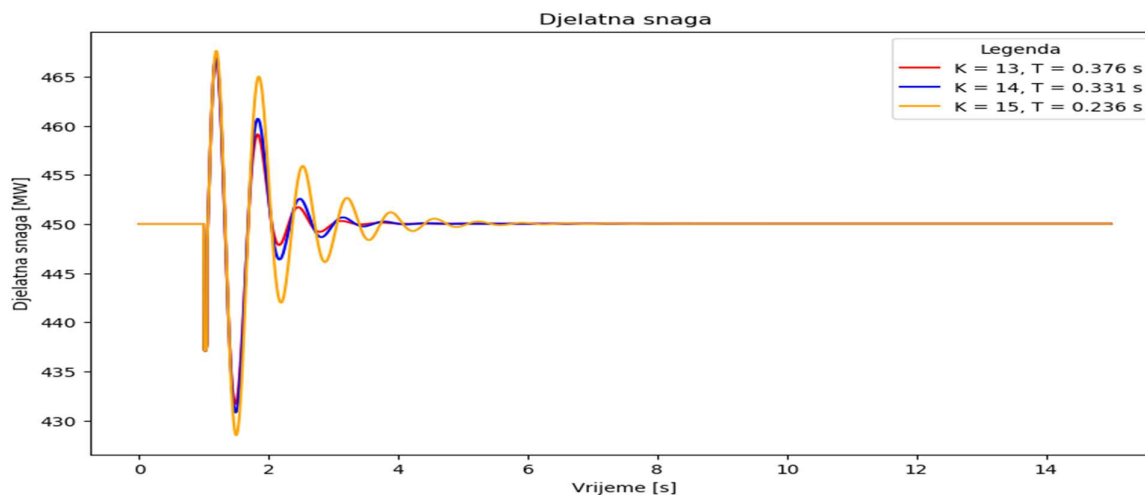
Broj iteracija	Pojačanje, $K$	Vremenska konstanta, $T$ [s]
500	14	0.331
1000	13	0.376
1500	32	1.278
2000	15	0.236

Iz rezultata se može zaključiti da pri 1500 iteracija algoritam dođe u područje koje je globalni optimum, a koji nije prihvatljiv kao potencijalno rješenje zbog toga što se kao rezultat dobije značajno narušavanje i oscilatorne i tranzijentne stabilnosti. Zbog tog ograničenja, analiziraju se preostala tri rješenja od kojih je prvo, pojačanje  $K = 14$  i vremenska konstanta  $T = 0.331$  sekunda, identično rješenju koje se dobije kao jedno od mogućih optimuma pri primjeni metode simuliranog kaljenja iz čega se može zaključiti da u određenim uvjetima, dvije metode mogu rezultirati istim rezultatom što potvrđuje opravdanost i valjanost metode. Rezultati iz kompleksne frekvencijske domene prikazani su tablicom 4.21. Sva tri rješenja dovode do poboljšanja oscilatorne stabilnosti pri čemu se najveće poboljšanje postiže uz vrijednost pojačanja  $K = 13$ .

Tablica 4.21 Oscilatorni modovi za stabilizator parametriran metodom tabu pretraživanja, scenarij 2

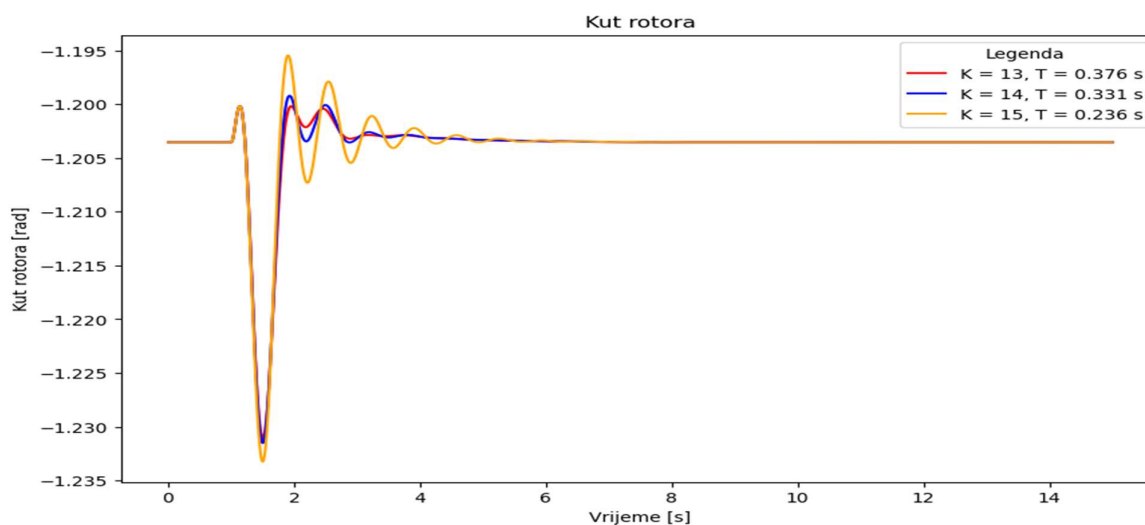
	$K = 14,$ $T = 0.331$ s	$K = 13,$ $T = 0.376$ s	$K = 15,$ $T = 0.236$ s
1	-1.8905822095 ±9.490850511	-2.2698609635 ±9.5828786117	-1.1731258571 ±9.222315559
2	-3.1179200158 ±9.1759601171	-3.1263666200 ±9.2104871936	-3.0987034888 ±9.1493090925
3	-3.3561745535 ±10.715113981	-3.3543781957 ±10.72849014	-3.3613902873 ±10.701126974
4	-3.7908075724 ±11.827041189	-3.7927748699 ±11.829603238	-3.7887292289 ±11.823098757
5	-4.5224232441 ±12.584306321	-4.5224850335 ±12.584291095	-4.5223280724 ±12.584320145

Slikom 4.60 prikazana je djelatna snaga nakon poremećaja za različite vrijednosti parametara stabilizatora elektromehaničkih oscilacija. Najlošiji odziv se dobije primjenom stabilizatora s pojačanjem  $K = 15$  i vremenskom konstantom  $T = 0.236$  sekunde. Preostale dvije kombinacije parametara ( $K = 13$  i  $T = 0.376$  s te  $K = 14$ ,  $T = 0.331$  s prikazane plavom i narančastom krivuljom) rezultiraju lošijim odzivom u odnosu na stabilizator parametriran analitičkom metodom.



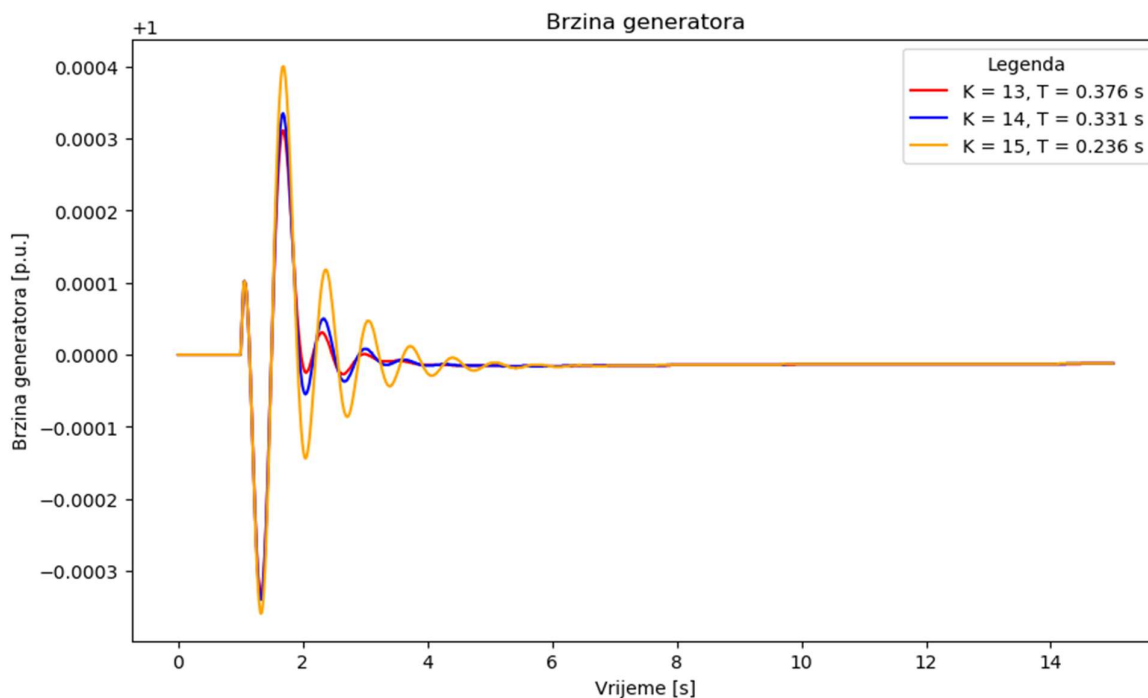
Slika 4.60 Djelatna snaga generatora za stabilizator parametriran metodom tabu pretraživanja, scenarij 2

Kut rotora (slika 4.61) također ima najveće oscilacije kada se kao parametri stabilizatora elektromehaničkih oscilacija uzmu vrijednosti pojačanja  $K = 15$  i vremenska konstanta  $T = 0.236$  sekunde. Bolji odzivi se postižu s pojačanjem  $K = 13$  i  $K = 14$  budući da je nadvišenje manje i vrijeme postizanja ustaljene vrijednosti je kraće. Međutim, za određivanje optimalnih parametara se moraju usporediti i ostale vrijednosti signala.



Slika 4.61 Kut rotora generatora za stabilizator parametriran metodom tabu pretraživanja, scenarij 2

Brzina generatora i usporedba za stabilizatore parametrirane metodom tabu pretraživanja je prikazana slikom 4.62. Najveće oscilacije brzine se dobiju uz stabilizator kojemu je pojačanje  $K = 15$ . Najbolji odziv je rezultat primjene stabilizatora koji je parametriran analitičkom metodom dok za optimizacijsku metodu postoje jako mala odstupanja, ali koja u konačnici mogu odnijeti prevagu o tome koju kombinaciju parametara primijeniti.



Slika 4.62 Brzina generatora za stabilizator parametriran metodom tabu pretraživanja, scenarij 2

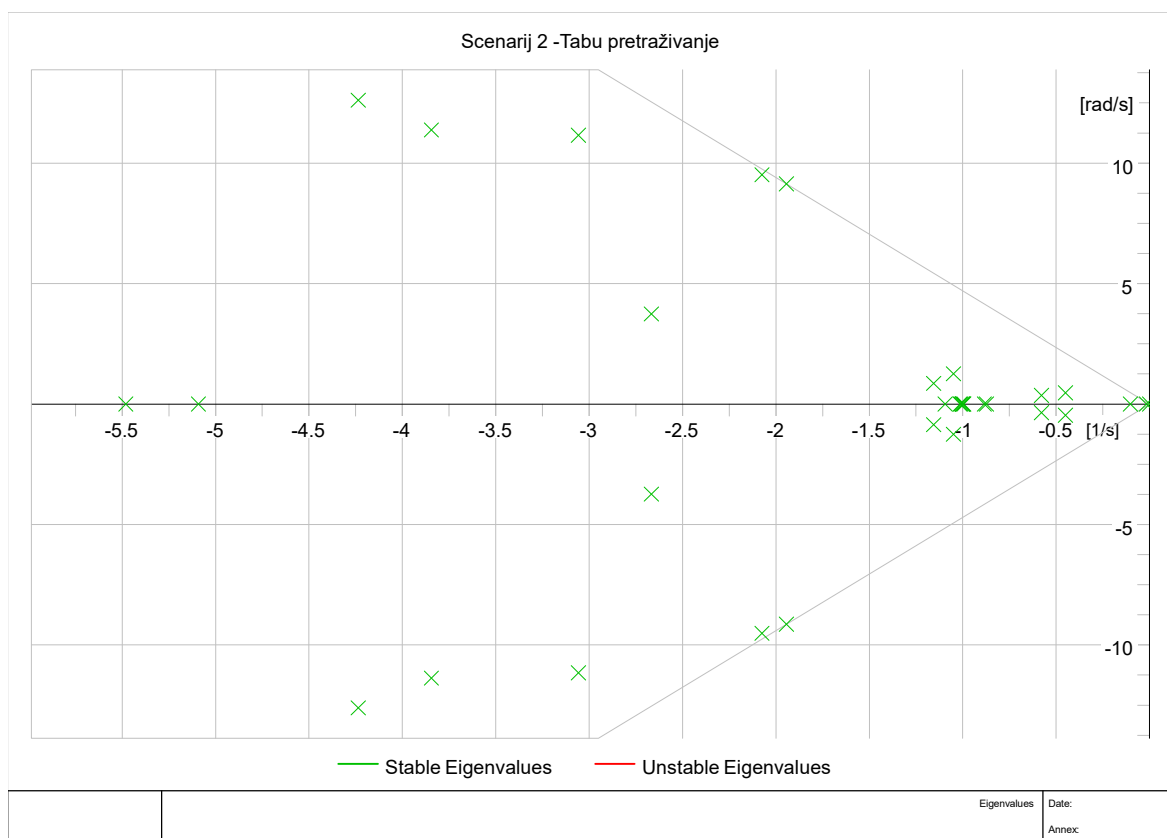
Iz rezultata se može uočiti da se lošim odabirom parametara stabilizatora može narušiti stabilnost sustava. Također, jako bliske vrijednosti pojačanja i vremenske konstante, koje se mogu uzeti kao optimalni rezultati, mogu poboljšati pokazatelje stabilnosti. S obzirom da se iz samih oscilograma ne može donijeti odluka koji parametar rezultira s najmanjim odstupanjem veličine, formiraju se težinske funkcije čiji su iznosi prikazani tablicom 4.22. Najveći koeficijent prigušenja ima parametar s pojačanjem  $K = 13$ , ali on ujedno ima najveće odstupanje djelatne snage. Također, vrijednost  $K = 15$  rezultira većim odstupanje vremenskih veličina u odnosu na početnu vrijednost u odnosu na ostale promatrane vrijednosti.

Usporedbom vrijednosti funkcije cilja rezultata dobivenih tabu pretraživanjem pokazuju da su vrijednost pojačanja  $K = 14$  i vremenska konstanta  $T = 0.331$  sekunda kombinacija parametara koja daje najbolji odziv u kompleksnoj frekvencijskoj i vremenskoj domeni.

Tablica 4.22 Usporedba vrijednosti funkcije cilja za različite parametre stabilizatora, metoda tabu pretraživanja, scenarij 2

Parametri	$K = 13,$ $T = 0.376$ s	$K = 14,$ $T = 0.331$ s	$K = 15,$ $T = 0.236$ s
Koeficijent prigušenja	0.230489	0.195362	0.126188
Djelatna snaga	0.873233	0.933082	0.904649
Kut rotora	0.985919	0.985696	0.983523
Brzina generatora	0.999996	0.999995	0.999993
Ukupno	3.089637	3.114135	3.014354

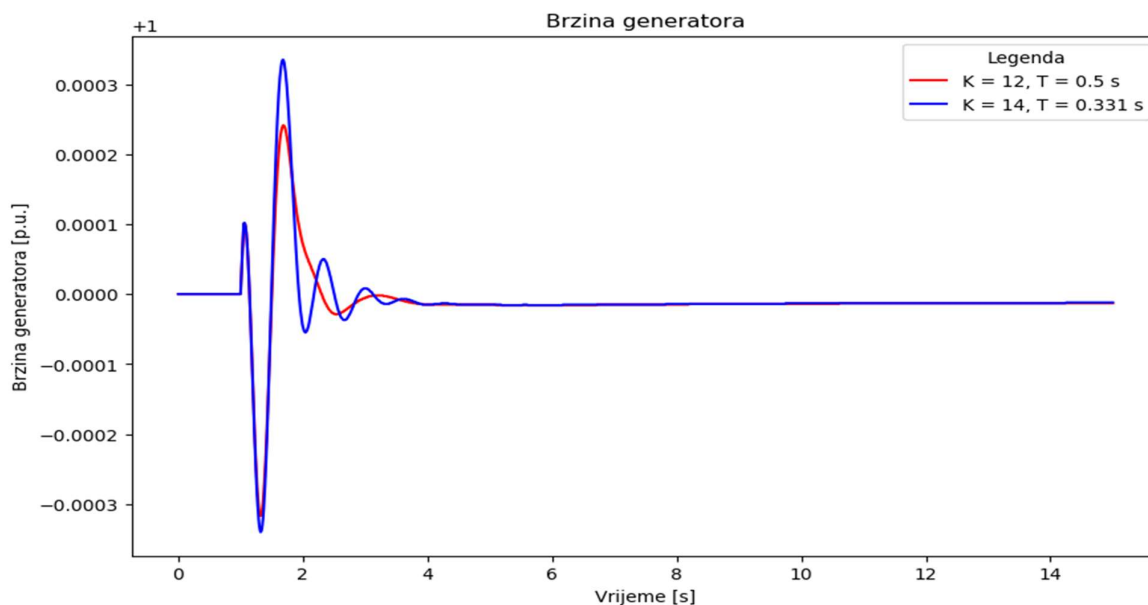
Rezultati modalne analize za tabu pretraživanje prikazani su slikom 4.63. Sustav je stabilan, a postoji pet oscilatornih modova raspona frekvencija koji odgovaraju lokalnom modu.



Slika 4.63 Krivulja mjesta korijena, stabilizator elektromehaničkih oscilacija parametriran metodom tabu pretraživanja, scenarij 2

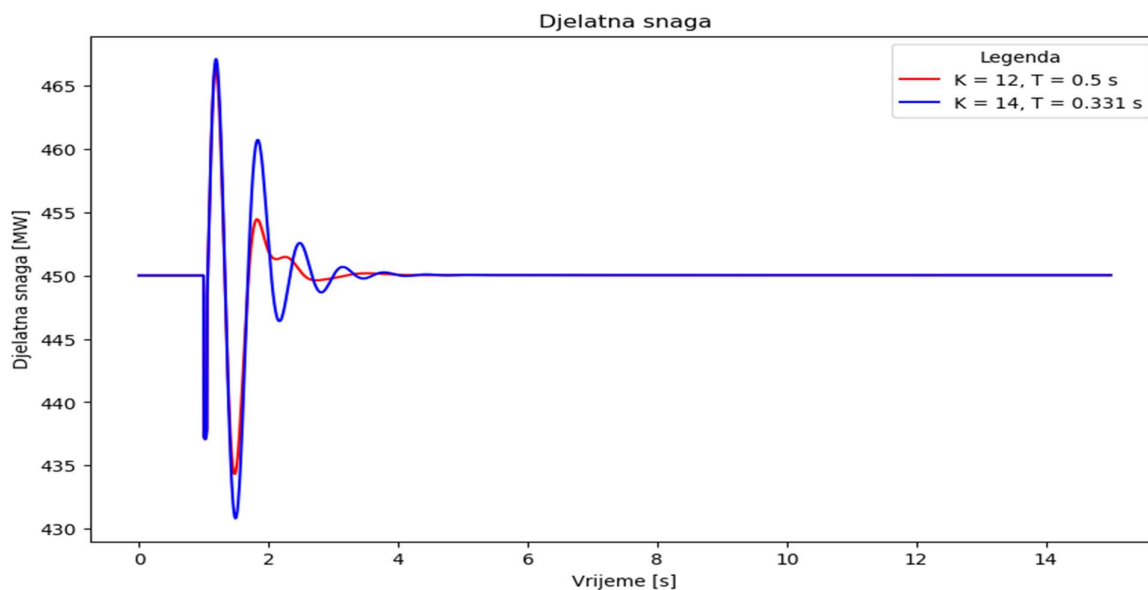
Usporedba djelatne snage, brzine generatora i kuta rotora je prikazana slikama 4.64 do 4.66. Brzina generatora ima veće oscilacije u odnosu na slučaj kada se stabilizator parametrira analitičkom

metodom. Oscilacije nisu značajne, ali uz koincidenciju još jednog kvara mogle bi odvesti do većih problema u sustavu.



Slika 4.64 Brzina generatora, stabilizator elektromehaničkih oscilacija parametriran metodom tabu pretraživanja, scenarij 2

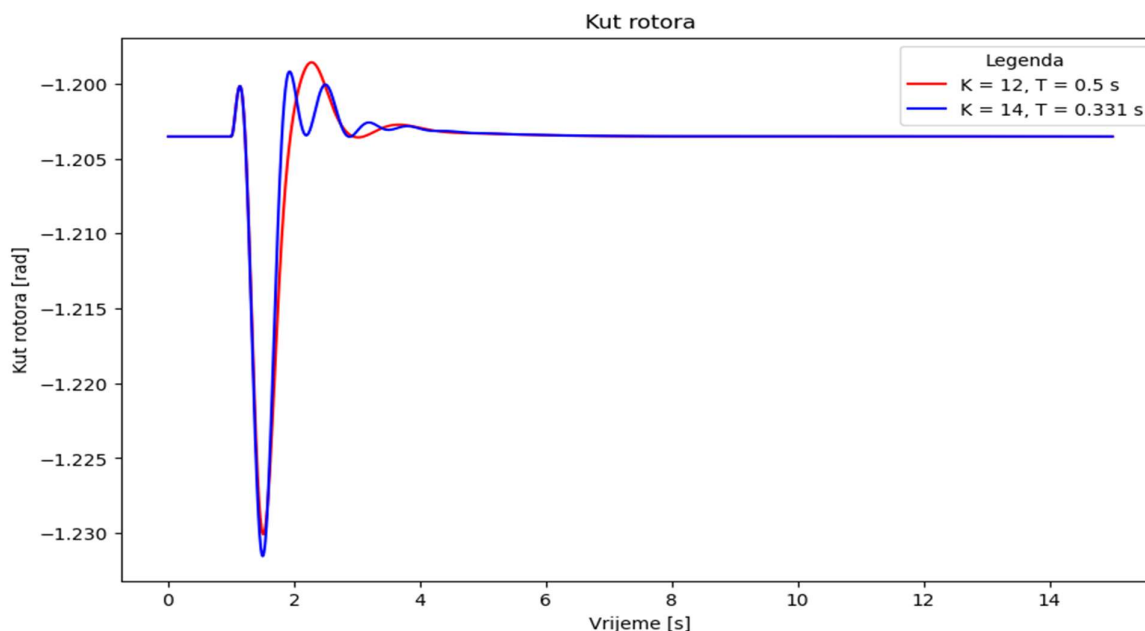
Sličan odziv je i za slučaj djelatne snage (slika 4.65). Ponovno se stabilizator parametriran analitičkom metodom pokazuje kao bolje rješenje budući da se prije postiže konstantna vrijednost snage i sa manje oscilacija.



Slika 4.65 Brzina generatora, stabilizator elektromehaničkih oscilacija parametriran metodom tabu pretraživanja, scenarij 2



Oscilacije kuta su smanjene primjenom stabilizatora elektromehaničkih oscilacija (slika 4.66). Usporedbom odziva, manje njihanja kuta se dobije ako su parametri postavljeni kako je predloženo analitičkom metodom uz pojačanje  $K = 12$  i vremenskom konstantom  $T = 0.331$  sekunda.



Slika 4.66 Kut rotora, stabilizator elektromehaničkih oscilacija parametriran metodom simuliranog kaljenja, scenarij 2

Iz navedenih razmatranja i usporedbi metoda mekog računarstva može se zaključiti da rezultati optimizacije prije svega ovise o tome koliki set početnih rješenja se uzima u razmatranje. Što je veće područje pretraživanja, rezultati su kvalitetniji i manje je odstupanje među njima.

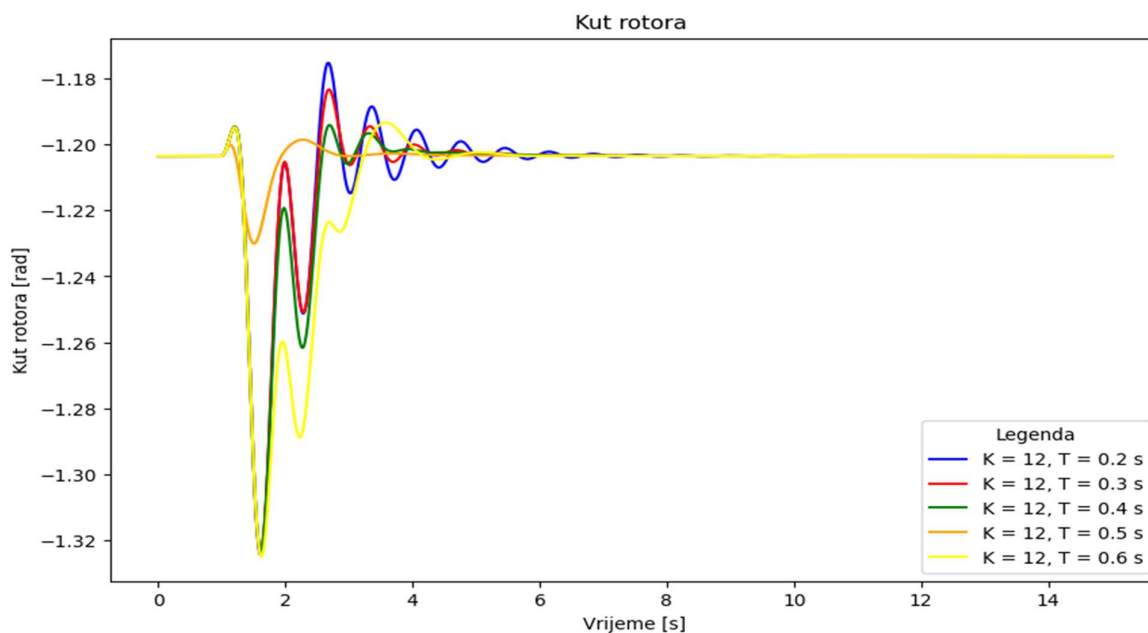
Metoda roja čestica se pokazala najtočnijom i bez obzira na broj iteracija, za istu promatranu početnu populaciju, rezultati su bili identični. Vrijeme izvođenja algoritma je ovisilo o broju iteracija i početnoj populaciji, a za optimalan rezultat je trajalo najmanje 6.11 sekundi što je ujedno najveće vrijeme trajanja optimizacije. U tom slučaju je optimalno rješenje pojačanje  $K = 13.99$  i vremenska konstanta  $T = 0.517$  sekunda. Druga metoda, genetski algoritam kao rezultat optimizacije, koja traje znatno kraće od metode roja čestica, daje rezultat koji je približan onome koji se dobije analitičkom metodom. Ostale vrijednosti, koje su ovisile o broju iteracija i početnoj populaciji su u konačnici bile odbačene jer su odstupanja bila znatno veća (veća vrijednost konačne težinske funkcije). Metoda simuliranog kaljenja je također dala rezultate koji su približno jednaki rezultatima prethodnih optimizacijskih metoda uz značajno kraće trajanje optimizacije (oko 0.03 sekunde). Nedostatak ove metode je bilo veliko rasipanje mogućih rezultata, pogotovo za veći broj iteracija. Također, u ovom načinu optimizacije potrebno je dodatno ograničiti raspone varijabli ukoliko se želi naći rezultat koji je zapravo lokalni minimum. Najbrža metoda je tabu pretraživanje koje

trenutno daje optimalnu vrijednost (ili u jako kratkom vremenu koje software ne bilježi). Rezultati jako ovise o broju iteracija i bez značajnog ograničenja početne populacije i raspona varijabli teško se postiže ponovljivost rezultata. Zajedničko za sve primijenjene metode je pronalazak optimalne vrijednosti unutar dosta uskog područja, odnosno potencijalno rješenje jedne metode može biti optimalno za drugu metodu, kao što se pokazalo na primjeru simuliranog kaljenja i tabu pretraživanja. U konačnici se može zaključiti da uz dobro definiranje ograničenja, funkcije cilja i odabir početne populacije bilo koja od ovih metoda daje dobre rezultate optimizacije parametara stabilizatora. Međutim, ukoliko se ne postave dodatna ograničenja za pojedine metode, rezultat se može značajno razlikovati. U svim primjerima optimizacije i metodama koje su primijenjene, kao ograničenja su uzete vrijednosti kako je preporučeno u literaturi, što za proučavani testni sustav može biti prevelik raspon ograničenja te više vrijednosti pojačanja i vremenskih konstanti mogu rezultirati narušavanjem oscilatorne stabilnosti pomjeranjem polova u desnu stranu kompleksne ravnine ili tranzijentne povećanjem oscilacija veličina (djelatne snage, kuta rotora, brzine).

#### 4.6 Scenarij 3 - Analitička metoda parametriranja stabilizatora elektromehaničkih oscilacija za trajanje poremećaja 250 ms

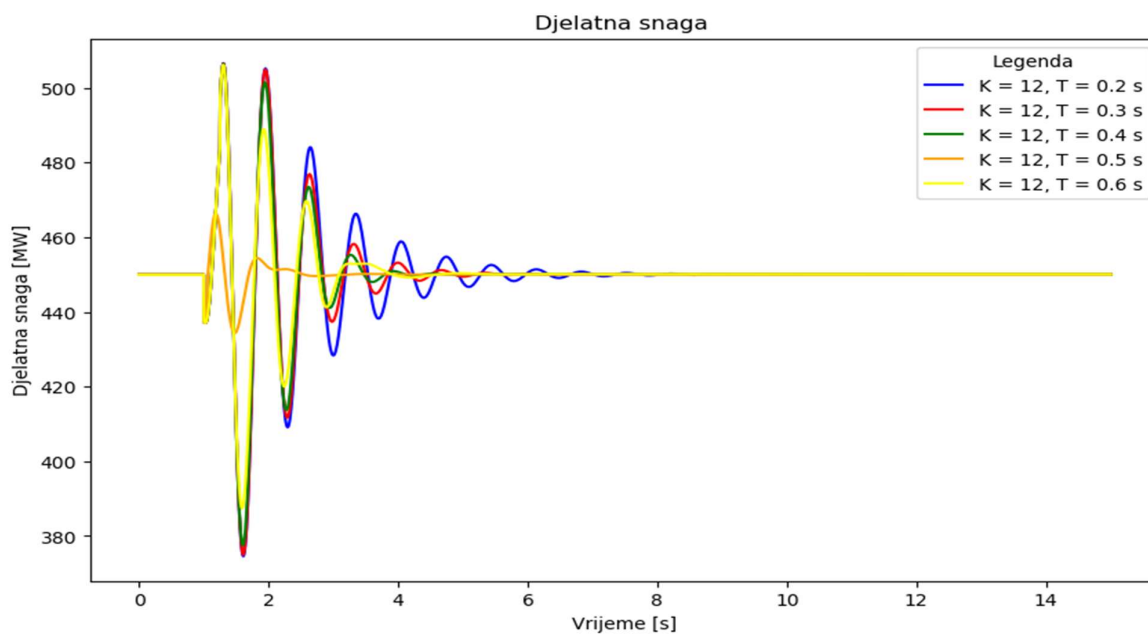
U trećem scenariju konfiguracija mreže ostaje nepromijenjena, ali se mijenja vrijeme trajanja poremećaja. Kvar na sabirnici 4 se otklanja u vremenu od 250 ms, što utječe na tranzijentnu stabilnost u sustavu. Modalna analiza ima iste rezultate kao i u scenariju 1 budući da nema promjena u konfiguraciji mreže niti pojedinim elementima. Zbog toga i početno pojačanje sustava, određeno izrazom (3-45), ostaje isto i za ovaj slučaj. Početna vrijednost pojačanja također ostaje  $K = 12$ , a početna vremenska konstanta  $T = 0.2$  sekunde. Određivanje vremenske konstante kreće tako što se formira prvi skup vrijednosti za koje je pojačanje konstantno i jednako početnom, a vremenska konstanta se povećava za 0.1 sekundu. Oscilogrami djelatne snage, kuta rotora i brzine generatora su prikazani slikama 4.67-4.69. Kvaliteta signala se ispituje uvrštavanjem u izraze (3-40)-(3-44) te se određuje najveća vrijednost težinske funkcije. Najveća težinska funkcija znači da veličina (djelatna snaga, kut rotora ili brzina) imaju najmanje odstupanje od vrijednosti zabilježene u stanju prije pojave poremećaja.

Slikom 4.67 prikazan je odziv kuta rotora na poremećaj trajanja 250 ms za varijacije vremenske konstante u rasponu od 0.2 do 0.6 sekundi. Povećanjem vremenske konstante postiže se brže ustaljenje vrijednosti i smanjuju se oscilacije iznosa kuta.



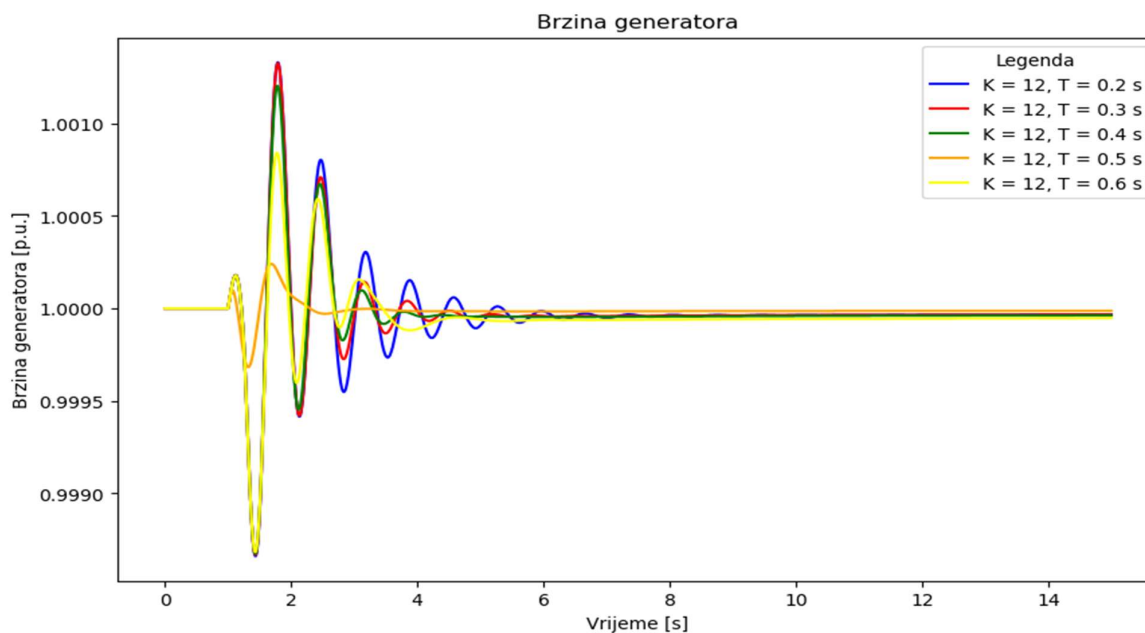
Slika 4.67 Kut rotora za varijacije vremenske konstante za  $t = 250 \text{ ms}$ , scenarij 3

Za djelatnu snagu (slika 4.68) se također povećanjem vremenske konstante smanjuje nadvišenje djelatne snage te se oscilacije brže prigušuju. Iz odziva se može vidjeti da vremenska konstanta ne predstavlja značajno poboljšanje u odnosu na odziv kada nije primijenjen stabilizator elektromehaničkih oscilacija.



Slika 4.68 Djelatna snaga za varijacije vremenske konstante za  $t = 250 \text{ ms}$ , scenarij 3

Brzina generatora je prikazana slikom 4.69, a uočava se da odstupanja ne odudaraju značajno u odnosu na vrijednost prije poremećaja. Povećanje vremenske konstante od 0.2 do 0.6 sekundi rezultira bržim postizanjem konačne vrijednosti, odnosno smanjenjem oscilacija brzine.



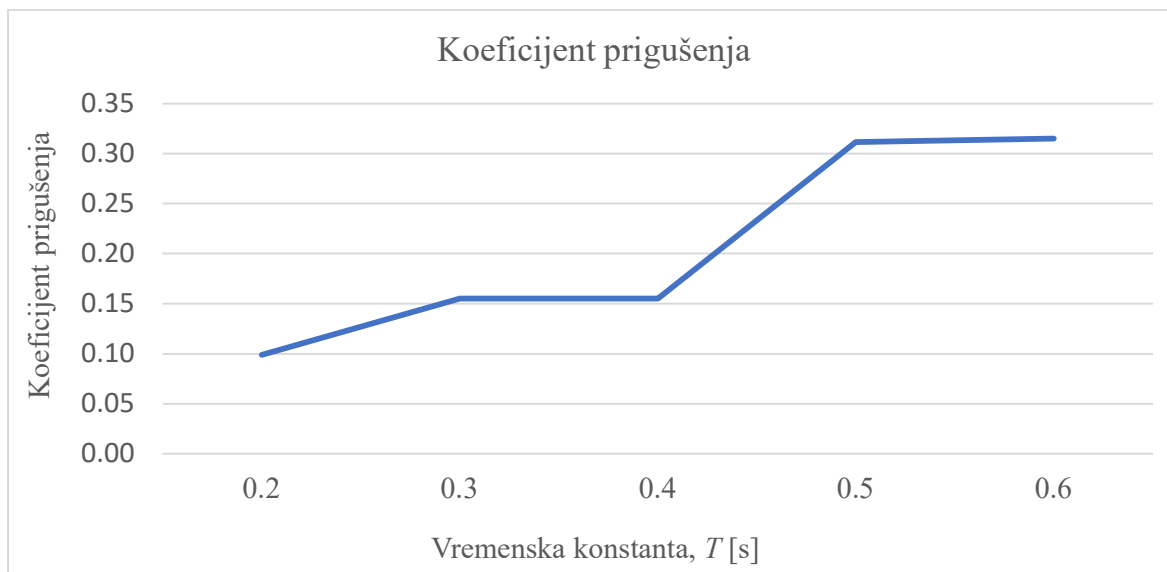
Slika 4.69 Brzina generatora za varijacije vremenske konstante za  $t = 250$  ms, scenarij 3

Iako je iz slika jasno da povećanje vremenske konstante dovodi do poboljšanja tranzijentne stabilnosti, konačna odluka o odabiru vrijednosti vremenske konstante se donosi na temelju težinskih funkcija prikazanih u tablici 4.23.

Tablica 4.23 Težinska funkcije za varijacije vremenske konstante prvog skupa vrijednosti za  $t = 250$  ms, scenarij 3

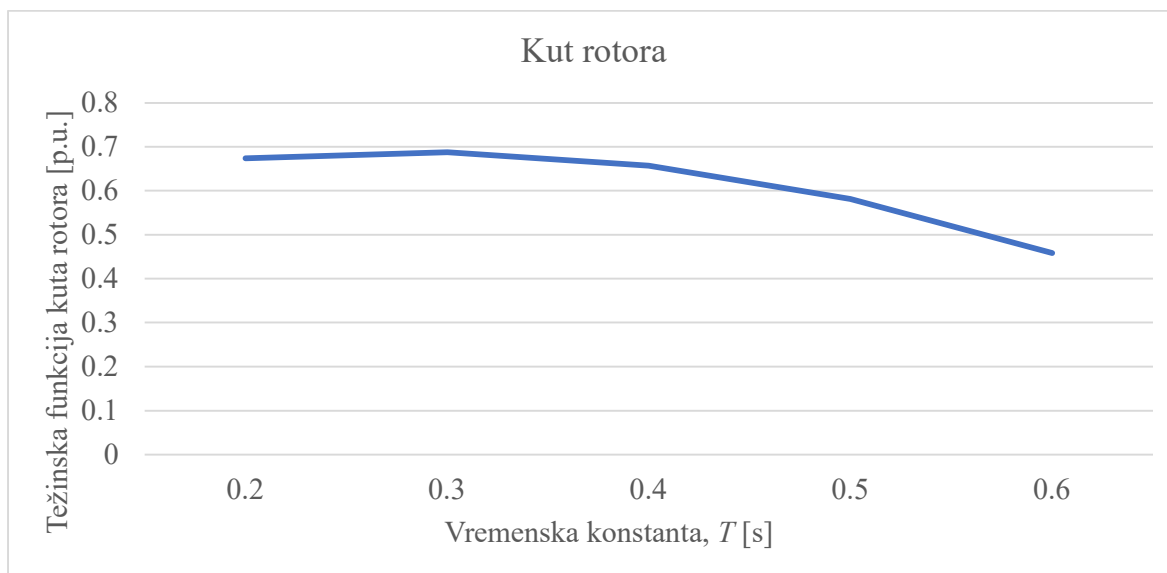
Vremenska konstanta, $T$ [s]	Koeficijent prigušenja	Kut rotora	Djelatna snaga	Brzina generatora	Ukupna težinska funkcija
0.2	0.09871	0.67380	-0.30420	0.99991	1.46824
0.3	0.15525	0.68736	-0.16890	0.99992	1.67367
0.4	0.15525	0.65669	-0.04920	0.99992	1.76267
0.5	0.31175	0.58169	0.08789	0.99993	1.98126
0.6	0.31498	0.45863	0.22458	0.99994	1.99813

U nastavku su prikazane težinske funkcije prigušenja (slika 4.70), kuta rotora (slika 4.71), djelatne snage (slika 4.72), brzine generatora (slika 4.73) te ukupna težinska funkcija (slika 4.74). Povećanjem vremenske konstante povećava se koeficijent prigušenja, odnosno poboljšava se oscilatorna stabilnost. Dominantni polovi se pomiču u desnu stranu kompleksne ravnine.



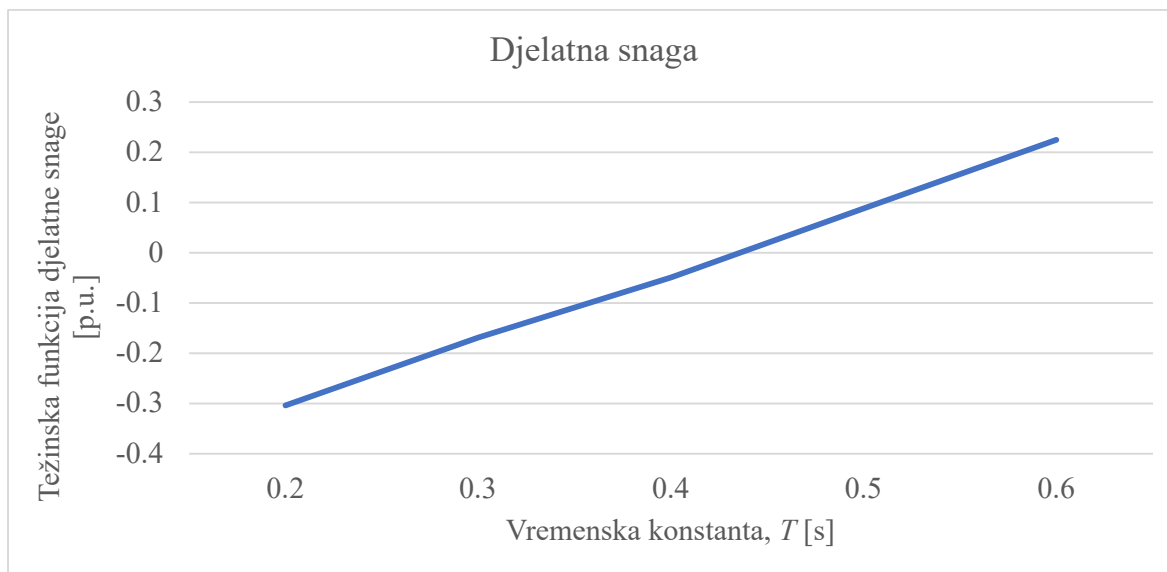
Slika 4.70 Težinska funkcija koeficijenta prigušenja za varijaciju vremenske konstante prvog skupa za  $t = 250$  ms, scenarij 3

Težinska funkcija kuta rotora pokazuje da se povećanjem vremenske konstante stabilizatora elektromehaničkih smanjuje odstupanje kuta rotora nakon poremećaja.



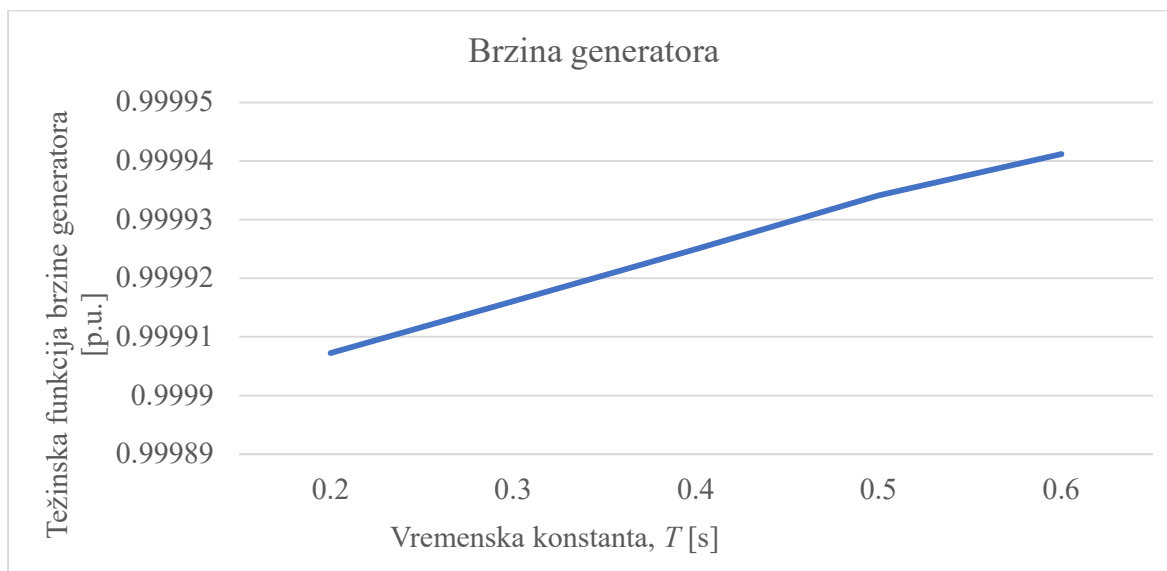
Slika 4.71 Težinska funkcija kuta rotora za varijaciju vremenske konstante prvog skupa za  $t = 250$  ms, scenarij 3

Težinska funkcija snage ima negativnu vrijednost za manje vremenske konstante. Do negativne vrijednosti dolazi zbog većeg odstupanja u odnosu na vrijednost prije poremećaja što će u konačnici utjecati i na konačnu vrijednost ukupne težinske funkcije.



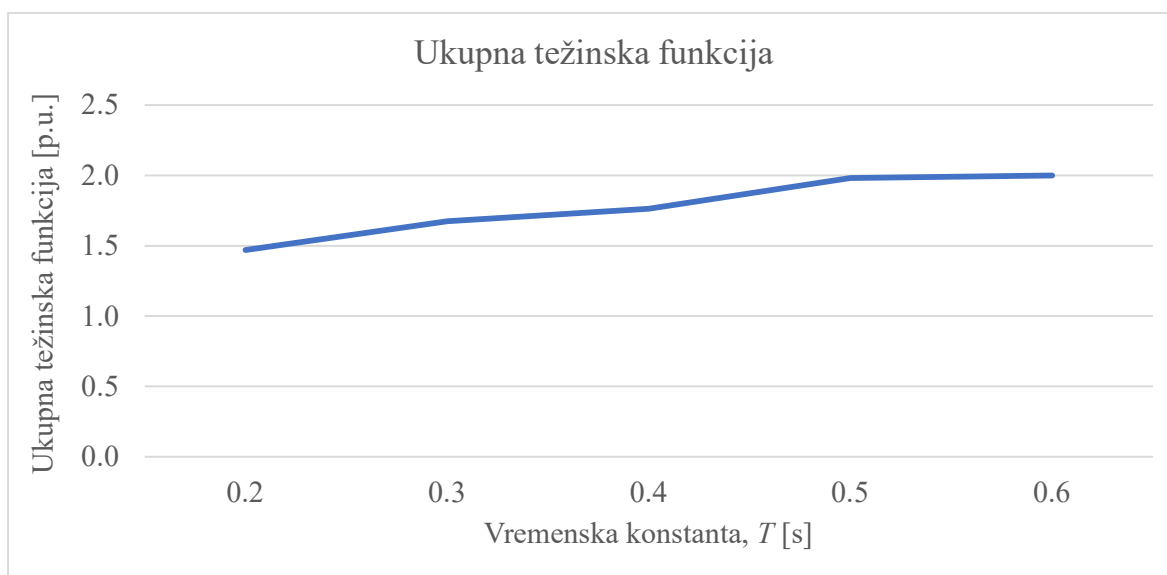
Slika 4.72 Težinska funkcija djelatne snage za varijaciju vremenske konstante prvog skupa za  $t = 250$  ms, scenarij 3

Odstupanja brzine generatora su jako mala, a povećanjem vremenske konstante se odstupanja smanjuju. S obzirom da je vrijednost težinske funkcije sa malim odstupanjima, konačnu težinsku funkciju će odrediti djelatna snaga i koeficijent prigušenja.



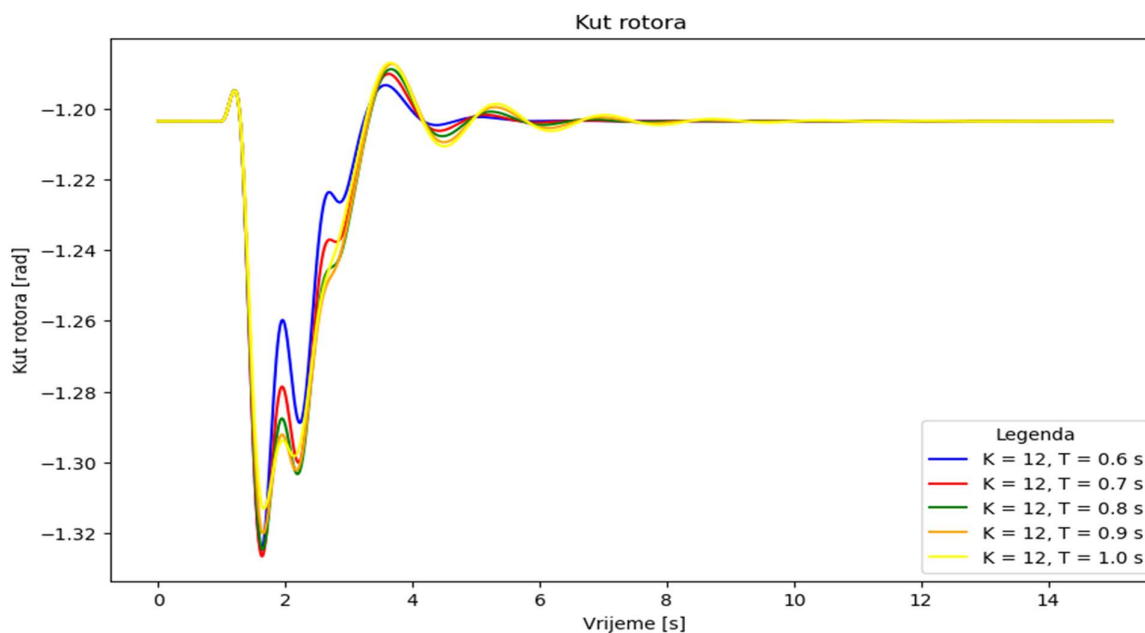
Slika 4.73 Težinska funkcija brzine generatora za varijaciju vremenske konstante prvog skupa za  $t = 250$  ms, scenarij 3

Ukupna težinska funkcija prikazana je slikom 4.74. Maksimalna vrijednost se postiže pri  $K = 0.6$  sekundi te prema tome nije ispunjen uvjet odabira vremenske konstante u osnovnom skupu vrijednosti.



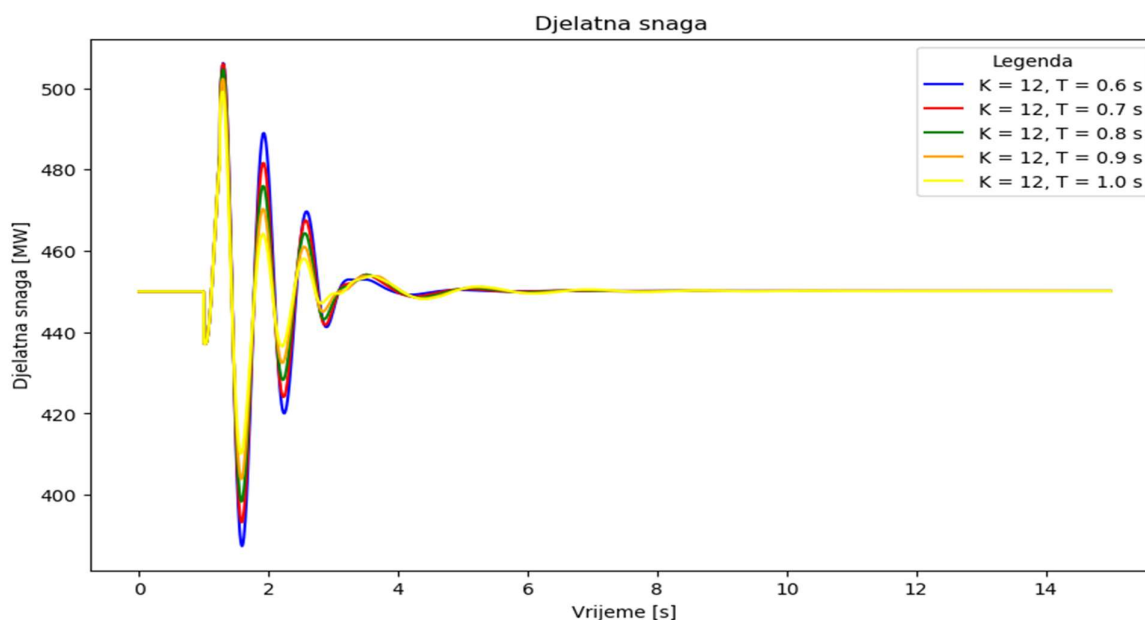
Slika 4.74 Ukupna težinska funkcija za varijaciju vremenske konstante prvog skupa za  $t = 250$  m, scenarij 3

Prema rezultatima se uočava da se u prvom skupu od pet vrijednosti ne dobije vrijednost koja predstavlja lokalni maksimum, odnosno težinska funkcija za koju vrijede uvjeti (3-45) i (3-46) te se stoga formira sljedeći skup sa novih pet vrijednosti u kojima je početna vrijednost vremenske konstante  $T = 0.6$  s, a konačna  $T = 1.0$  sekunda. Novi skup je prikazan slikama 4.75-4.77. Povećanjem vremenske konstante dolazi do narušavanja tranzijentne stabilnosti. Kut rotora, slika 4.75, pokazuje da veća vremenska konstanta sporije prigušuje oscilacije.



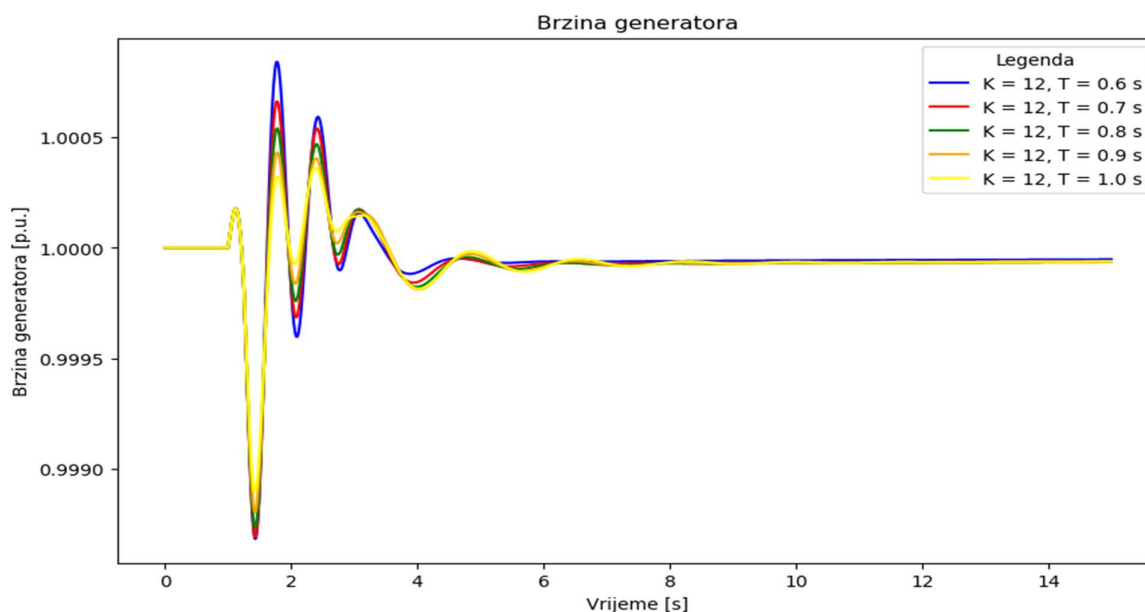
Slika 4.75 Kut rotora za varijacije vremenske konstante drugog skupa vrijednosti za  $t = 250$  ms, scenarij 3

Odziv djelatne snage se poboljšava povećanjem vremenske konstante, što se vidi na slici 4.76. Maksimalno nadvišenje nakon poremećaja se smanjuje, ali istovremeno se za velike vrijednosti vremenske konstante vrijeme ustaljenja veličine produžuje.



Slika 4.76 Djelatna snaga za varijacije vremenske konstante drugog skupa vrijednosti za  $t = 250 \text{ ms}$ , scenarij 3

Kod odziva brzine generatora (slika 4.77) se uočavaju slična poboljšanja kao i za djelatnu snagu - većom vremenskom konstantom nadvišenje se smanjuje što je poželjno ali se istovremeno zadržavaju značajnije oscilacije i produžuje vrijeme ustaljenja.



Slika 4.77 Brzina generatora za varijacije vremenske konstante drugog skupa vrijednosti za  $t = 250 \text{ ms}$ , scenarij 3

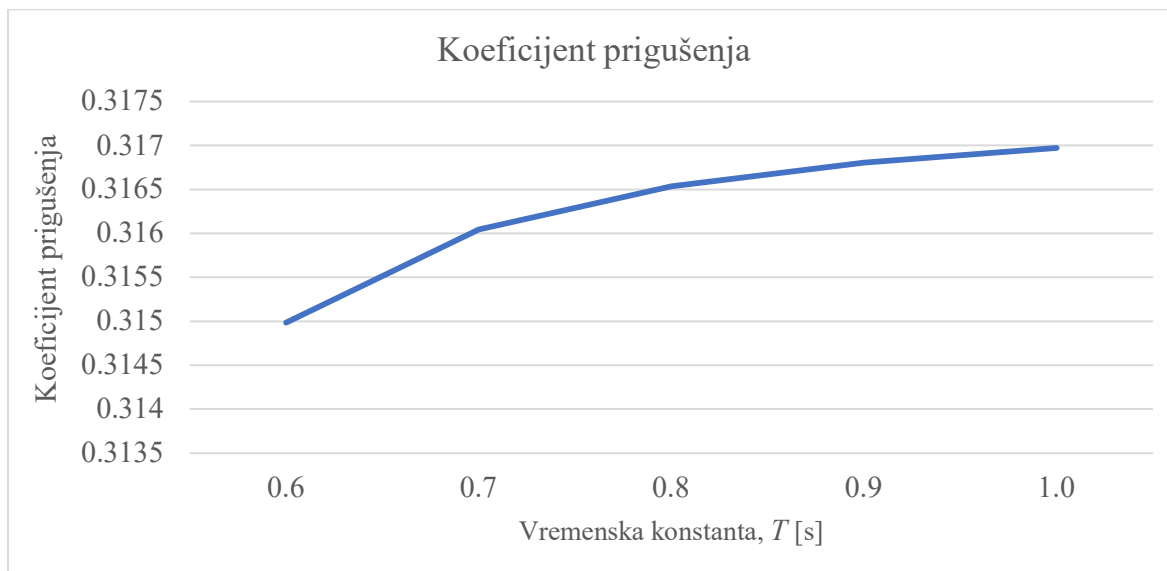


Kao i za prethodni skup, i ovdje se moraju izračunati vrijednosti težinskih funkcija kako bi se mogla odrediti najbolja vrijednost vremenske konstante. Usporedbom vrijednosti težinskih funkcija dva skupa vrijednosti se vidi da vrijednost vremenske konstante  $T = 0.6$  sekundi može uzeti kao najbolja, odnosno vrijednost koja ispunjava uvjet (3-46).

Tablica 4.24 Težinska funkcije za varijacije vremenske konstante drugog skupa vrijednosti za  $t = 250$  ms, scenarij 3

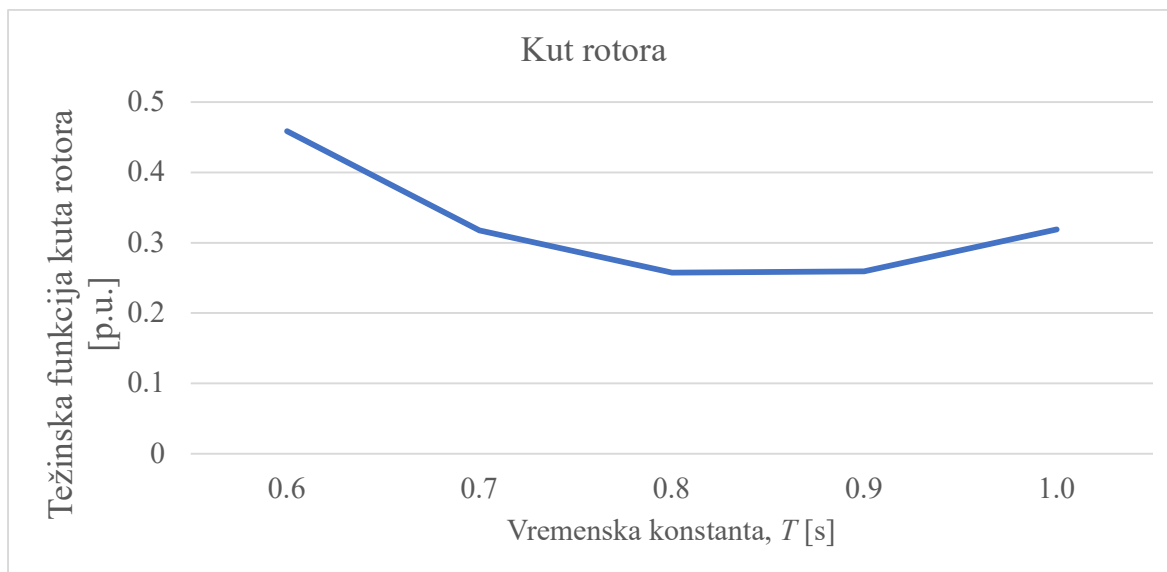
Vremenska konstanta, $T$ [s]	Koeficijent prigušenja	Kut rotora	Djelatna snaga	Brzina generatora	Ukupna težinska funkcija
0.6	0.31498	0.45863	0.22458	0.99994	1.99813
0.7	0.31604	0.31746	0.35197	0.99995	1.98542
0.8	0.31653	0.25727	0.46151	0.99995	2.0353
0.9	0.3168	0.25938	0.56614	0.99996	2.14227
1.0	0.31697	0.31859	0.66493	0.99996	2.30046

Koeficijent prigušenja (slika 4.78) se povećava povećanjem vremenske konstante stabilizatora elektromehaničkih oscilacija.



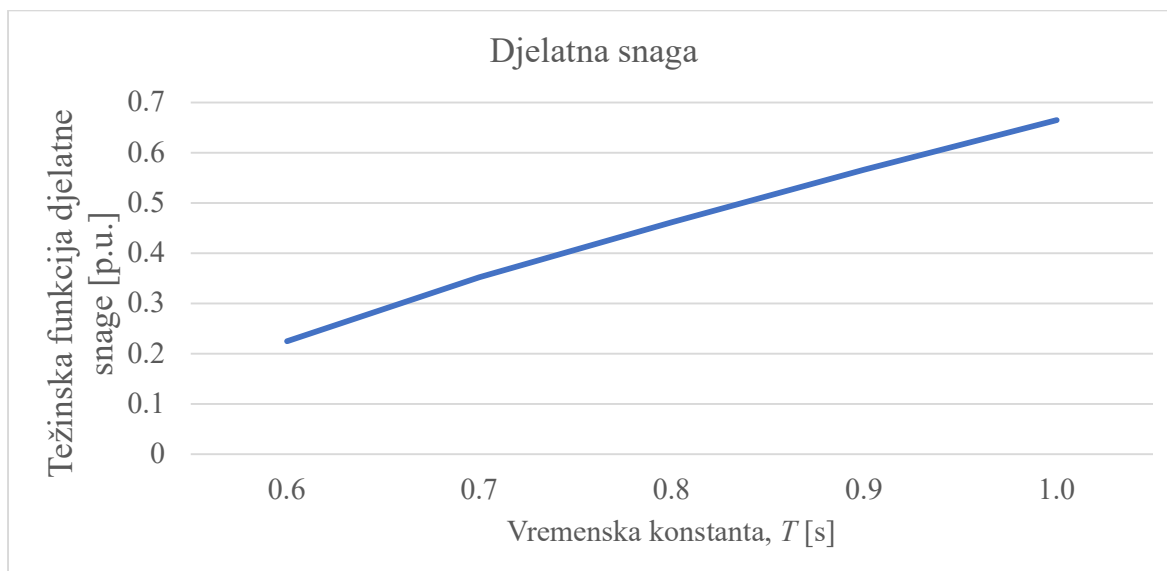
Slika 4.78 Težinska funkcija koeficijenta prigušenja za varijaciju vremenske konstante drugog skupa za  $t = 250$  ms, scenarij 3

Povećanjem vremenske konstante stabilizatora, težinska funkcija kuta rotora (slika 4.79) se smanjuje do minimalne vrijednosti pri vremenskoj konstanti 0.8 sekundi nakon čega se odstupanja opet počinje povećavati. Drugim riječima, povećanjem vremenske konstante su odstupanja trenutne i početne vrijednosti kuta sve veće - odziv je lošiji.



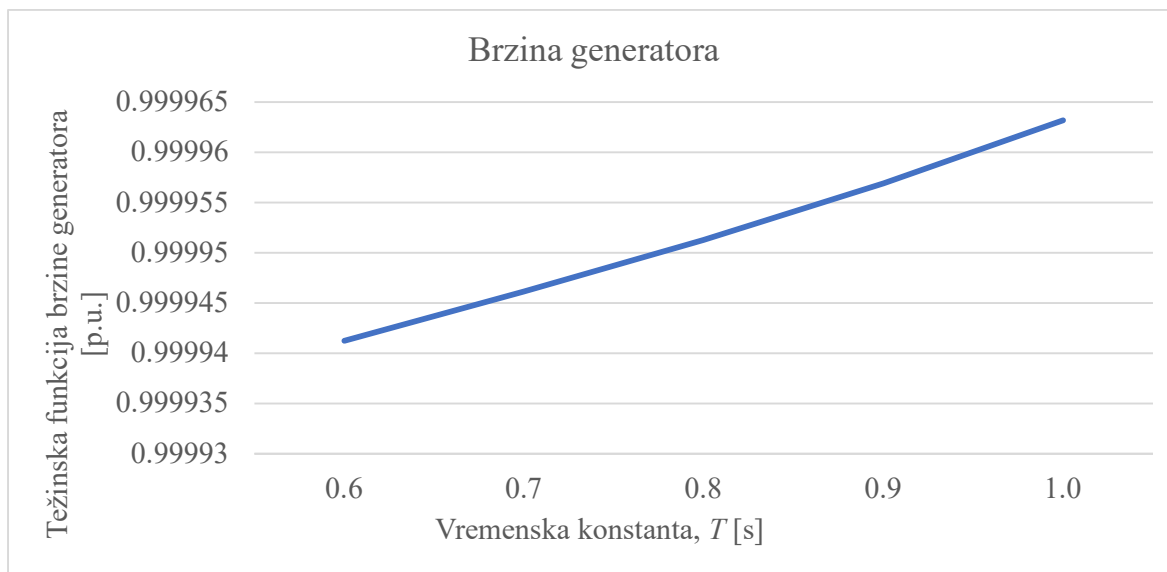
Slika 4.79 Težinska funkcija kuta rotora za varijaciju vremenske konstante drugog skup za  $t = 250$  ms, scenarij 3

Težinska funkcija djelatne snage je prikazana slikom 4.80. Kako se povećava vremenska konstanta, tako se smanjuju odstupanja trenutne i početne vrijednosti djelatne snage smanjuju. U konačnici, ove promjene mogu značajno utjecati na ukupnu težinsku funkciju.



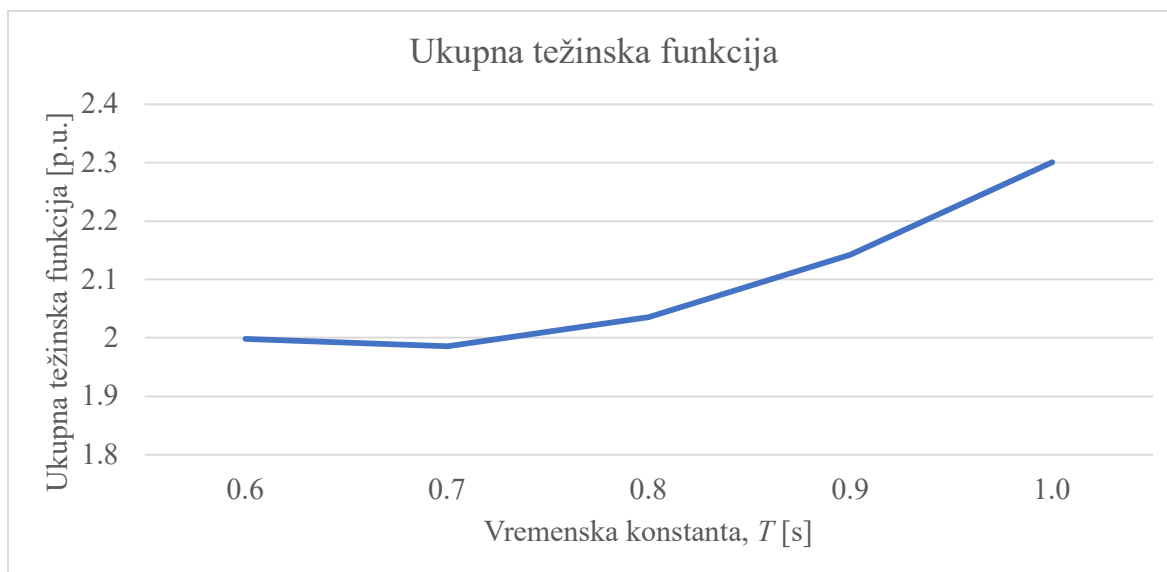
Slika 4.80 Težinska funkcija djelatne snage za varijaciju vremenske konstante drugog skupa za  $t = 250$  ms, scenarij 3

Isto razmatranje kao za djelatnu snagu vrijedi i za težinsku funkciju brzine generatora prikazanu slikom 4.81. Odstupanja brzine su opet jako mala u odnosu na vrijednost brzine prije poremećaja i kada se odrede težinske funkcije razlika za pojedina pojačanja su gotovo beznačajna u odnosu na promjene ostalih veličina.



Slika 4.81 Težinska funkcija djelatne snage za varijaciju vremenske konstante drugog skupa za  $t = 250$  ms, scenarij 3

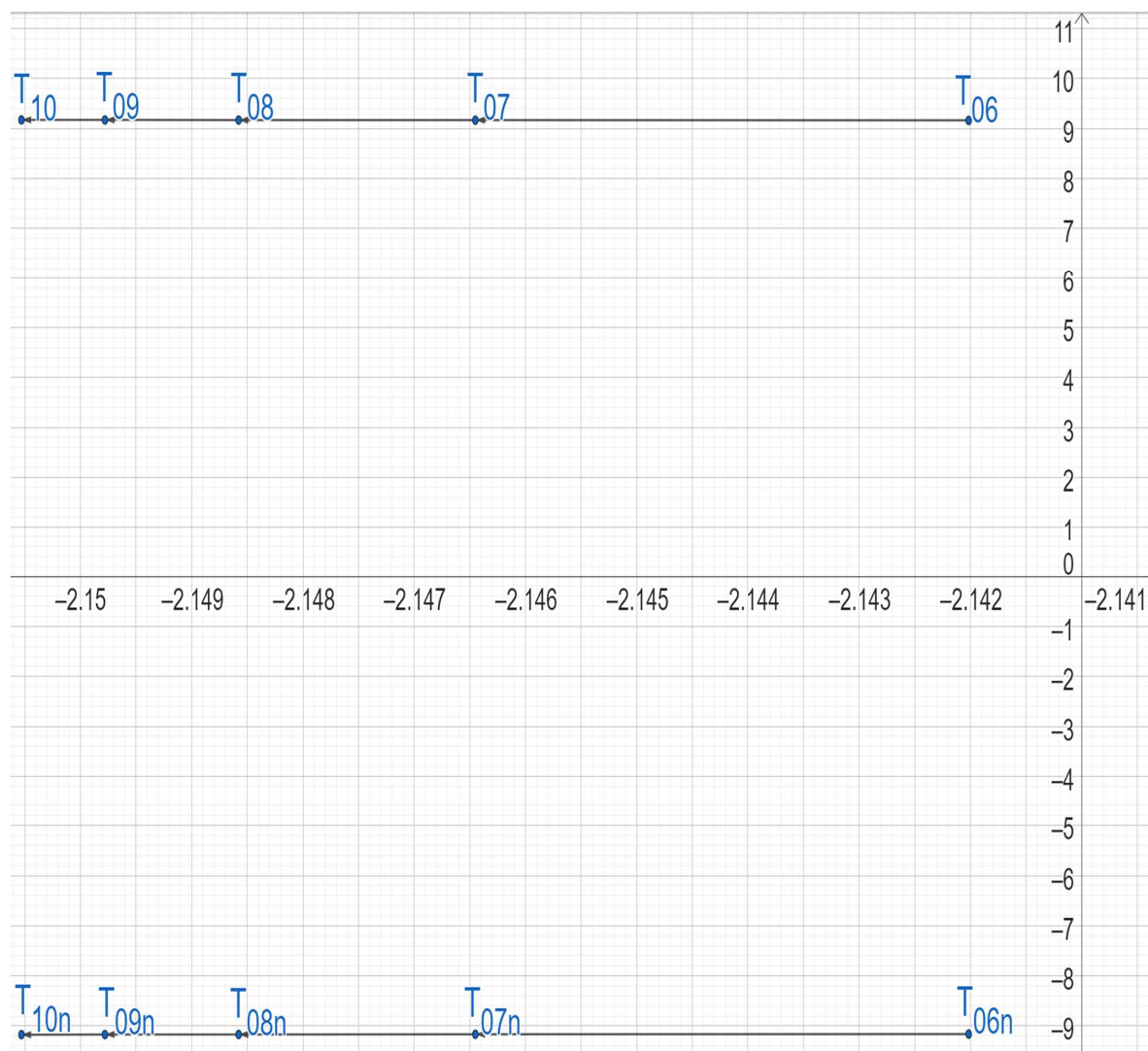
Ukupna težinska funkcija, zbroj težinskih funkcija prigušenja, kuta rotora, brzine i djelatne snage, prikazana je slikom 4.82 Povećanjem vremenske konstante i ukupna težinska funkcija raste što ukazuje na povećanje odstupanja signala vremenske domene.



Slika 4.82 Ukupna težinska funkcija za varijaciju vremenske konstante drugog skupa za  $t = 250$  ms, scenarij 3

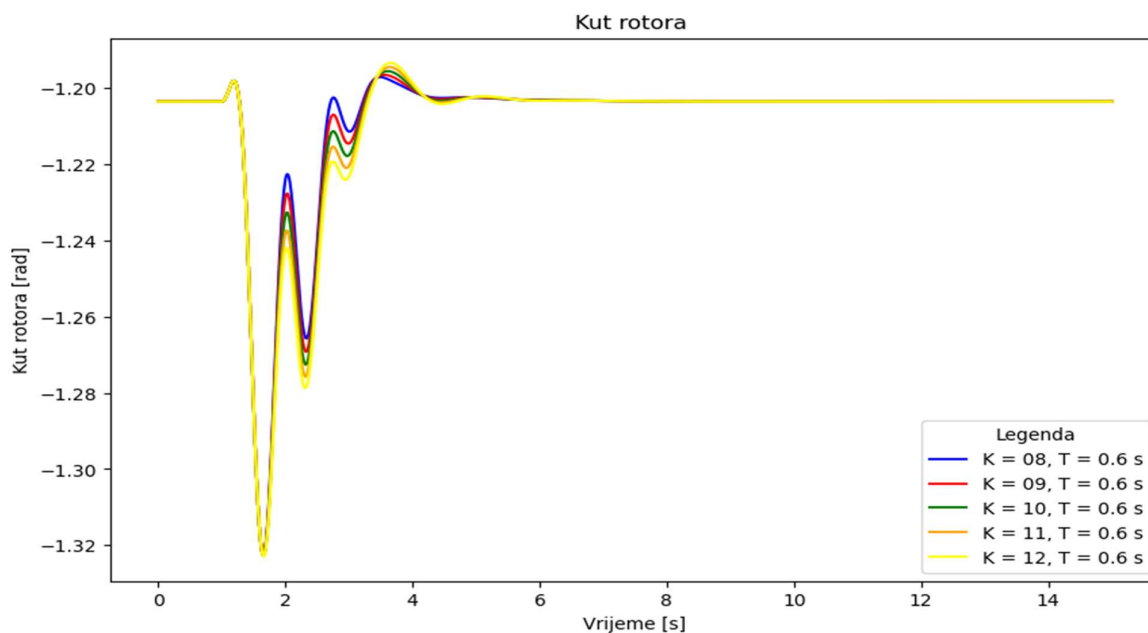
Oscilatorna stabilnost, slika dominantnih polova u ovisnosti o vremenskoj konstanti, prikazana je slikom 4.83. Prvi dio, slika polova za vremenske konstante od 0.2 do 0.6 sekundi prikazan je slikom 4.84 stoga se u drugom dijelu prikazuje samo položaj polova pri konstantama 0.6 do 1 sekunde. Iz slika se može zaključiti da je povećanje prigušenja u tom rasponu značajno manje,

vrijednost realnog dijela svojstvene vrijednosti pokazuje jako malo poboljšanje povećanjem vremenske konstante stabilizatora. Prema tome, utjecaj povećanja vremenske konstante postaje sve manje izražen s obzirom na poboljšanje oscilatorne stabilnosti.

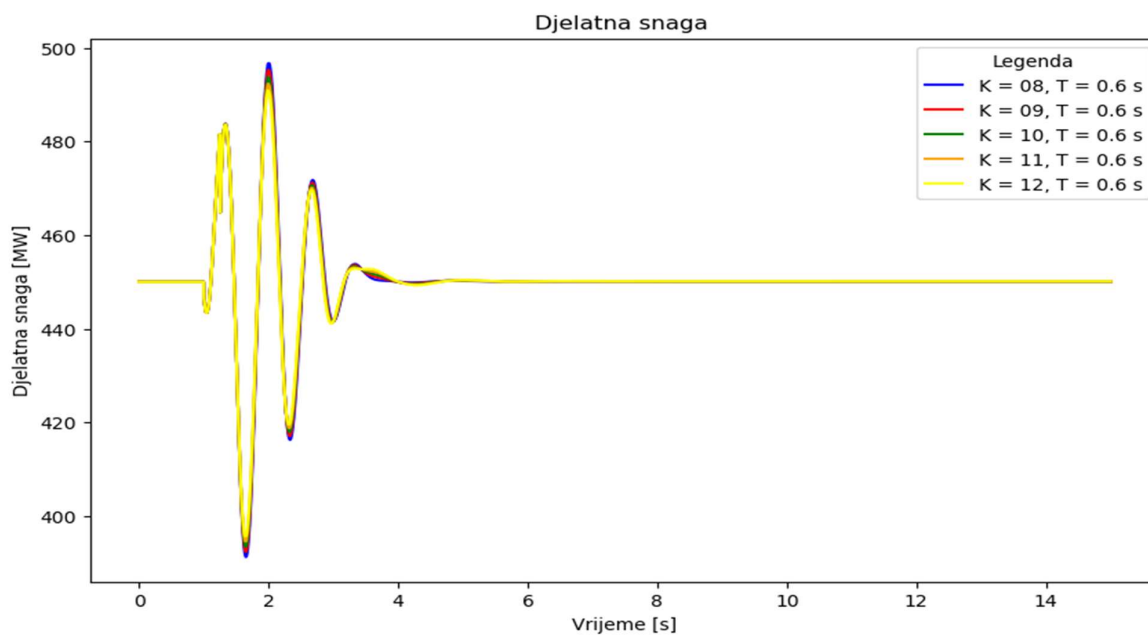


Slika 4.83 Dominantni polovi u kompleksnoj ravnini za različite vrijednosti vremenske konstante za  $t = 250 \text{ ms}$ , scenarij 3

Kada se usporede sve vrijednosti za oba skupa vrijednosti jasno se uočava da je vrijednost vremenske konstante  $T = 0.6$  vrijednost koja ispunjava uvjet (3-46) i predstavlja maksimum funkcije. Zbog toga se kao najbolja vrijednost vremenske konstante uzima ta vrijednost i za nju se provodi variranje pojačanja u dva skupa oko početne vrijednosti - donji skup s pojačanjima između 8 i 12, te gornji skup s pojačanjima od 12 do 15. Prvo se analiziraju odzivi donjeg skupa vrijednosti, a odzivi kuta rotora su prikazani slikom 4.84.

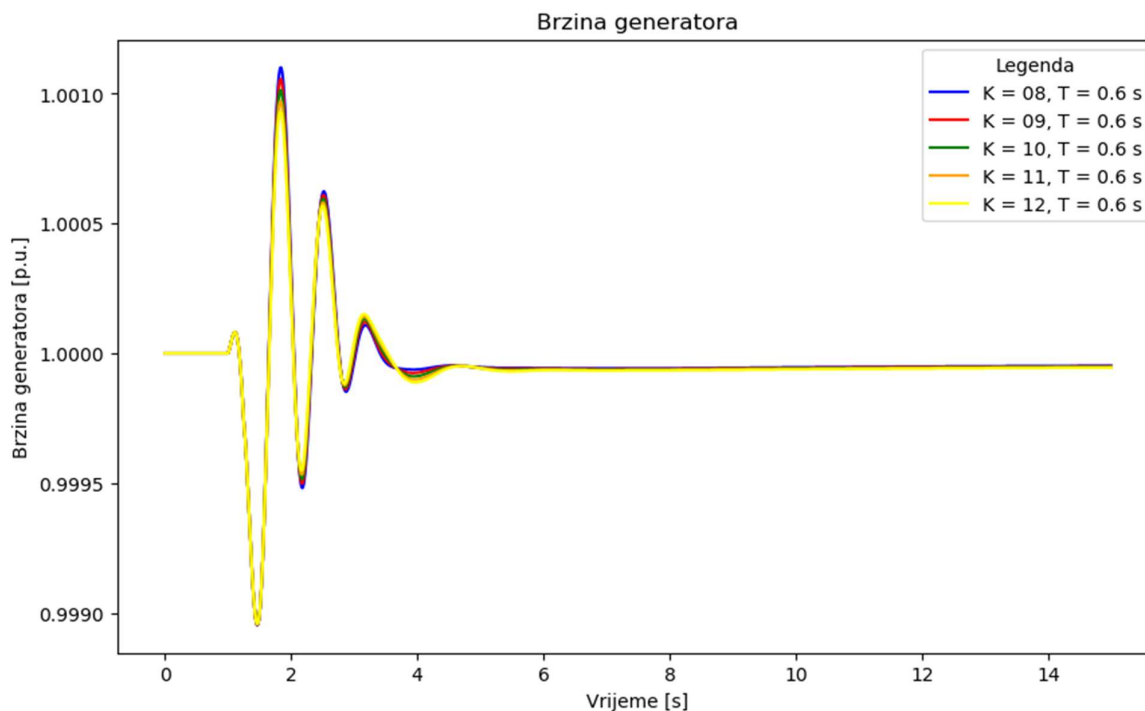


Slika 4.84 Kut rotora za varijacije pojačanja donjeg skupa vrijednosti za  $t = 250$  ms, scenarij 3  
 Djelatna snaga nakon poremećaja za različite vrijednosti pojačanja prikazana je slikom 4.85. Iako su vrijednosti jako bliske, ipak se može uočiti da povećanje pojačanja povoljno utječe na djelatnu snagu smanjenjem oscilacija snage.



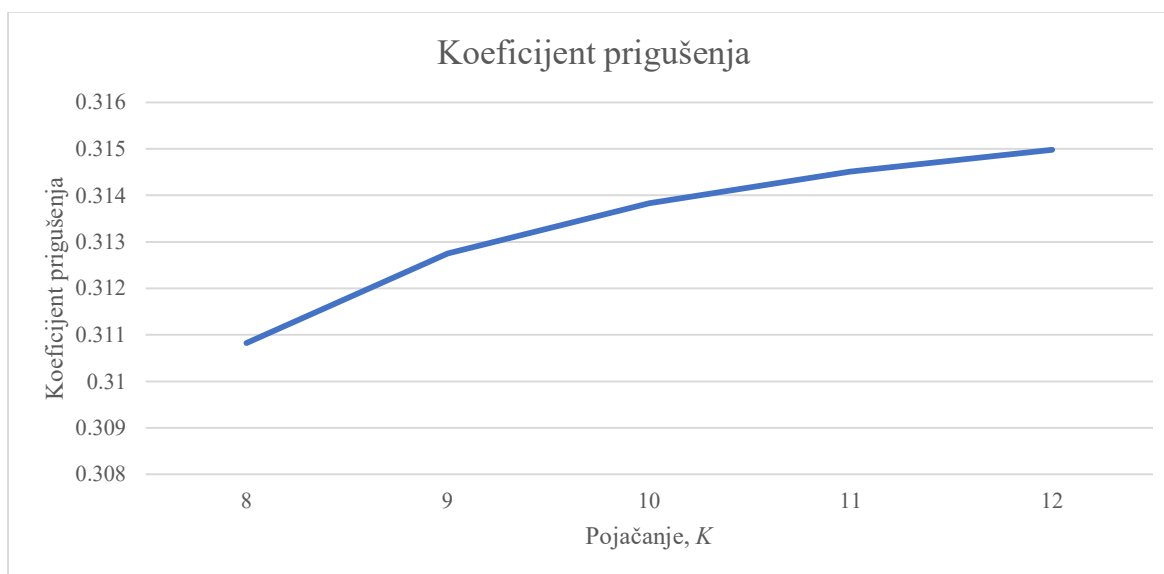
Slika 4.85 Djelatna snaga za varijacije pojačanja donjeg skupa vrijednosti za  $t = 250$  ms, scenarij 3

Poboljšanje kvalitete odziva se može uočiti i na slici 4.86 koja prikazuje odziv brzine generatora za različite vrijednosti pojačanja.



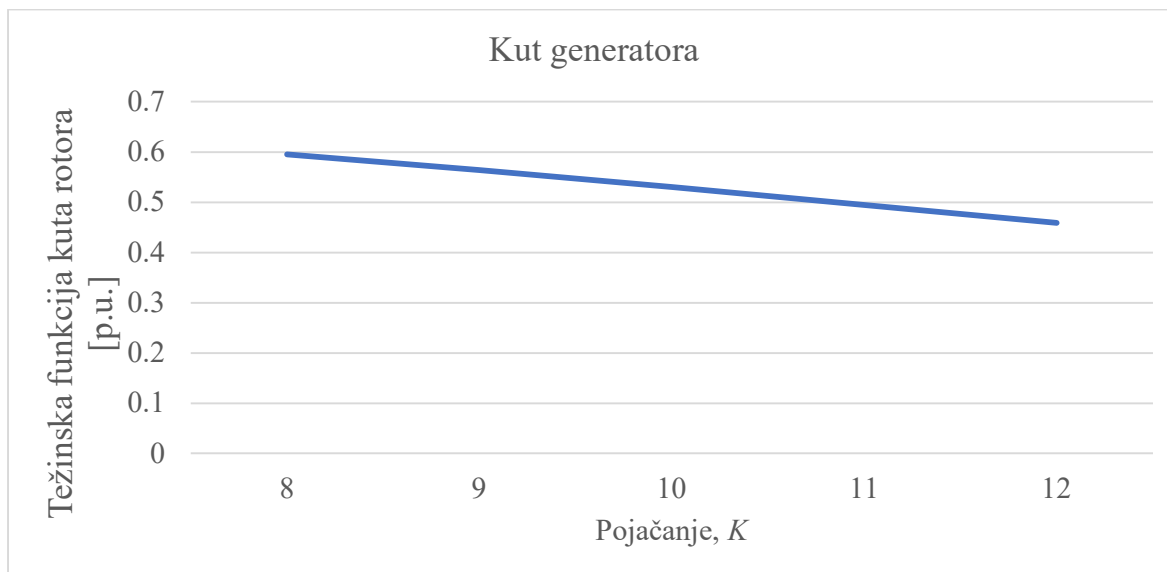
Slika 4.86 Brzina generatora za varijacije pojačanja donjeg skupa vrijednosti za  $t = 250$  ms, scenarij 3

Za navedene kombinacije pojačanja i vremenske konstante  $T = 0.6$  sekundi, određene su težinske funkcije koje su prikazane i slikama 4.87-4.91. Prva prikazana je težinska funkcija prigušenja. Povećanjem pojačanja i koeficijent prigušenja je povećan, a oscilatorna stabilnost poboljšana.



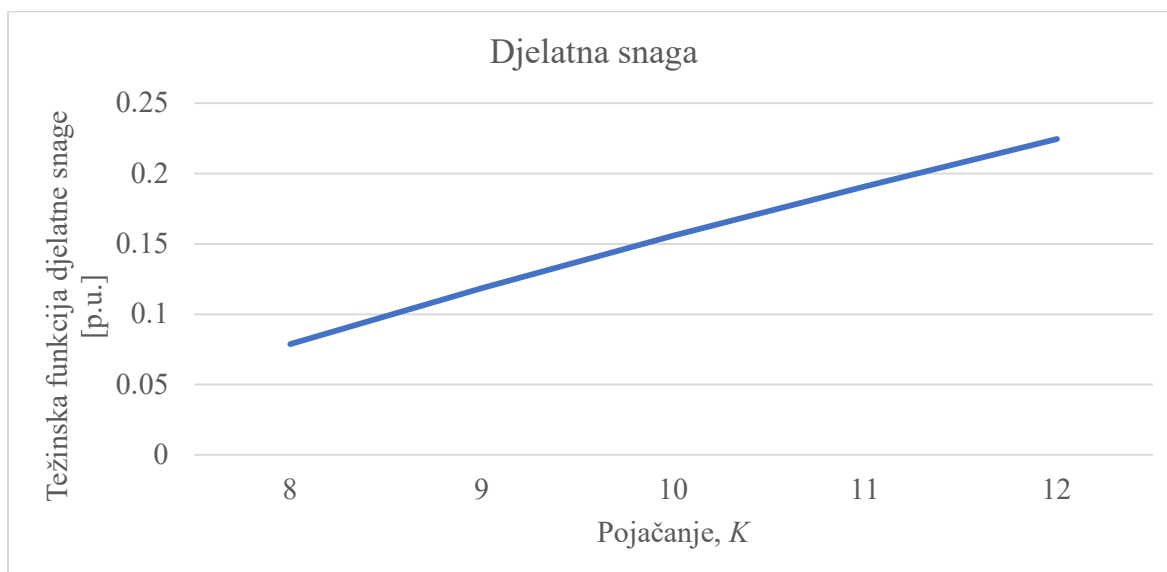
Slika 4.87 Težinska funkcija koeficijenta prigušenja za varijaciju pojačanja donjeg skupa vrijednosti za  $t = 250$  ms, scenarij 3

Težinska funkcija kuta rotora prikazana je slikom 4.88. Povećanjem pojačanja smanjuje se odstupanje trenutne vrijednosti veličine u odnosu na vrijednost prije poremećaja, odnosno smanjuje se nadvišenje nakon poremećaja i skraćuje vrijeme ustaljivanja.



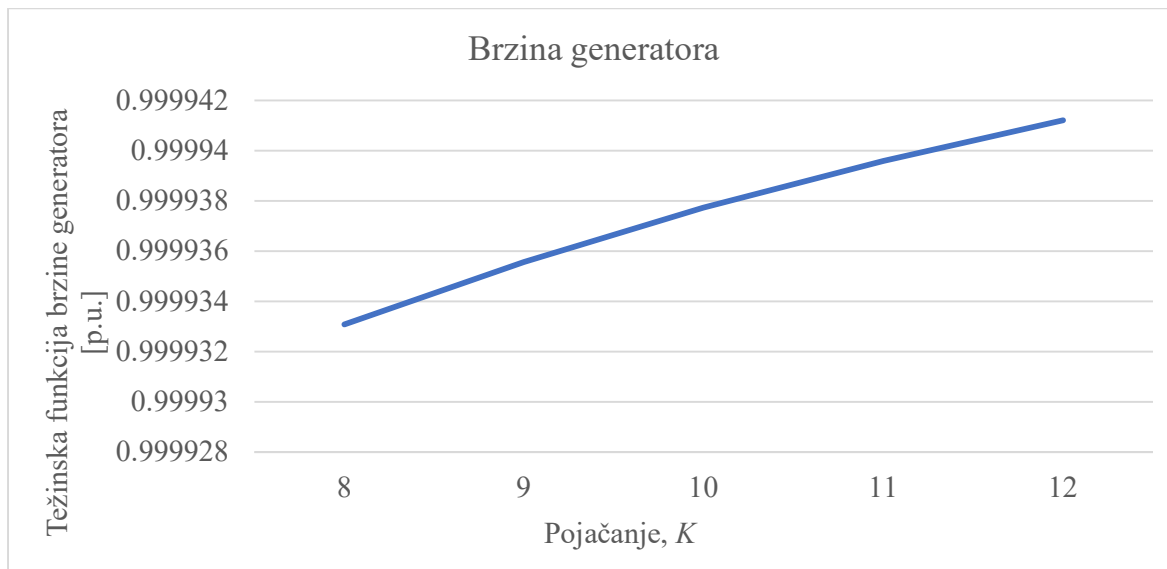
Slika 4.88 Težinska funkcija kuta rotora za varijaciju pojačanja donjeg skupa vrijednosti za  $t = 250$  ms, scenarij 3

Djelatna snaga (slika 4.89) ima trenda smanjenja odstupanja od početne veličine kako raste pojačanje stabilizatora elektromehaničkih oscilacija. Što je veća vrijednost pojačanja, smetnja se brže otklanja.



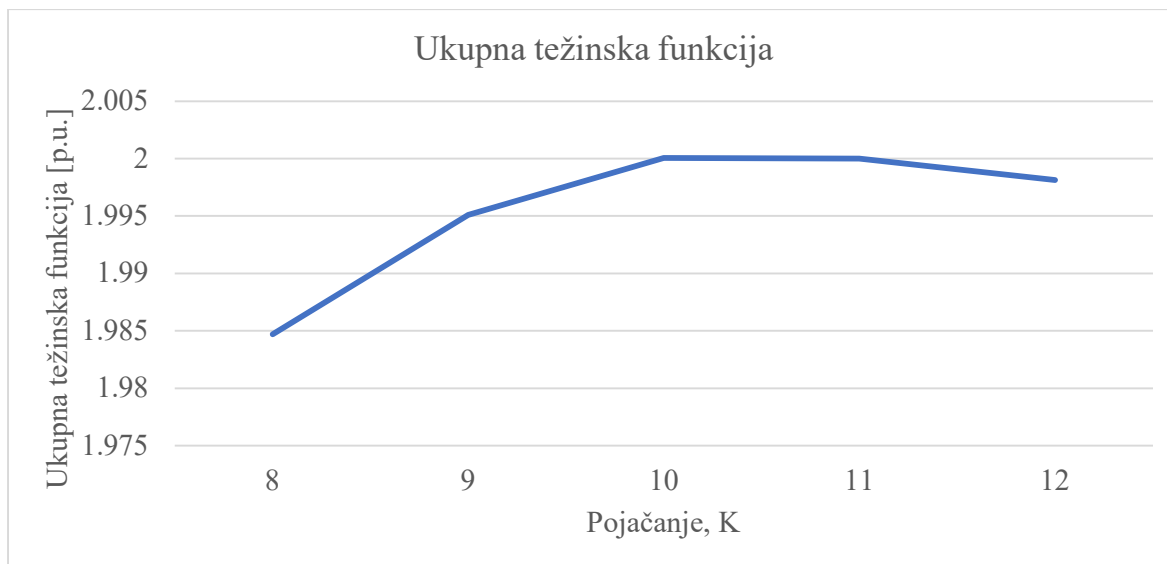
Slika 4.89 Težinska funkcija djelatne snage za varijaciju pojačanja donjeg skupa vrijednosti za  $t = 250$  ms, scenarij 3

I brzina generatora ima isti trend promjene (slika 4.90). Odstupanja, računata prema izrazima za težinske funkcije, su gotovo zanemariva stoga težinska funkcija postiže vrijednosti bliske 1. Promjene brzine su toliko malene da u konačnici neće značajno utjecati na odluku o konačnoj vrijednosti pojačanja.



Slika 4.90 Težinska funkcija koeficijenta prigušenja za varijaciju pojačanja donjeg skupa vrijednosti za  $t = 250$  ms, scenarij 3

Kada se zbroje pojedinačne vrijednosti težinskih funkcija, dobije se ukupna težinska funkcija za varijaciju pojačanja u donjem skupu vrijednosti pojačanja. Funkcija je prikazana slikom 4.91 i prema slici se može zaključiti da je uvjet ispunjen za pojačanje  $K = 10$ , u točki u kojoj ukupna težinska funkcija postiže svoj maksimum.



Slika 4.91 Težinska funkcija koeficijenta prigušenja za varijaciju pojačanja donjeg skupa vrijednosti za  $t = 250$  ms, scenarij 3



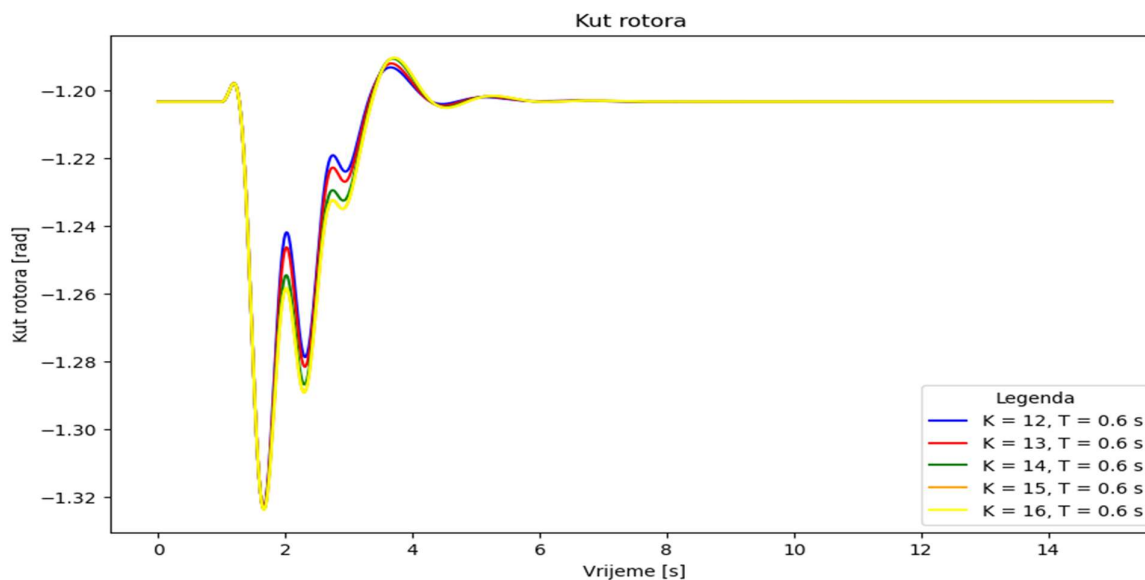
Vrijednosti pojedinačnih i ukupne težinske funkcije prikazane su i tablicom 4.25. Maksimum funkcije je, kao što se nedvojbeno vidi na slici 4.92, za iznos pojačanja  $K = 10$ . Ukupnu vrijednosti težinske funkcije i njezin maksimum uvelike određuje pokazatelj promjene kuta rotora i djelatne snage, budući da su preostale dvije vrijednosti približno konstantne pri povećanju pojačanja.

Tablica 4.25 Vrijednosti težinskih funkcija za varijaciju pojačanja u donjem skupu vrijednosti za  $t = 250$  ms, scenarij 3

Pojačanje, $K$	Koeficijent prigušenja	Kut rotora	Djelatna snaga	Brzina generatora	Ukupna težinska funkcija
8	0.31082	0.59508	0.07887	0.99993	1.98471
9	0.31275	0.56393	0.11846	0.99994	1.99508
10	0.31383	0.53042	0.15587	0.99994	2.00005
11	0.31451	0.49461	0.19093	0.99994	1.99999
12	0.31498	0.45863	0.22458	0.99994	1.99813

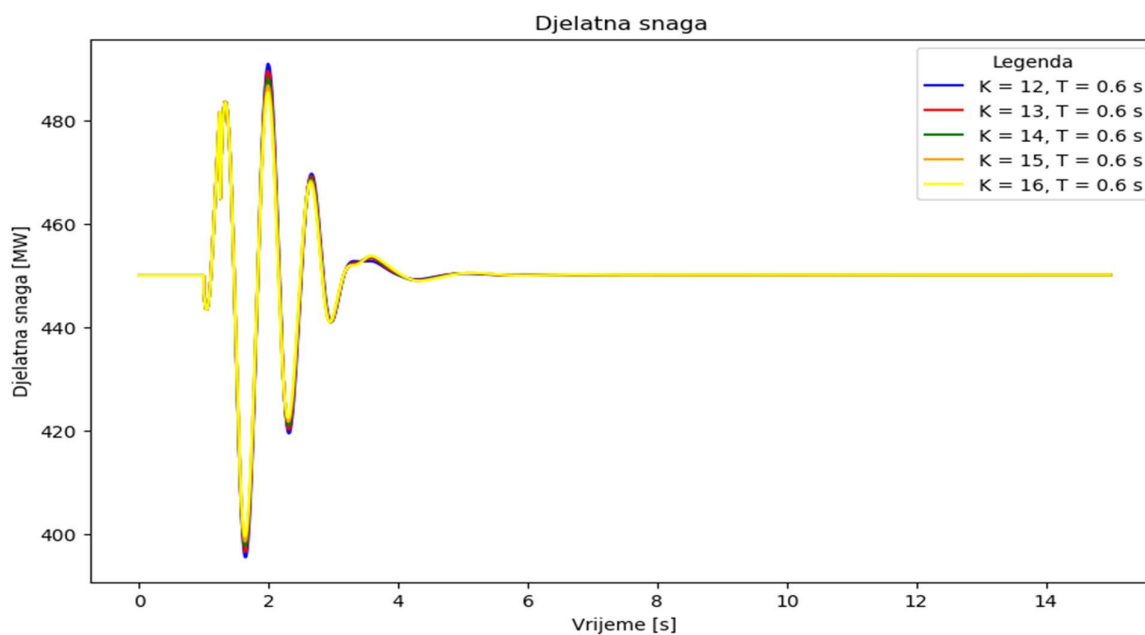
Iako je unutar razmatranog skupa vrijednosti pronađena vrijednost koja vjerojatno odgovara optimumu, potrebno je ponoviti razmatranja i za skup gornjih vrijednosti pojačanja, a koje se dobiju dobiju dodavanjem +1 na početno pojačanje. Tako se u gornjem skupu razmatraju vrijednosti pojačanja od 12 do 16 pri fiksnoj vremenskoj konstanti  $T = 0.6$  sekundi. Analiza kreće od prikaza odziva kuta rotora, djelatne snage i brzine generatora za sve varijacije pojačanja.

Kut rotora je prikazan slikom 4.92. Kao i za prethodni skup vrijednosti, i za skup gornjih vrijednosti se može uočiti razlika u odstupanju kuta rotora za različite vrijednosti pojačanja. Kako se pojačanje povećava, tako se povećava i odstupanje u odnosu na početnu vrijednost kuta rotora. Prema tome, povećanje pojačanja nakon određenog kritičnog iznosa može dovesti do narušavanja kvalitete regulacije i značajnijih odstupanja vrijednosti veličine od njezine ustaljene vrijednosti prije poremećaja.



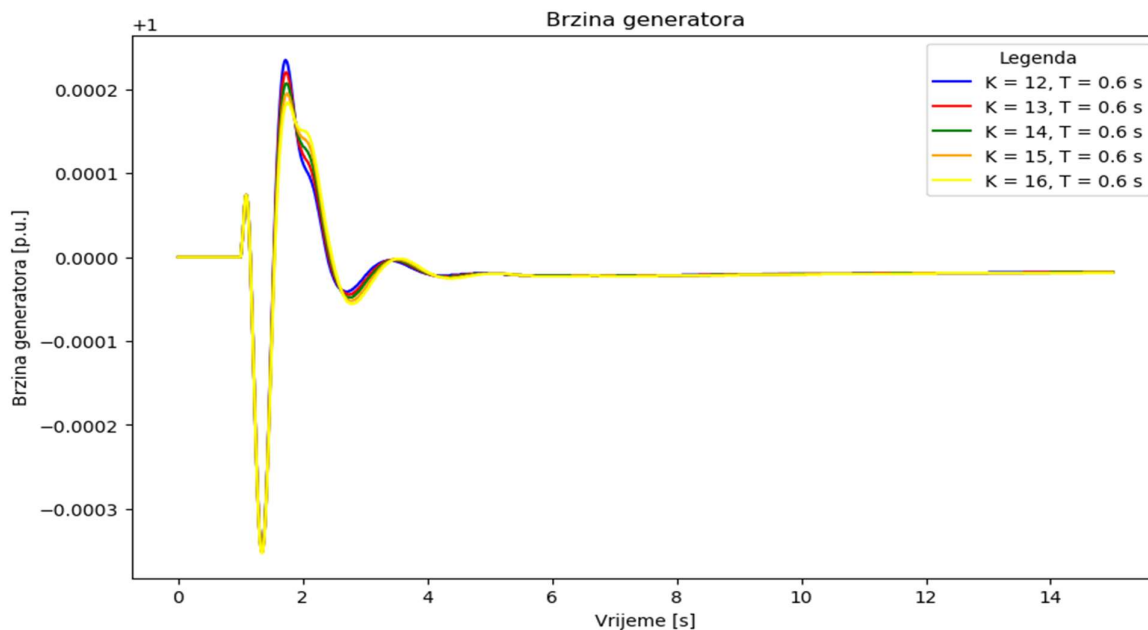
Slika 4.92 Kut rotora za varijacije pojačanja gornjeg skupa vrijednosti za,  $t = 250$  ms, scenarij 3

Slikom 4.93 prikazana je promjena djelatne snage nakon poremećaja za različite vrijednosti pojačanja. Povećanje pojačanja dovodi do poboljšanja odziva, uz smanjenje maksimalne i minimalne vrijednosti koju djelatna snaga dostiže tokom poremećaja uz gotovo jednako vrijeme smanjenja oscilacija.



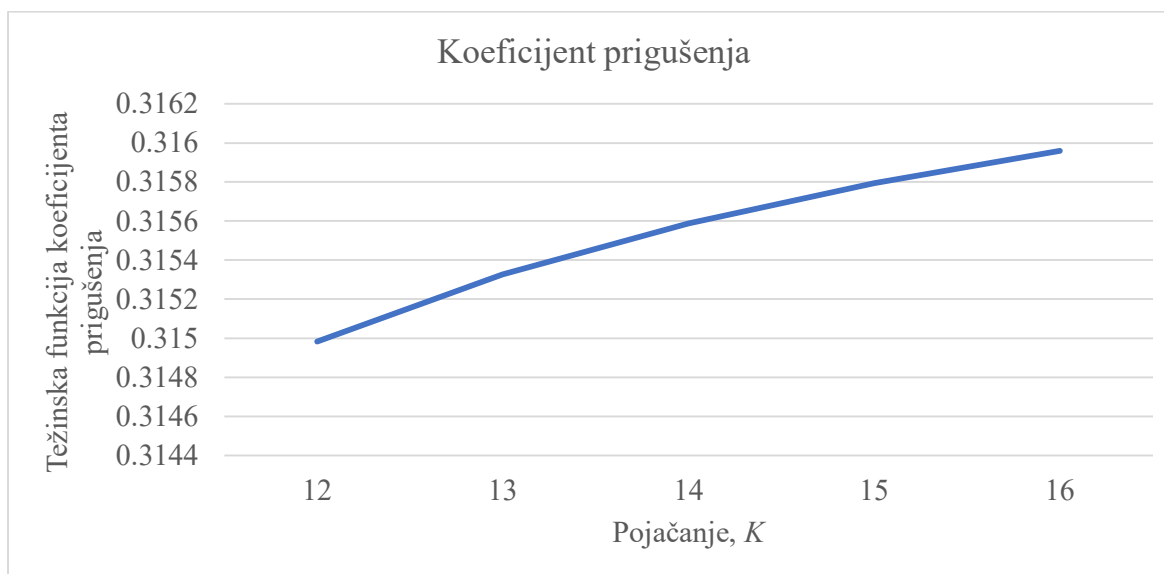
Slika 4.93 Djelatna snaga za varijacije pojačanja gornjeg skupa vrijednosti za  $t = 250$  ms, scenarij 3

Slika 4.94 prikazuje brzinu generatora za različite vrijednosti pojačanja. Kao i kod djelatne brzine, i ovdje se uočava da povećanje pojačanja rezultira boljim odzivom nakon poremećaja.



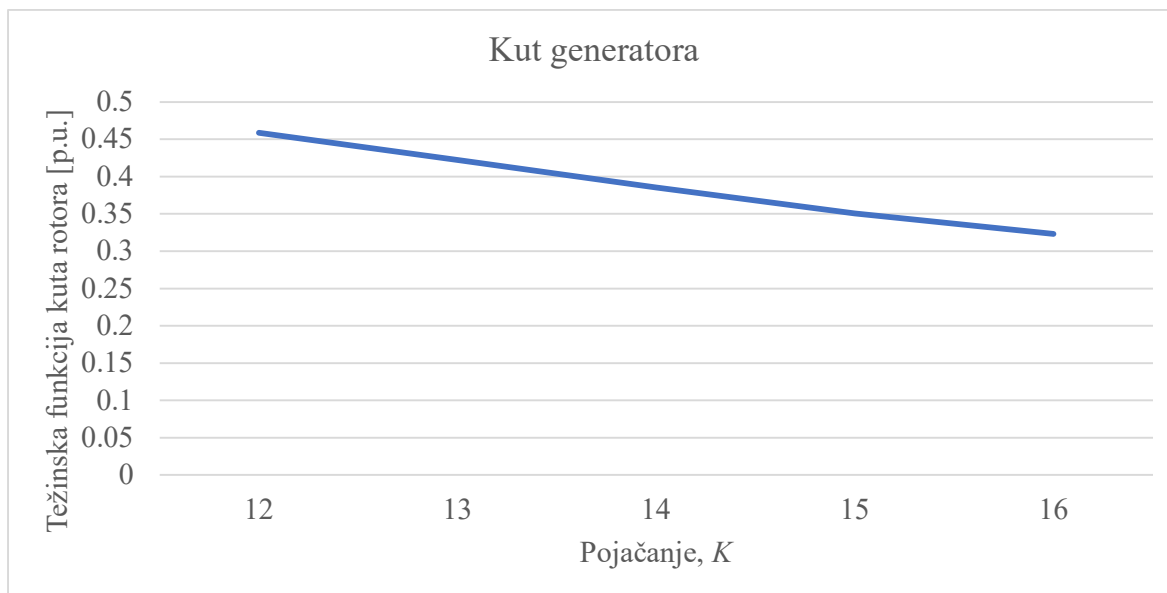
Slika 4.94 Brzina generatora za varijacije pojačanja gornjeg skupa vrijednosti za  $t = 250$  ms, scenarij 3

Iz navedenih odziva se računaju težinske funkcije, od kojih je prva rezultat iz kompleksne frekvencijske domene. Koeficijent prigušenja (slika 4.95) se povećava porastom pojačanja.



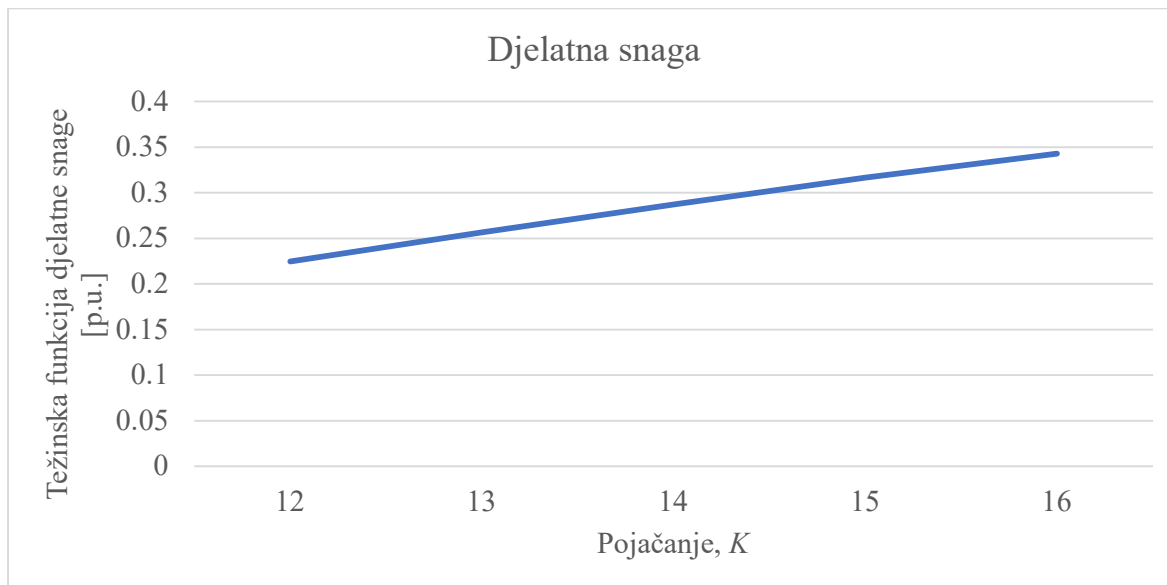
Slika 4.95 Težinska funkcija koeficijenta prigušenja za varijaciju pojačanja gornjeg skupa vrijednosti za  $t = 250$  ms, scenarij 3

Težinska funkcija kuta rotora prikazana je slikom 4.96. Povećanje pojačanja rezultirati će manjim iznosom vrijednosti težinske funkcije.



Slika 4.96 Težinska funkcija kuta rotora za varijaciju pojačanja gornjeg skupa vrijednosti za  $t = 250$  ms, scenarij 3

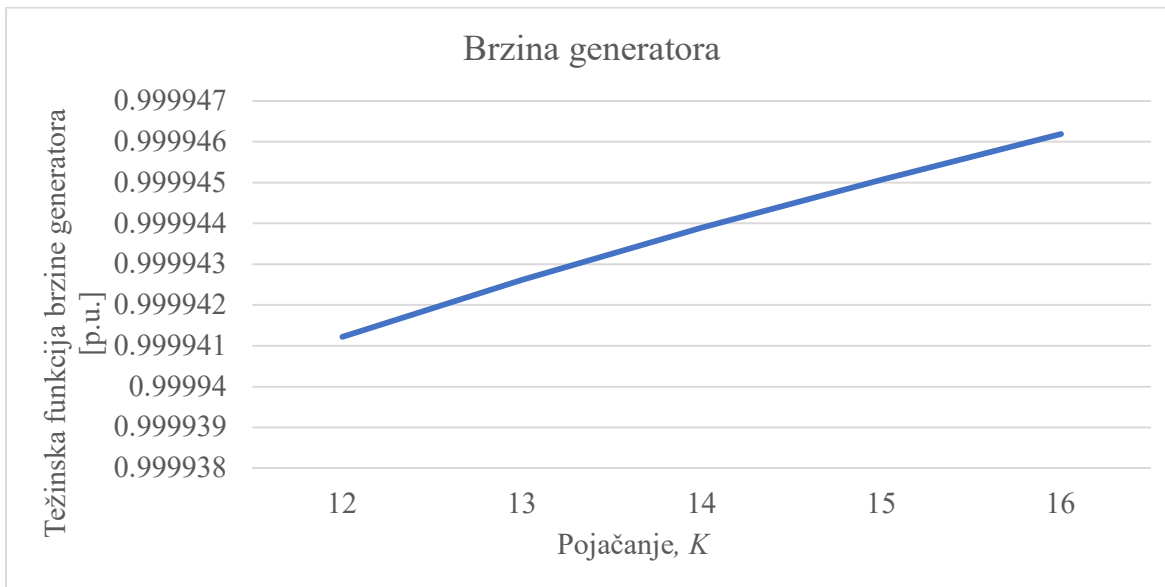
Težinska funkcija djelatne snage prikazana je slikom 4.97. S obzirom da se kvaliteta odziva poboljšava, što se uočava smanjenjem vrijednosti nadvišenja nakon poremećaja, jasno je da se povećanjem pojačanja može smanjiti oscilacija snage nakon poremećaja. Iz navedenog se može zaključiti da je poželjno izabrati nešto veću vrijednost pojačanja.



Slika 4.97 Težinska funkcija djelatne snage za varijaciju pojačanja gornjeg skupa vrijednosti za  $t = 250$  ms, scenarij 3

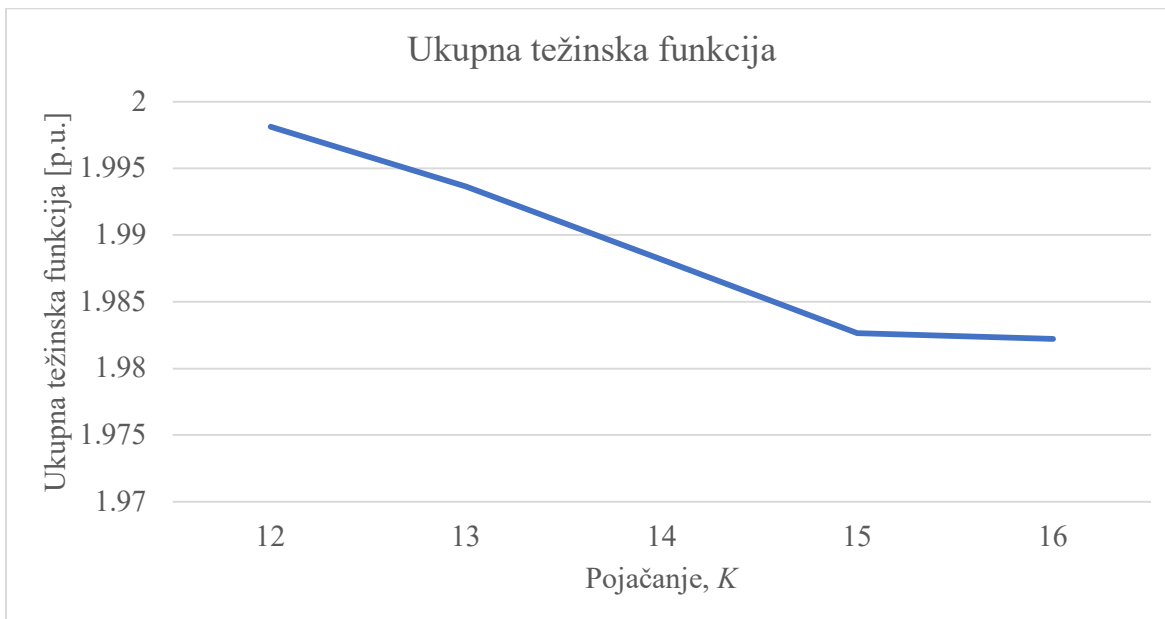
I za brzinu generatora se može zaključiti da će povećanje pojačanja dovesti do manjih odstupanja brzine kratko nakon poremećaja dok traje ustaljivanje do konačne vrijednosti (slika 4.98).

Odstupanja su kao i za prethodna razmatranja jako malena i imaju jako mali utjecaj na konačnu težinsku funkciju.



Slika 4.98 Težinska funkcija brzine generatora za varijaciju pojačanja gornjeg skupa vrijednosti za  $t = 250$  ms, scenarij 3

Konačno, konačna odluka o izboru optimalnog iznosa pojačanja se donosi iz ukupne težinske funkcije, prikazane slikom 4.99. Na slici se, za razliku od varijacija unutar donjeg skupa vrijednosti, ne može jasno pronaći veličina koja je lokalni maksimum funkcije.



Slika 4.99 Ukupna težinska funkcija za varijaciju pojačanja gornjeg skupa vrijednost za  $t = 250$  ms, scenarij 3

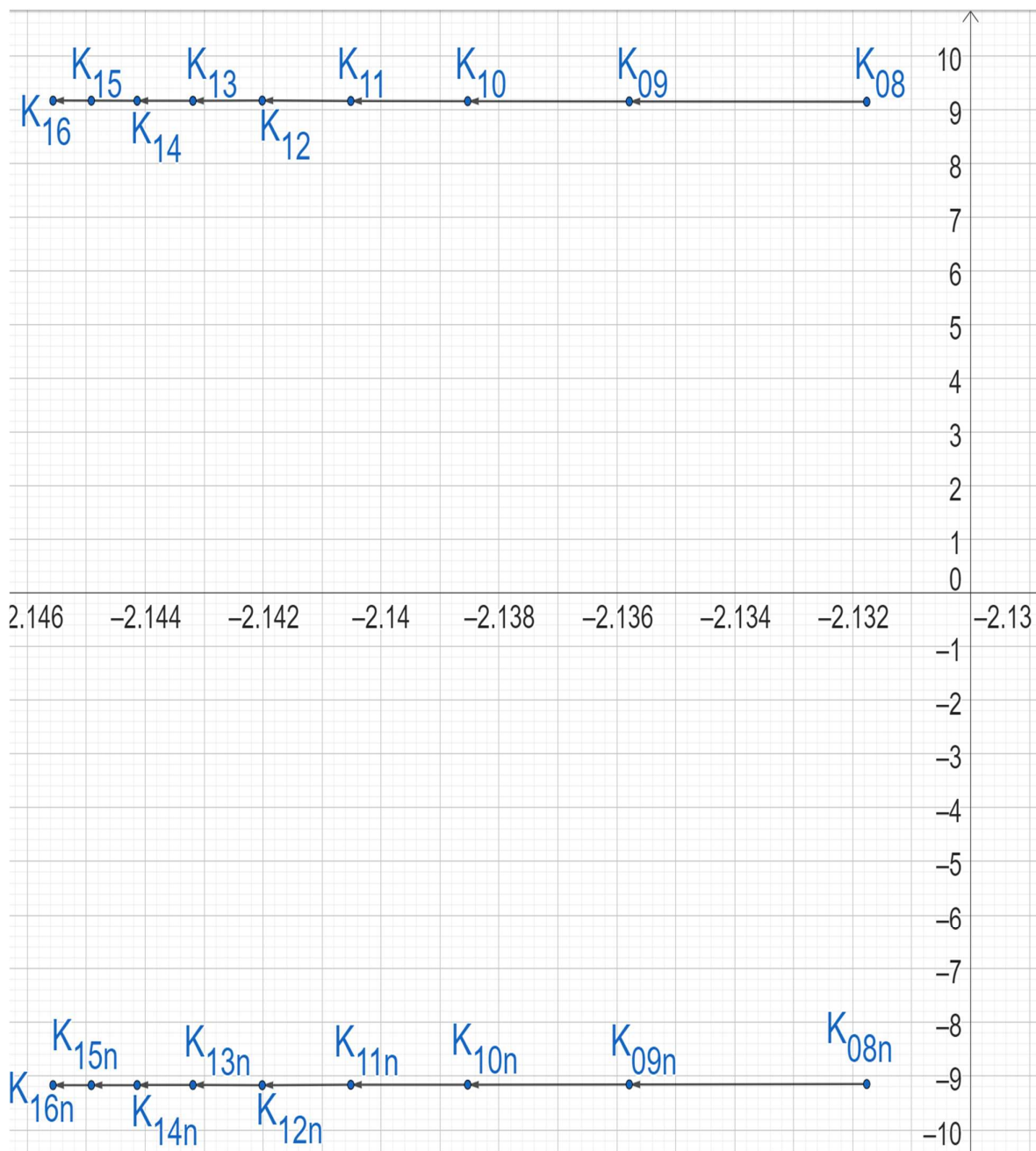
Vrijednost težinske funkcije se smanjuje s porastom pojačanje te se kao najbolja vrijednost iz ovog skupa uzima pojačanje  $K = 12$ . U donjem skupu vrijednosti najbolja vrijednost pojačanja je iznosila  $K = 10$ . U gornjem skupu najbolja vrijednost iznosi  $K = 12$ . Kada se usporede vrijednosti težinskih funkcija (tablicom 4.26 prikazane su vrijednosti težinskih funkcija za gornji skup vrijednosti pojačanja), jasno je da se najveća vrijednost težinske funkcije (2.000051) dobije pri pojačanju  $K = 10$ .

Tablica 4.26 Vrijednosti težinskih funkcija za varijaciju pojačanja u gornjem skupu vrijednosti za  $t = 250$  ms, scenarij 3

Pojačanje, $K$	Koeficijent prigušenja	Kut rotora	Djelatna snaga	Brzina generatora	Ukupna težinska funkcija
12	0.31498	0.45863	0.22458	0.99994	1.99813
13	0.31533	0.42204	0.25634	0.99994	1.99365
14	0.31559	0.38560	0.28704	0.99994	1.98817
15	0.31579	0.35043	0.3165	0.99995	1.98266
16	0.31596	0.32335	0.34296	0.99995	1.98222

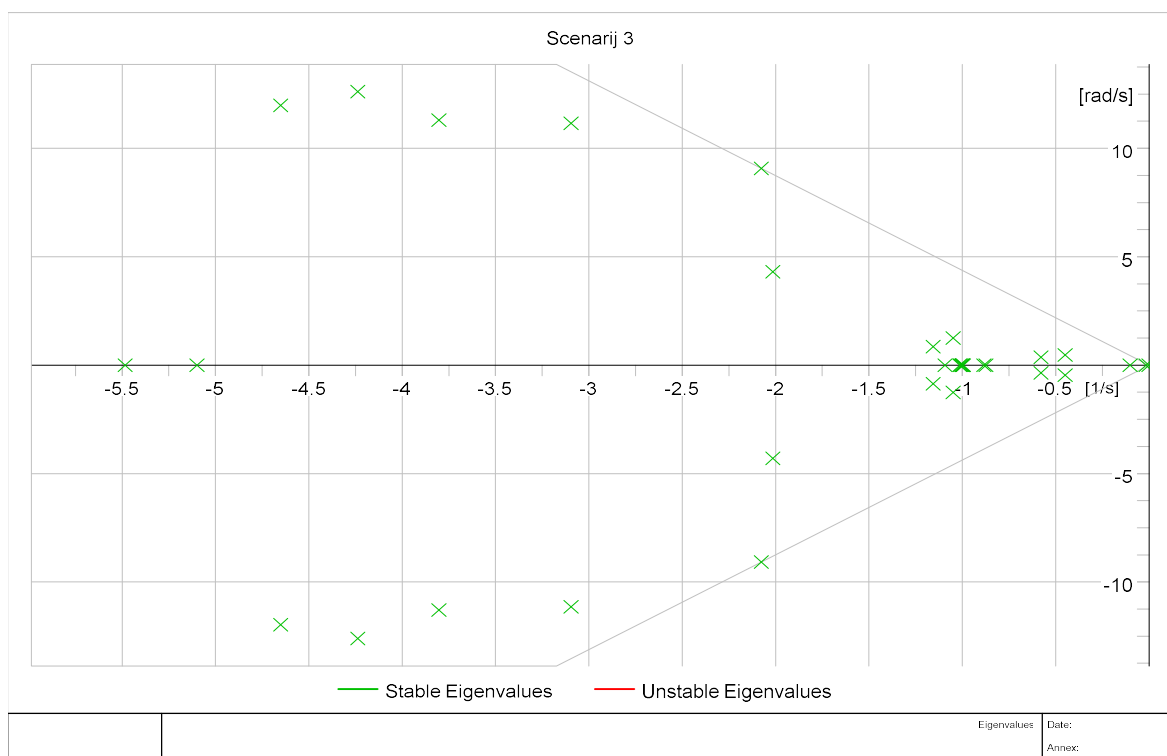
Rezultantne težinske funkcije pokazuju da za vremensku konstantu  $T = 0.6$  sekundi, uvjet (3-48) je ispunjen za pojačanje  $K = 10$ . Stoga se kao konačna najbolja vrijednost uzima ta kombinacija. U prethodnim razmatranjima prikazan je utjecaj promjene pojačanja na tranzijentnu stabilnost. Međutim, kako je navedeno u osnovi metodologije, pri parametriranju se mora uzeti obzir i na oscilatornu stabilnost. Stoga se u nastavku pokazuje što se događa s dominantnim polom pri povećanju pojačanja (slika 4.100).

Povećanje pojačanja pri fiksnoj vremenskoj konstanti će rezultirati poboljšanjem oscilatorne stabilnosti i pomakom polova u lijevu stranu kompleksne frekvencijske ravnine. Za vrijednosti bliske optimalnoj poboljšanje i pomak će biti jasno izraženi dok za sve veće vrijednosti utjecaj na poboljšanje oscilatorne stabilnosti postaje slabije izražen. U konačnici, s izrazito velikom vrijednošću pojačanja, oscilatorni polovi se počinju vraćati prema ishodištu čime se narušava oscilatorna stabilnost.



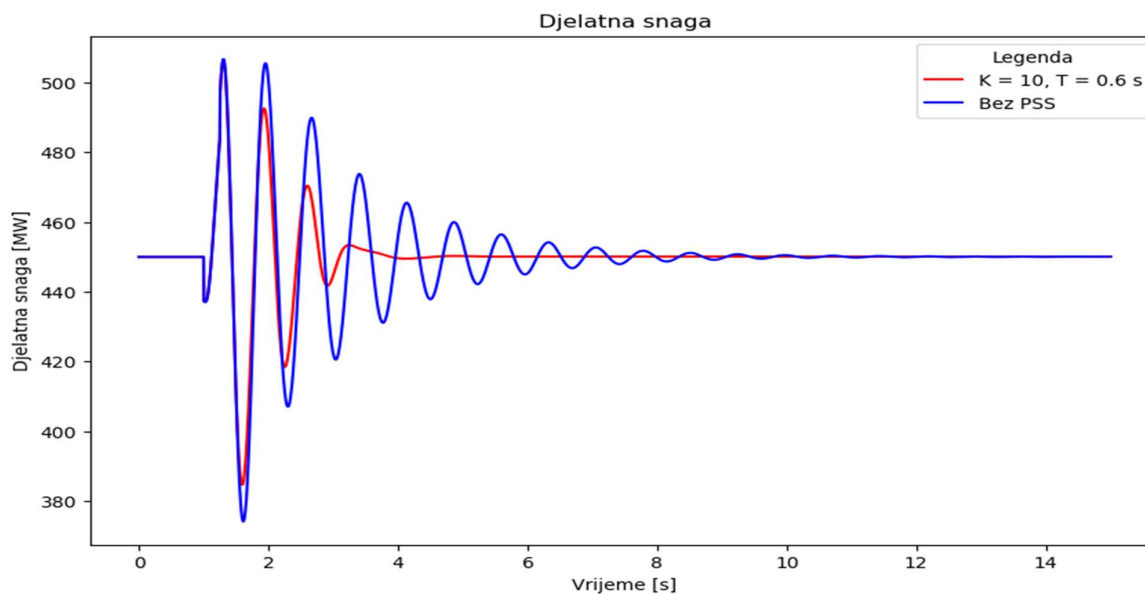
Slika 4.100 Položaj dominantnog pola pri povećanju pojačanja za  $t = 250$  ms, scenarij 3

Zadnji korak metode parametriranja je usporedba odziva djelatne snage, brzine generatora i kuta rotora bez stabilizatora elektromehaničkih oscilacija i sa stabilizatorom čiji su parametri pojačanje  $K = 10$  i vremenska konstanta  $T = 0.6$  sekunde. Slikom 4.101 prikazana je krivulja mjesta korijena iz koje se vidi položaj oscilatornih polova nakon što je implementiran stabilizator elektromehaničkih oscilacija. Iz slike i usporedbe s krivuljom mjesta korijena bez stabilizatora elektromehaničkih oscilacija jasno je da je oscilatorna stabilnost poboljšana, oscilatorni modovi uzrokovani generatorom Gen1 su pomjereni u lijevu stranu kompleksne ravnine.



Slika 4.101 Krivulja mjesta korijena za  $t = 250$  ms, scenarij 3

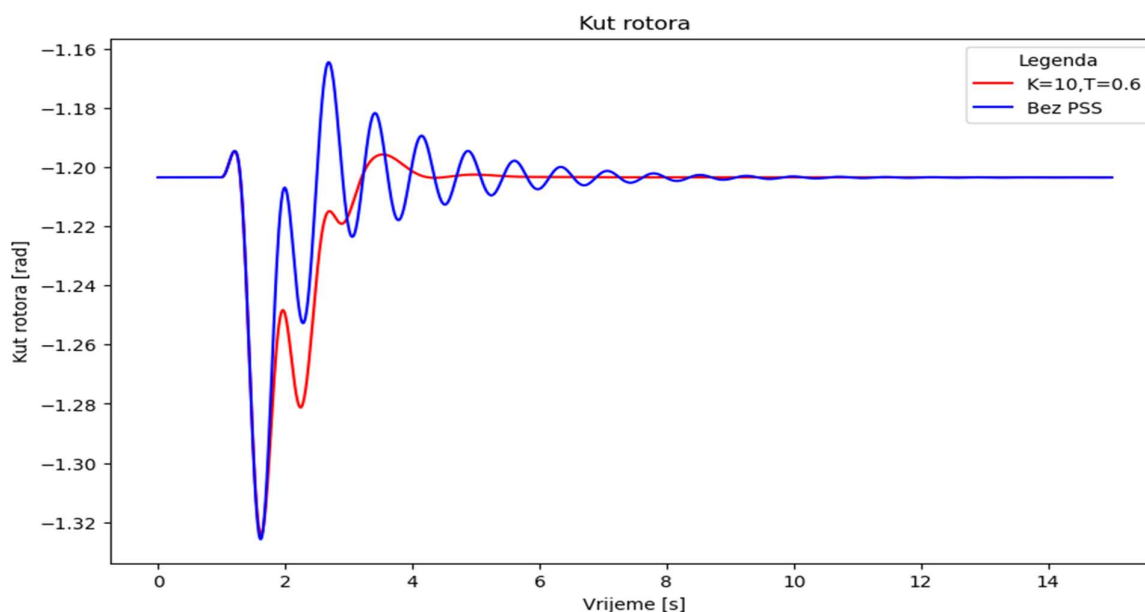
Također, poboljšana je i tranzijentna stabilnost, što se može vidjeti slikom 4.102, na kojoj je prikazana usporedba djelatne snage bez stabilizatora elektromehaničkih oscilacija i sa stabilizatorom čiji su parametri odabrani analitičkom metodom. Vrijeme ustaljivanja nakon poremećaja je znatno kraće, a tranzijentna stabilnost poboljšana.



Slika 4.102 Djelatna snaga, stabilizator elektromehaničkih oscilacija analitičkom metodom pri  $t = 250$  ms, scenarij 3

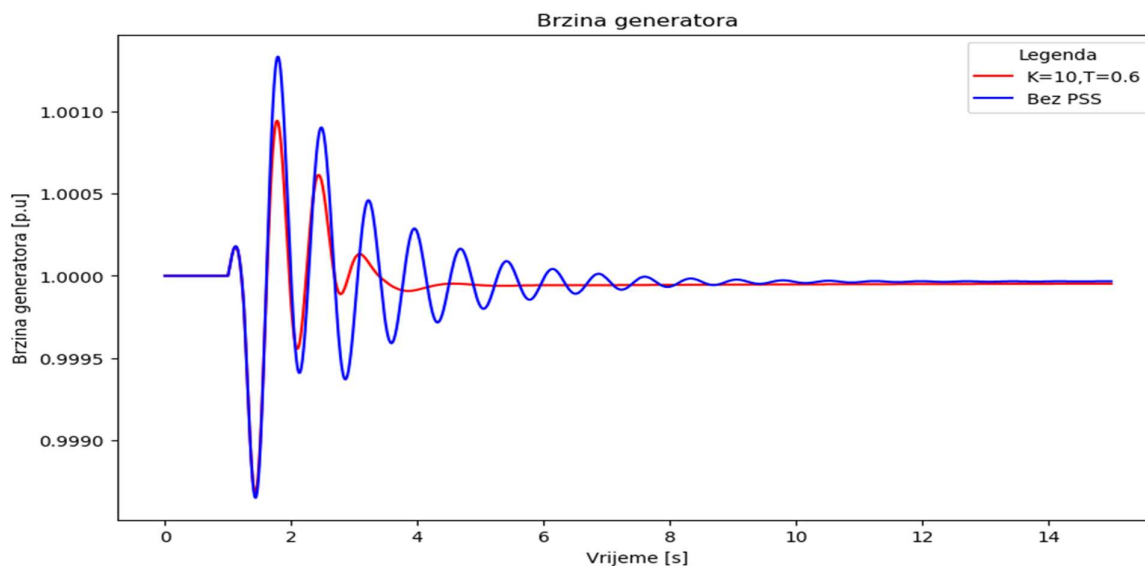


Poboljšanje je značajno i kod kuta rotora, prikazanog slikom 4.103, oscilacije kraće traju i samim time se brže postiže ustaljeno stanje. U odnosu na sustav u kojem nema stabilizatora elektromehaničkih oscilacija, jasno je da se stabilnost značajno poboljšala.



Slika 4.103 Kut rotora, stabilizator elektromehaničkih oscilacija analitičkom metodom pri  $t = 250$  ms, scenarij 3

Kao i za preostale dvije veličine, i brzina generatora brže doseže ustaljenu vrijednost kad se primjenjuje stabilizator elektromehaničkih oscilacija. Slikom 4.104 prikazana je usporedba brzine generatora za slučaj kada je primijenjen stabilizator i bez njega. Uz stabilizator se oscilacije pri-  
gušuju za 5 sekundi, dok je bez stabilizatora potrebno i do desetak sekundi.



Slika 4.104 Brzina generatora, stabilizator elektromehaničkih oscilacija analitičkom metodom pri  $t = 250$  ms, scenarij 3

Utjecaj različitog vremena trajanja poremećaja ispitano je na istom višestrojnom sustavu, identičnoj konfiguraciji mreže i isti tip poremećaja. Sa stajališta oscilatorne stabilnosti nema nikakvih promjena jer su konfiguracija i svi parametri mreže ostali nepromijenjeni. Na vrijednosti težinskih funkcija će utjecati odzivi djelatne snage, kuta rotora i brzine koji će u slučaju većeg vremena trajanja poremećaja imati veća odstupanja od svoje vrijednosti prije poremećaja. Samim time se mijenjaju njihove vrijednosti i dolazi se do više vrijednosti vremenske konstante nego u scenariju 1. Također, što je veća vremenska konstanta, pojačanje sustava može biti niže kako bi se postiglo poboljšanje kvalitete regulacije.

#### 4.7 Scenarij 4 - Primjena metoda mekog računarstva u slučaju većeg poremećaja

Kao i za Scenarij 1, za trajanje poremećaja od 250 milisekundi se provodi usporedba analitičke s metodama mekog računarstva. Ograničenja ostaju ista kao i Scenariju 2 te se međusobno uspoređuju pojedinačne vrijednosti koje se dobiju kao optimalne za određeni postavljeni set uvjeta. Razmatraju se metoda roja čestica, genetski algoritam, simulirano kaljenje i tabu pretraživanje.

##### 4.7.1 Metoda roja čestica

Optimizacija primjenom metode roja čestica se provodi za početne rojeve 100, 200, 300, 400 i 500 čestica i 1000 iteracija. Početni skupovi su tako formirani da do konvergencije dolazi unutar 1000 iteracija i rezultati ostaju isti bez obzira na početni broj iteracija. Rezultati su prikazani tablicom 4.27. Trajanje iteracija je u rasponu između 3 i 14.8 sekundi, a iz rezultata se uočava da za većinu rezultata optimalna vremenska konstanta ima isti iznos. Također, rezultati za 400 i 500 početnih čestica su identični, a kako se pokazalo u prethodnim scenarijima vrijednosti pojačanja preko  $K = 20$  mogu rezultirati narušavanjem oscilatorne i tranzijentne stabilnosti.

Tablica 4.27 Rezultati metode roja čestica za  $t = 250$  ms, scenarij 4

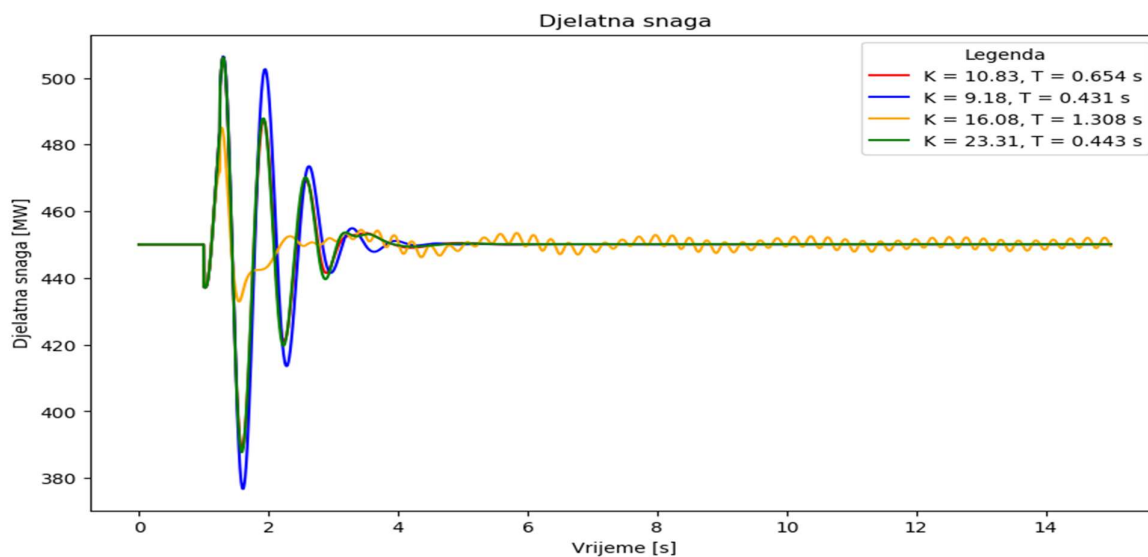
Broj iteracija	Početni roj	Pojačanje, $K$	Vremenska konstanta, $T$ [s]	Vrijeme optimizacija, $t$ [s]
1000	100	10.83	0.654	2.967
1000	200	9.18	0.431	5.968
1000	300	16.08	1.308	8.862
1000	400	23.31	0.443	11.939
1000	500	23.31	0.443	14.802

Za vrijednosti dobivene pri optimizaciji 100, 200 i 300 početnih čestica se prvo provodi modalna analiza čiji su rezultati dani tablicom 4.28. S obzirom da su prve dvije vrijednosti približno jednake, nema velike razlike u oscilatornim modovima.

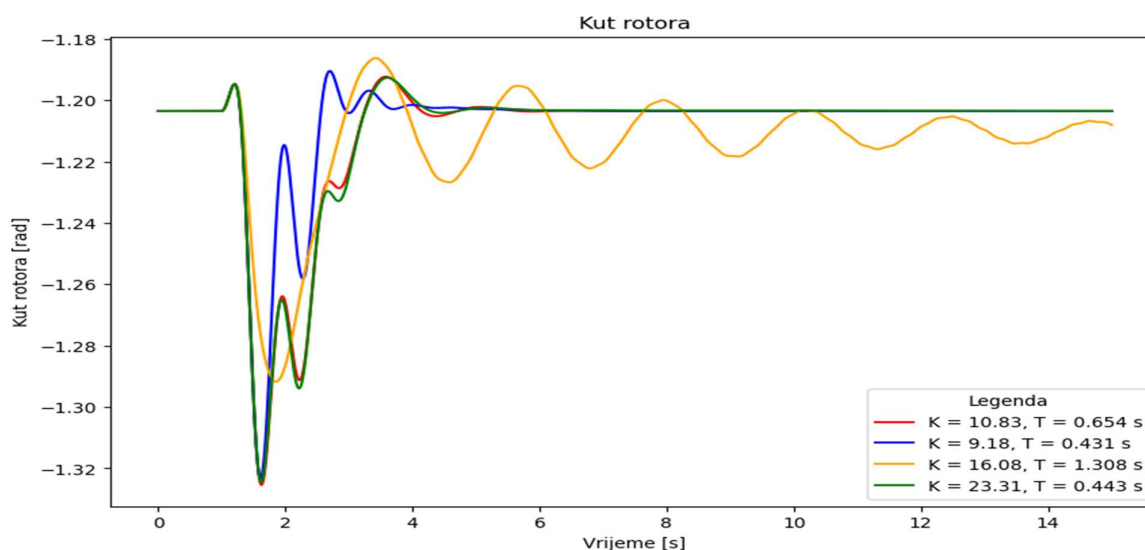
Tablica 4.28 Oscilatorni modovi za stabilizator parametriran metodom roja čestica za  $t = 250$  ms, scenarij 4

	$K = 10.83,$ $T = 0.654$ s	$K = 9.18,$ $T = 0.431$ s	$K = 16.08,$ $T = 1.308$ s	$K = 23.31,$ $T = 0.443$ s
1	-2.143666024 $\pm 9.163007319$	-2.008124774 $\pm 11.1137366$	-2.151964449 $\pm 9.17456115$	-2.14051047 $\pm 9.165220952$
2	-3.081235337 $\pm 11.14008042$	-2.41966334 $\pm 9.513068053$	-3.068658838 $\pm 11.14176533$	-3.08232682 $\pm 11.13516775$
3	-3.811259249 $\pm 11.34617328$	-3.056460027 $\pm 11.15942082$	-3.825759536 $\pm 11.36483857$	-3.80120886 $\pm 11.35120208$
4	-4.235699951 $\pm 12.61129718$	-3.848290206 $\pm 11.37898604$	-4.235695573 $\pm 12.61250368$	-4.18844032 $\pm 13.47331197$
5	-4.879126501 $\pm 13.74970984$	-4.235965617 $\pm 12.61292482$	1.911970721 $\pm 25.61537907$	-4.23453756 $\pm 12.61111967$

Rezultat pri kojemu je pojačanje  $K = 16.08$  i vremenska konstanta  $T = 1.308$  sekundi rezultiraju nestabilnošću. Oscilatorna nestabilnost je značajno narušena i jedan oscilatorni mod prelazi u desnu stranu kompleksne ravnine. Za razliku od tog slučaja, pri značajno većem iznosu pojačanja, ali manjem iznosu vremenske konstante dolazi do poboljšanja stabilnosti iz čega se može potvrditi raniji zaključak da sve vrijednosti koje imaju istovremeno veliki iznos pojačanja i vremenske konstante neće rezultirati poboljšanjem stabilnosti ili će to poboljšanje biti manje nego za manje iznose pojačanja i vremenske konstante. Osim oscilatorne nestabilnosti, za te kombinacije pojačanja i vremenske konstante, tranzijentna stabilnost će također biti narušena. Slika 4.105 prikazuje djelatne snage nakon poremećaja za stabilizatore parametrirane metodom roja čestica. Za pojačanje  $K = 16.08$  i vremensku konstantu  $T = 1.308$  sekunde se uočavaju trajne oscilacije stoga se ta kombinacija svakako mora izdvojiti iz razmatranja kao mogući parametri stabilizatora.

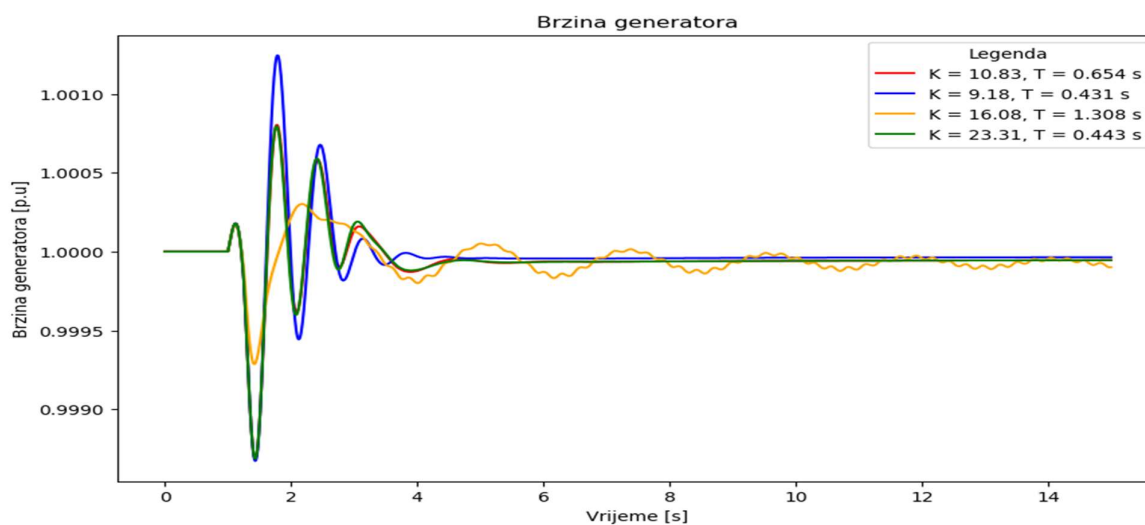

 Slika 4.105 Djelatna snaga za stabilizatore parametrirane metodom roja čestica za  $t = 250$  ms, scenarij 4

Iako je očekivan da će vrijednost pojačanja  $K = 23.31$  također izazvati trajne oscilacije ili nestabilnost za razmatrani testni sustav, u kombinaciji s niskom vremenskom ( $T = 0.443$  sekunde), stabilizator parametriran s tim vrijednostima će poboljšati tranzijentnu stabilnost. Iz slike 4.106 se vidi da odziv kuta rotora za dobivene četiri vrijednosti pojačanja i vremenske konstante, a iz koje se također uočava da kombinacija s velikom vremenskom konstantom rezultira oscilacijama koje traju duže nego za slučaj bez stabilizatora elektromehaničkih oscilacija.



Slika 4.106 Kut rotora za stabilizatore parametrirane metodom roja čestica za  $t = 250$  ms, scenarij 4

I za signal brzine generatora, prikazan slikom 4.107 se također uočavaju oscilacije pri velikoj vremenskoj konstanti. Odzivi za ostale kombinacije pojačanja i vremenskih konstanti se razlikuju po nadvišenju vrijednosti u odnosu na početnu, koje je najveće za pojačanje  $K = 9.18$ .



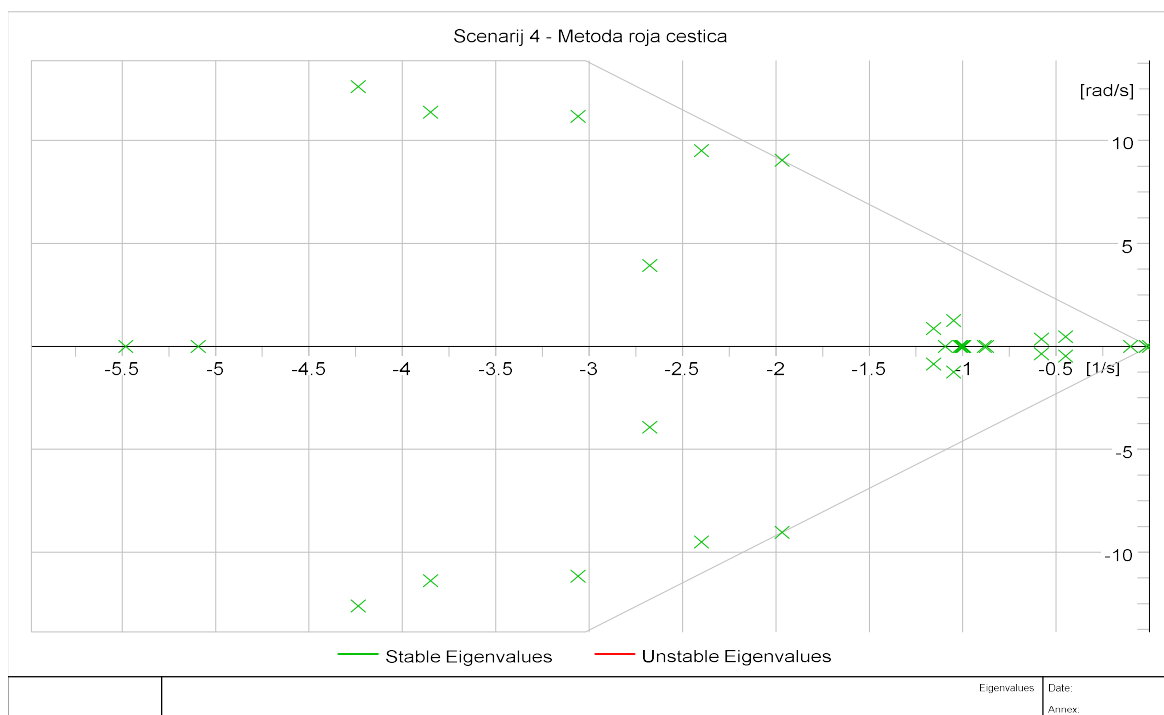
Slika 4.107 Brzina generatora za stabilizatore parametrirane metodom roja čestica za  $t = 250$  ms, scenarij 4

Kao i za prethodne slučajeve i scenarije, i u ovom scenariju se odluka o izboru optimalnih parametara donosi na temelju vrijednosti funkcije cilja oja je najveća za kombinaciju pojačanja  $K = 9.18$  i vremenske konstante  $T = 0.431$  sekunde, što se može vidjeti i u tablici 4.29.

Tablica 4.29 Težinske funkcije za metodu roja čestica za  $t = 250$  ms, scenarij 4

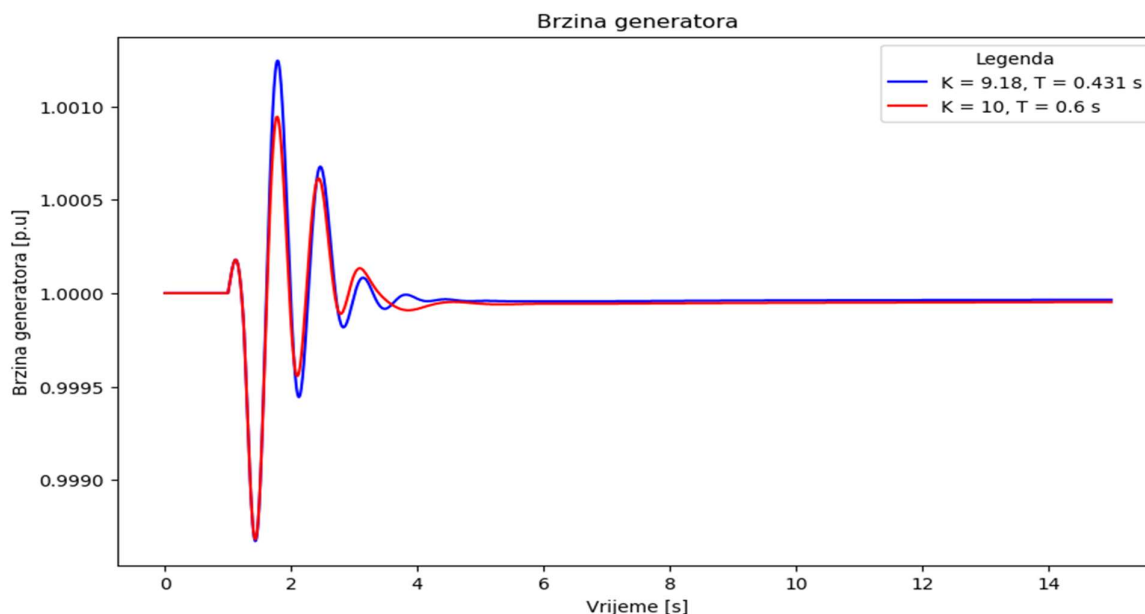
Parametri	Početni broj čestica	Koeficijent prigušenja	Djelatna snaga	Kut rotora	Brzina generatora	Ukupno
$K = 9.18,$ $T = 0.431$ s	200	0.215237	0.253869	0.429781	0.999942	1.898829
$K = 10.38,$ $T = 0.654$ s	100	0.227797	-0.076136	0.668687	0.999923	1.820270
$K = 23.31,$ $T = 0.443$ s	400, 500	0.227427	0.238131	0.418919	0.999942	1.884419

Sve tri vrijednosti rezultiraju gotovo identičnim vrijednostima funkcije cilja, ali najbolja vrijednost se postiže s navedenom kombinacijom parametara. Vrijednost je također bliska vrijednosti koja se dobije je približno jednaka kao i vrijednost koja se dobije analitičkom metodom. U nastavku je prikazana krivulja mjesta korijena (slika 4.108) i kao što se vidi iz rezultata, oscilatorna stabilnost je poboljšana u odnosu na analizu bez stabilizatora elektromehaničkih oscilacija.



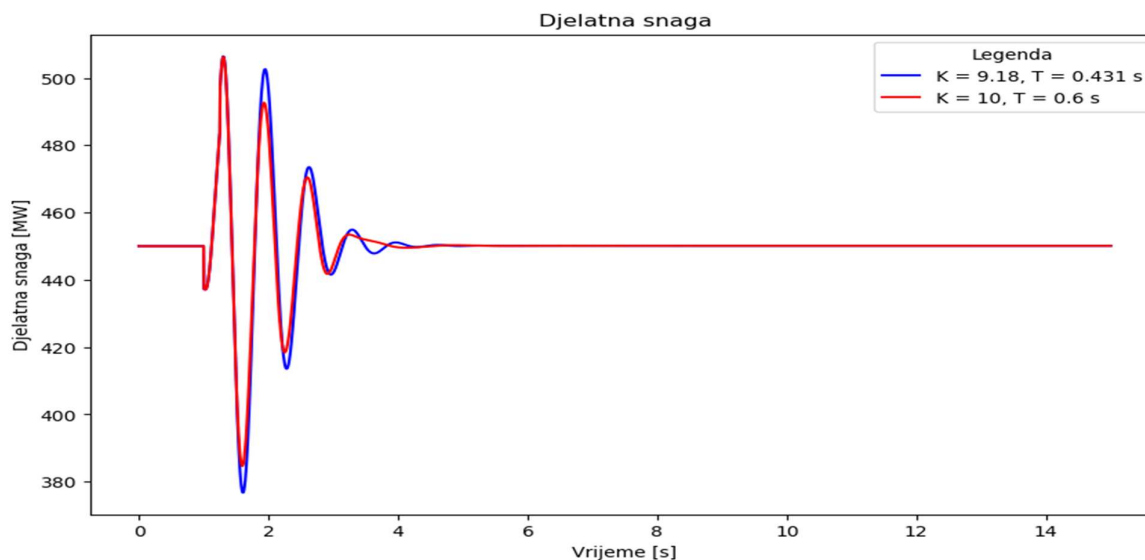
Slika 4.108 Krivulja mjesta korijena za stabilizator parametriran metodom roja čestica za  $t = 250$  ms, scenarij 4

Plavom krivuljom prikazan je odziv generatora parametriranog metodom roja čestica i za njega se jasno uočava da je kvaliteta regulacije znatno lošija nego za stabilizator parametriran analitičkom metodom (veće nadvišenje vrijednosti prije poremećaja i duže vrijeme ustaljivanja).



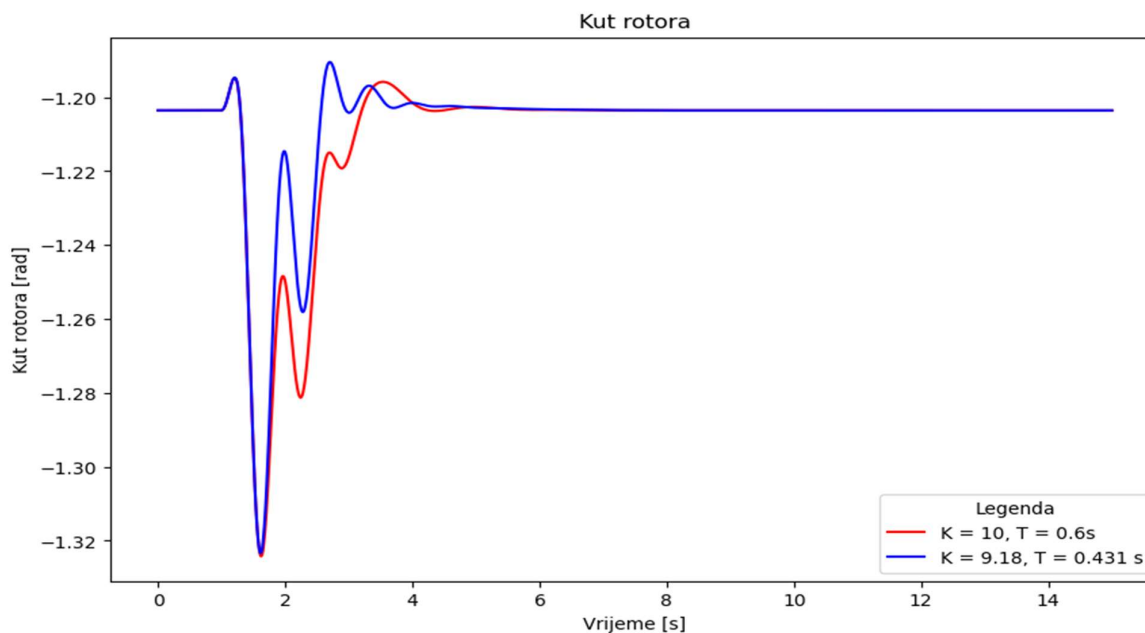
Slika 4.109 Usporedba brzine generatora za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom roja čestica za,  $t = 250$  ms, scenarij 4

Slika 4.110 prikazuje usporedbu djelatne snage za dvije metode parametriranja stabilizatora. Kao i za brzinu, i ovdje se može naglasiti prednost analitičke metode budući da su oscilacije snage nakon poremećaja znatno niže uz primjenu stabilizatora čiji su parametri određeni analitičkom metodom.



Slika 4.110 Usporedba djelatne snage za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom roja čestica za  $t = 250$  ms, scenarij 4

Usporedba kuta rotora, prikazana slikom 4.111 ukazuje na to da kut rotora brže postiže ustaljenu vrijednost uz primjenu stabilizatora s parametrima pojačanja  $K = 9.8$  i vremenske konstante  $T = 0.431$  sekundu. Drugim riječima, koje god vrijednosti stabilizatora se postave, neće se nužno poboljšati odzivi svih promatranih veličina, ali će u svakom slučaju doći do unapređenja u odnosu na sustav u kojemu uopće nije implementiran stabilizator elektromehaničkih oscilacija.



Slika 4.111 Usporedba kuta rotora za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom roja čestica za  $t = 250$  ms, scenarij 4

#### 4.7.2 Metoda genetskog algoritma

Parametriranje primjenom genetskog algoritma za slučaj kada je trajanje poremećaja 250 ms se provodi za iste početne uvjete i populaciju kao i u Scenariju 2. Razmatraju se rezultati pri 50, 100 i 200 generacija te 100, 200, 300, 400 i 500 početnih jedinki. Rezultantne vrijednosti pojačanja i vremenske konstante za navedene uvjete prikazani su tablicom 4.30. Prema ranije analiziranim slučajevima mogu se isključiti vrijednosti koje će rezultirati nestabilnošću sustava ili ne daju dovoljno poboljšanje. Tako se u prvom skupu, za 50 generacija mogu odbaciti rezultati za 200 jedinki (pojačanje 3.93 i vremenska konstanta  $T = 1.286$  sekundi) zbog nedovoljnog poboljšanja odziva, te vrijednosti za 300 i 500 jedinki koji zbog visokog iznosa pojačanja i velike vremenske konstante mogu dovesti do znatnog pogoršanja stabilnosti. Iz drugog skupa, određenog za 100 generacija, mogu se odbaciti vrijednosti za 200 i 400 jedinki zbog istog razloga, a rezultat za 500 jedinki zbog nedovoljnog doprinosa poboljšanju stabilnosti. Iz zadnjeg skupa, za 200 generacija odbacuje se samo zadnja vrijednost i to zbog premalenog iznosa pojačanja koje ne dovodi do značajnog poboljšanja ni oscilatorne niti tranzijentne stabilnosti.

Tablica 4.30 Rezultati optimizacije primjenom metode genetskog algoritma za  $t = 250$  ms, scenarij 4

Broj Generacija	Broj populacije	Pojaćanje, $K$	Vremenska konstanta, $T$ [s]	Vrijeme optimizacije, $t$ [s]
50	100	10.35	0.483	2.152
	200	3.93	1.286	4.227
	300	26.44	1.152	6.348
	400	26.39	0.562	8.508
	500	17.87	0.802	10.727
100	100	8.38	0.571	4.227
	200	28.45	1.358	8.437
	300	18.58	0.298	12.718
	400	24.59	0.719	17.032
	500	3.98	0.285	21.336
200	100	24.81	0.439	8.638
	200	9.05	0.787	17.628
	300	20.41	0.554	28.108
	400	11.84	0.222	33.980
	500	3.88	0.159	42.899

Za sve navedene kombinacije određeni su oscilatorni modovi koji odgovaraju lokalnom modu i prikazani su tablicom 4.31. U odnosu na modove bez stabilizatora, uočava se da su svi modovi prigušeni.

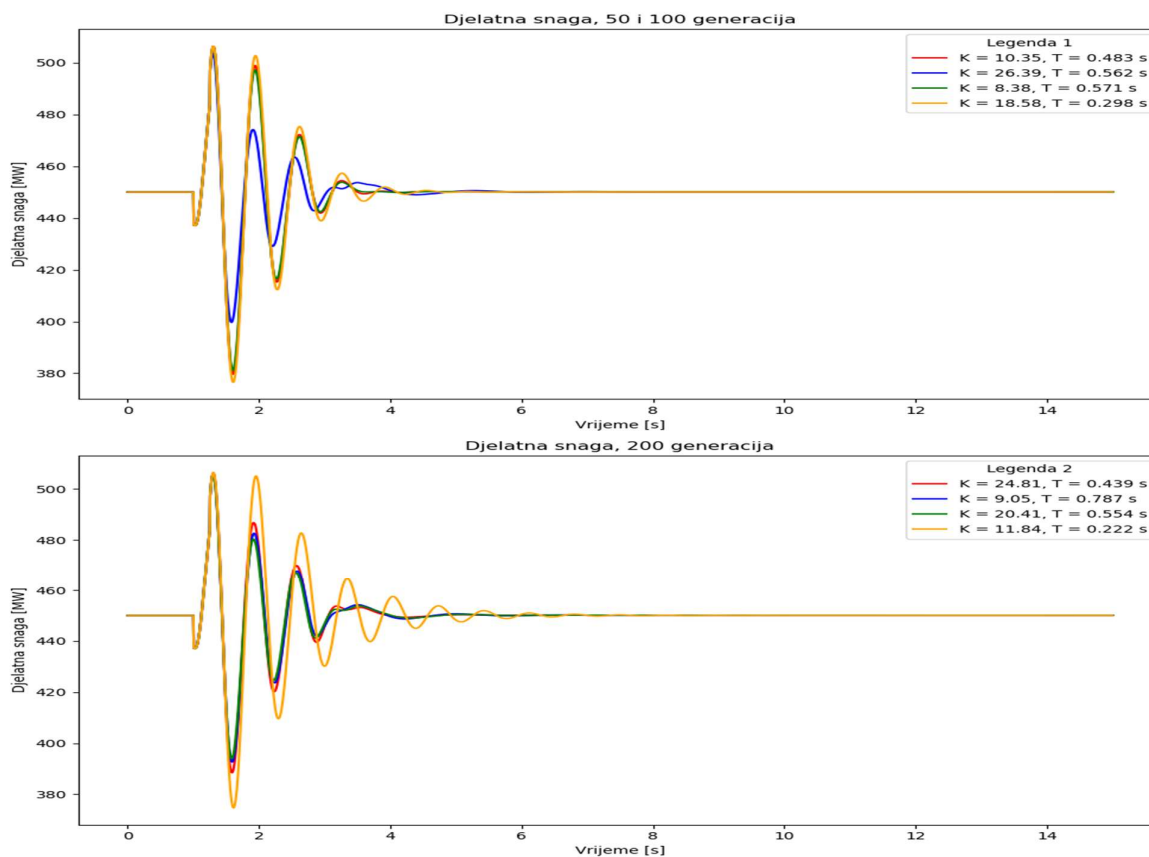
 Tablica 4.31 Oscilatorni modovi stabilizatora parametriranih genetskim algoritmom za  $t = 250$  ms, scenarij 4

	1	2	3	4	5
$K = 10.35,$ $T = 0.483$ s	-2.113109952 $\pm 9.138711666$	-3.062455052 $\pm 11.1780483$	-3.224052075 $\pm 10.0564162$	-3.868130508 $\pm 11.38654879$	-4.236105979 $\pm 12.61308287$
$K = 26.39,$ $T = 0.562$ s	-2.148071924 $\pm 9.170557607$	-3.072022991 $\pm 11.1398869$	-3.36258872 $\pm 17.64987172$	-3.820822738 $\pm 11.36134304$	-4.235599545 $\pm 12.61233349$
$K = 8.38,$ $T = 0.571$ s	-2.128098303 $\pm 9.143680446$	-3.080781308 $\pm 11.17857223$	-3.785577764 $\pm 10.35054308$	-3.897318807 $\pm 11.17857223$	-4.236286559 $\pm 12.61315778$
$K = 18.58,$ $T = 0.298$ s	-2.044223671 $\pm 9.713086562$	-2.050031631 $\pm 9.225074686$	-3.053076363 $\pm 11.15600687$	-3.844236992 $\pm 11.38102$	-4.235912521 $\pm 12.61292819$



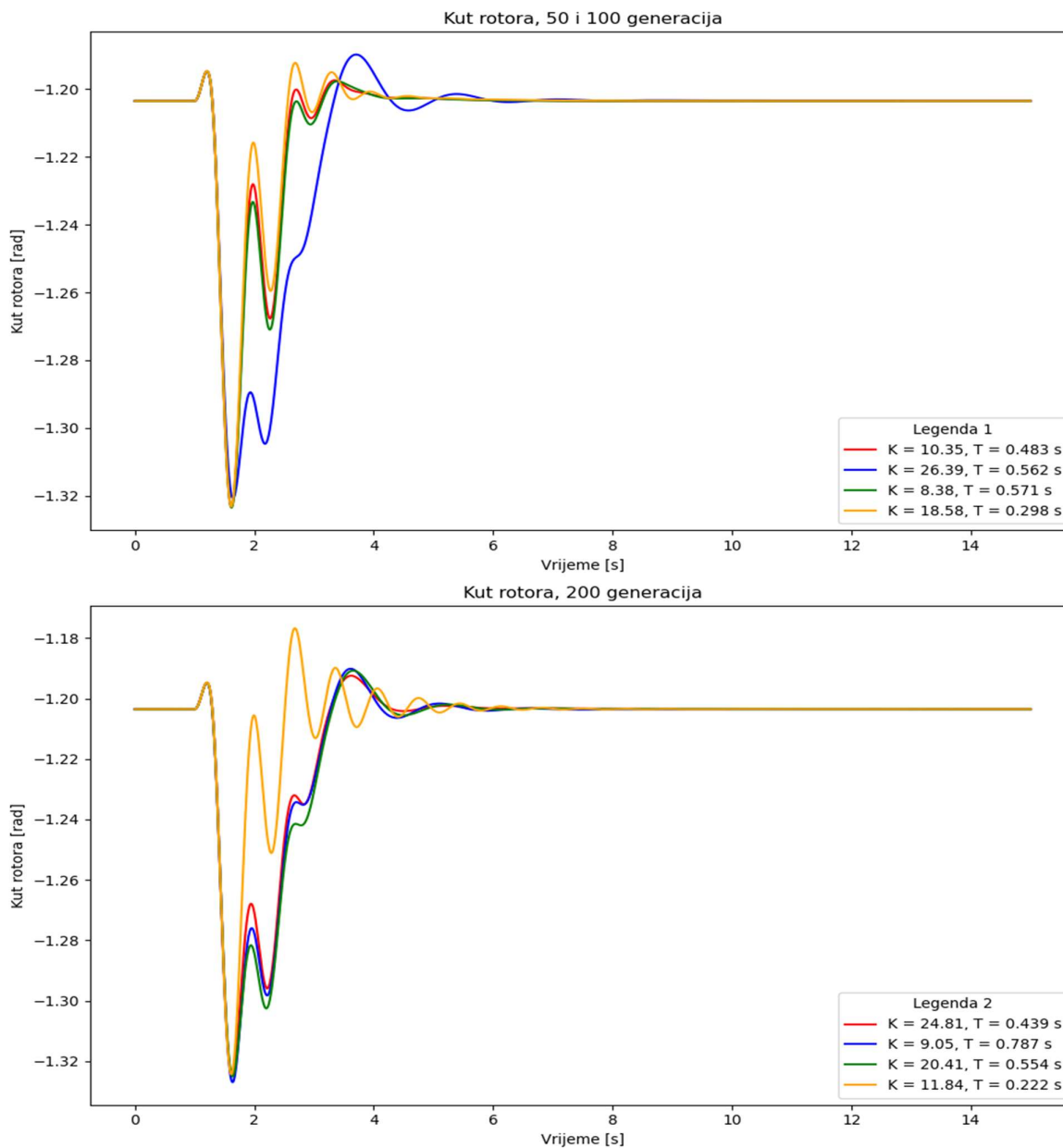
	1	2	3	4	5
$K = 24.81,$ $T = 0.439 \text{ s}$	-2.14124324 $\pm 9.165971383$	-3.080554544 $\pm 11.1354558$	-3.804444689 $\pm 11.3534141$	-4.148833858 $\pm 13.7609541$	-4.234845803 $\pm 12.61149489$
$K = 9.05,$ $T = 0.787 \text{ s}$	-2.146570256 $\pm 9.165805026$	-3.076459545 $\pm 11.14033131$	-3.81747006 $\pm 11.35426075$	-4.235618337 $\pm 12.61199249$	-4.830843959 $\pm 15.21020958$
$K = 20.41,$ $T = 0.554 \text{ s}$	-2.145968723 $\pm 9.168096263$	-3.074836063 $\pm 11.13897066$	-3.816975018 $\pm 11.35799476$	-4.158649639 $\pm 15.74346376$	-4.235516857 $\pm 12.61213848$
$K = 11.84,$ $T = 0.222 \text{ s}$	-0.987553087 $\pm 9.029988598$	-2.174161571 $\pm 9.218726937$	-3.05955854 $\pm 11.14988478$	-3.838585983 $\pm 11.37412991$	-4.235868224 $\pm 12.61280295$

S obzirom na velik broj mogućih rješenja, prvo će biti prikazani rezultati iz vremenske domene i to odzivi za 50 i 100 generacija na jednom oscilogramu, a 200 generacija je prikazano na drugom oscilogramu. Slika 4.112 prikazuje djelatnu snagu iz kojeg se može vidjeti da većina dobivenih rješenja učinkovito djeluje na prigušenje oscilacija. Najlošiji je odziv za stabilizator parametriran s pojačanjem  $K = 11.84$  i vremenskom konstantom  $T = 0.222$  sekunde. Za tu kombinaciju, zbog male vremenske konstante i malog pojačanja, prigušenje oscilacija nije dobro te postoji mogućnost da stabilizator parametriran tim vrijednostima postane novi izvor nestabilnosti u sustavu.



Slika 4.112 Djelatna snaga za metodu genetskog algoritma za  $t = 250 \text{ ms}$ , scenarij 4

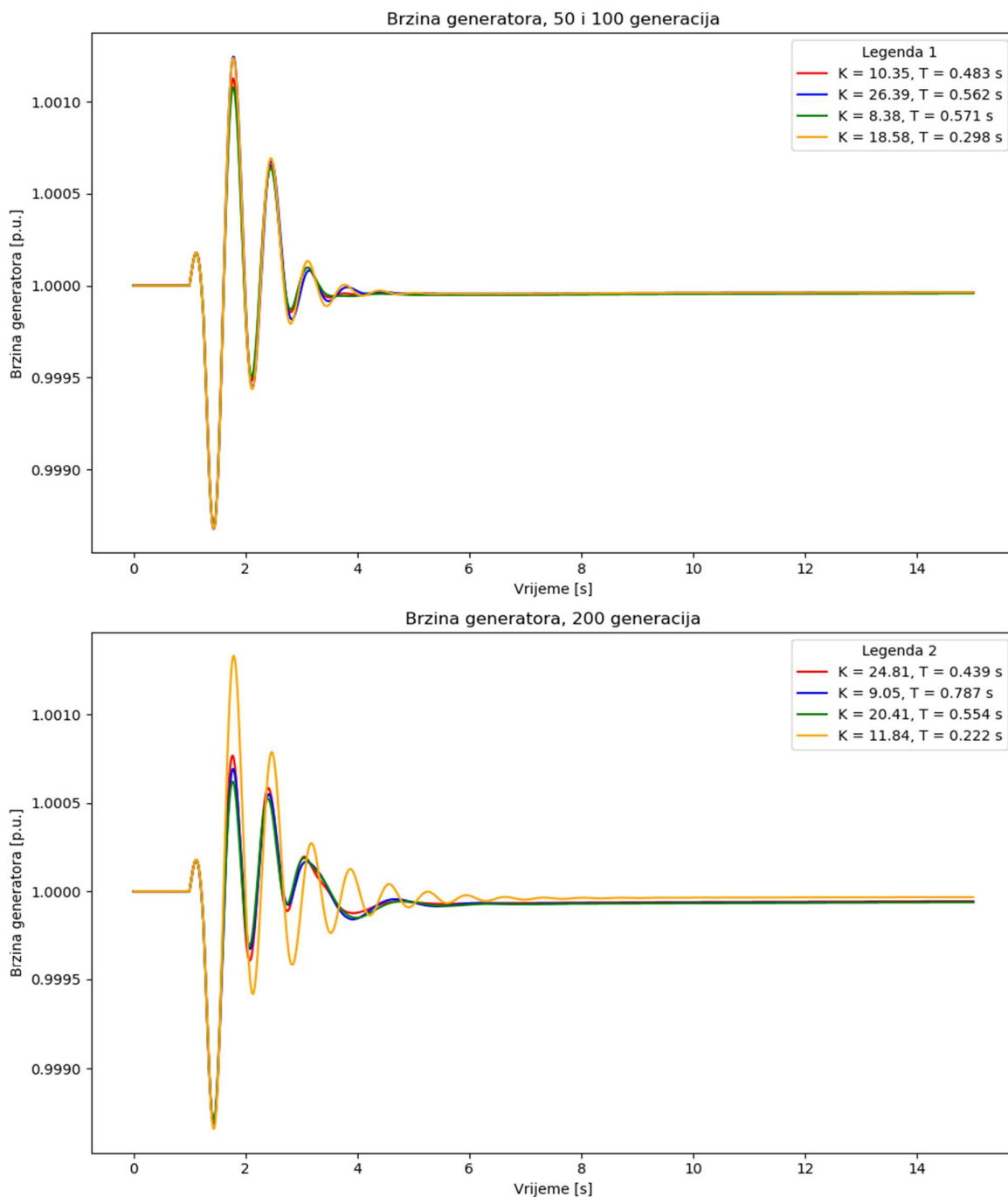
Slika 4.113 prikazuje odzive kuta rotora. Premda su svi odzivi djelatne snage pokazali smanjenje oscilacija djelatne snage u odnosu na sustav bez stabilizatora i imaju jako mala međusobna odstupanja, kod kuta rotora se vidi značajna razlika pri primjeni stabilizatora parametriranog s pojačanjem  $K = 26.39$  i vremenske konstante  $T = 0.562$ . Također, u drugom skupu, rezultati koji se dobiju pri razmatranju kod kojeg se optimizacija provodi za 200 generacija, odziv sa stabilizatorom koji ima pojačanje  $K = 11.84$  i vremensku konstantu  $T = 0.222$  sekunde pokazuje odstupanje u odnosu na ostale vrijednosti, a karakteriziraju ga veći broj oscilacija u odnosu na ostale odzive.



Slika 4.113 Kut rotora za metodu genetskog algoritma za  $t = 250$  ms, scenarij 4

Brzina generatora ima slične odzive kao i djelatna snaga, a prikazani su slikom 4.114. Vrijednosti za 50 i 100 generacija imaju približno jednake odzive dok odziv u drugoj skupini, za 200

generacija, kod kojeg je pojačanje  $K = 11.84$  opet ima značajno odstupanje i izražene oscilacije koje traju duže nego za ostale vrijednosti.



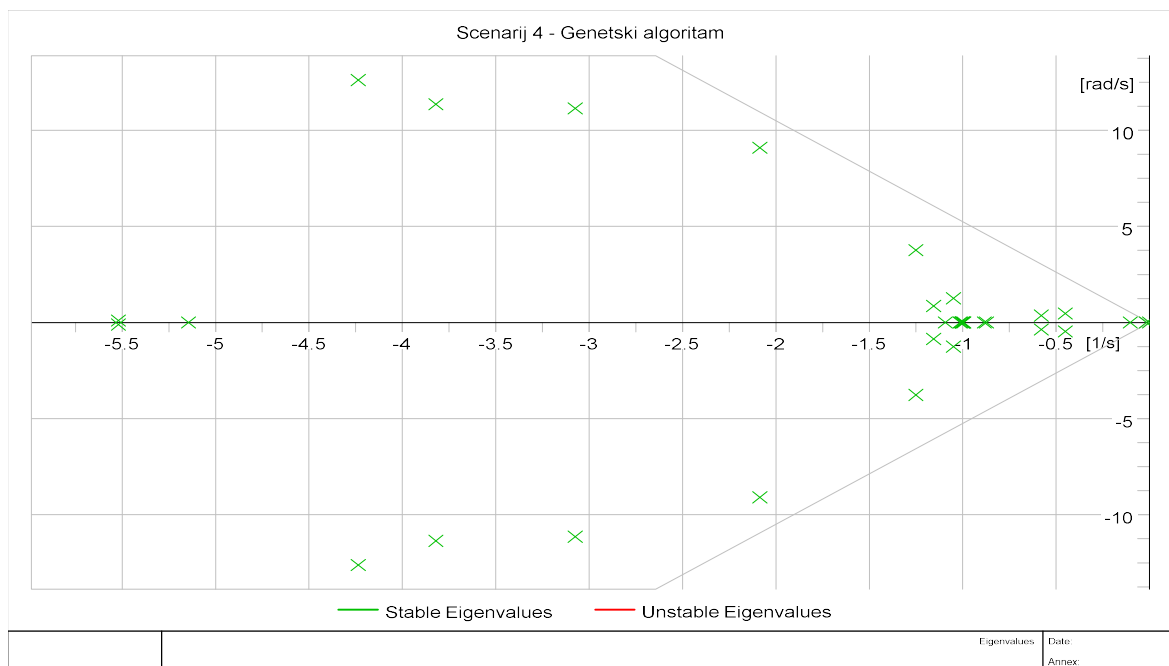
Slika 4.114 Brzina generatora za metodu genetskog algoritma za  $t = 250$  ms, scenarij 4

Dok se za parametre stabilizatora  $K = 11.84$  i  $T = 0.222$  sekunde može odmah zaključiti da ne daju dovoljno poboljšanje oscilatorne stabilnosti (vidljivo u tablici 4.32) niti tranzijentne (vidljivo na prethodnim slikama), sve ostale kombinacije rezultiraju poboljšanjem odziva i prigušenja oscilatornih modova. Odluka o optimalnoj vrijednosti se donosi na temelju vrijednosti funkcije cilja.

Tablica 4.32 Težinske funkcije za metodu genetskog algoritma za  $t = 250$  ms, scenarij 4

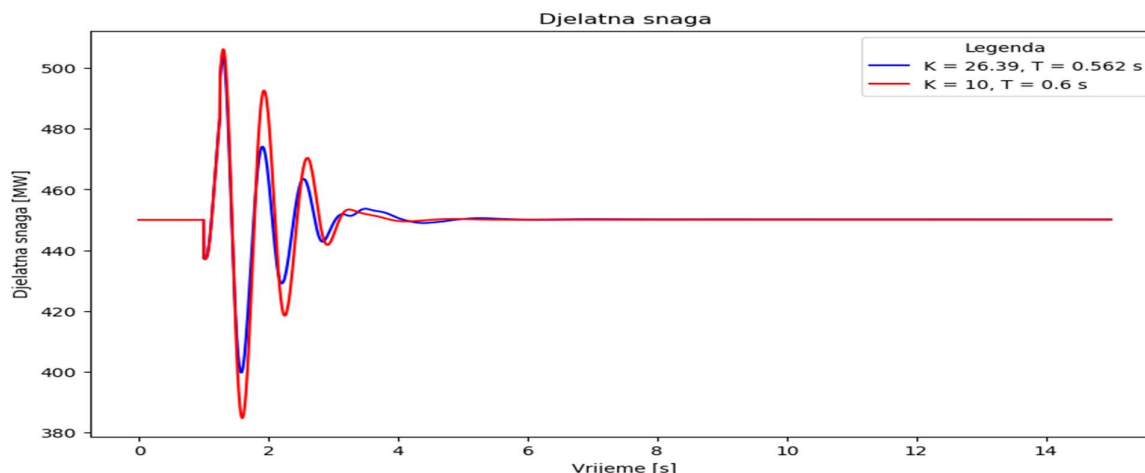
Parametri	Koeficijent prigušenja	Djelatna snaga	Kut rotora	Brzina generatora	Ukupno
$K = 10.35, T = 0.483$ s	0.225282	0.018458	0.627598	0.999929	1.871268
$K = 26.39, T = 0.562$ s	0.228063	0.501067	0.257687	0.999923	1.986739
$K = 8.38, T = 0.571$ s	0.226681	0.061270	0.606741	0.999932	1.894625
$K = 18.58, T = 0.298$ s	0.205949	-0.095014	0.666826	0.999922	1.777684
$K = 24.81, T = 0.439$ s	0.227483	0.255814	0.396897	0.999943	1.880138
$K = 9.05, T = 0.787$ s	0.228024	0.333756	0.337638	0.999945	1.899362
$K = 20.41, T = 0.554$ s	0.227909	0.377323	0.296678	0.999948	1.901859
$K = 11.84, T = 0.222$ s	0.108715	-0.271906	0.677306	0.999909	1.514025

Uspoređujući rezultate za kompleksnu frekvencijsku i vremensku domenu, kao optimalna vrijednost parametara pojačanja i vremenske konstante se nameće vrijednost 26.39 i 0.562 sekundi. Krivulja mjesta korijena za dane vrijednosti je prikazana slikom 4.115. U odnosu na krivulju mjesta korijena za sustav u kojemu nema nijednog stabilizatora elektromehaničkih oscilacija uočava se da se oscilatorna stabilnost poboljšala jer su oscilatorni modovi pomjereni u lijevu stranu kompleksne ravnine.


 Slika 4.115 Krivulja mjesta korijena za genetski algoritam za,  $t = 250$  ms, scenarij 4

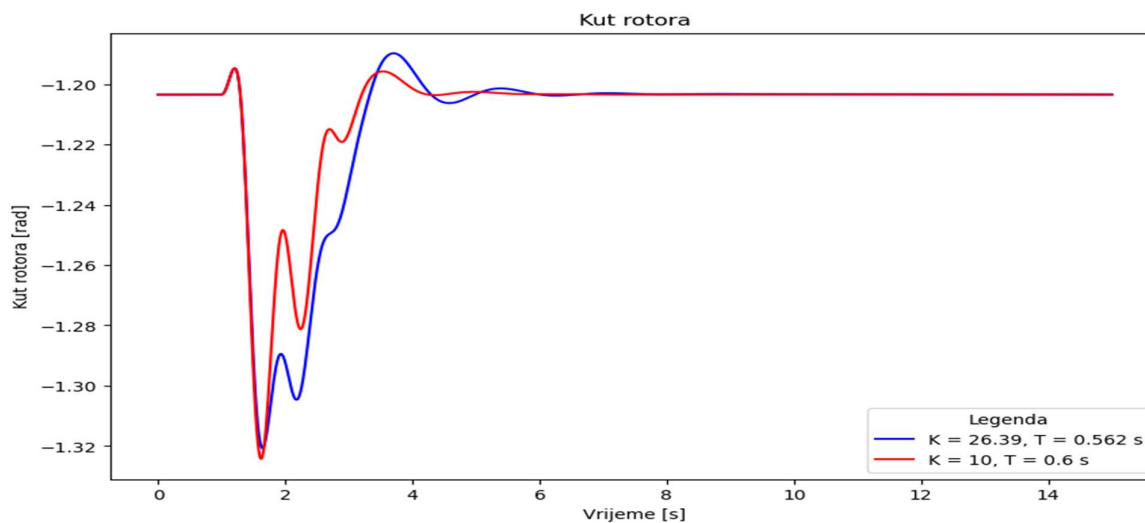
Usporedba djelatne snage pri primjeni stabilizatora parametriranog analitičkom metodom i metodom genetskog algoritma prikazana je slikom 4.116. Iako je prema optimizacijskoj metodi rješenje

kojemu je pojačanje  $K = 26.39$  i vremenskom konstantom  $T = 0.562$  sekundi dobiveno kao optimalno rješenje određeno metodom genetskog algoritma, pokazuje se da je ujedno i rješenje koje je bolje od rješenja dobivenog analitičkom metodom, bar po pitanju smanjenja oscilacija snage na vodu. Nedostatak u odnosu na odziv dobiven analitičkom metodom je nešto duže vrijeme prigušenja oscilacija, međutim taj nedostatak se kompenzira time što je već pri drugoj oscilaciji minimalna snaga do 400 MW (primjenom stabilizatora čiji su parametri određeni analitičkom metodom taj minimum iznosi blizu 380 MW).



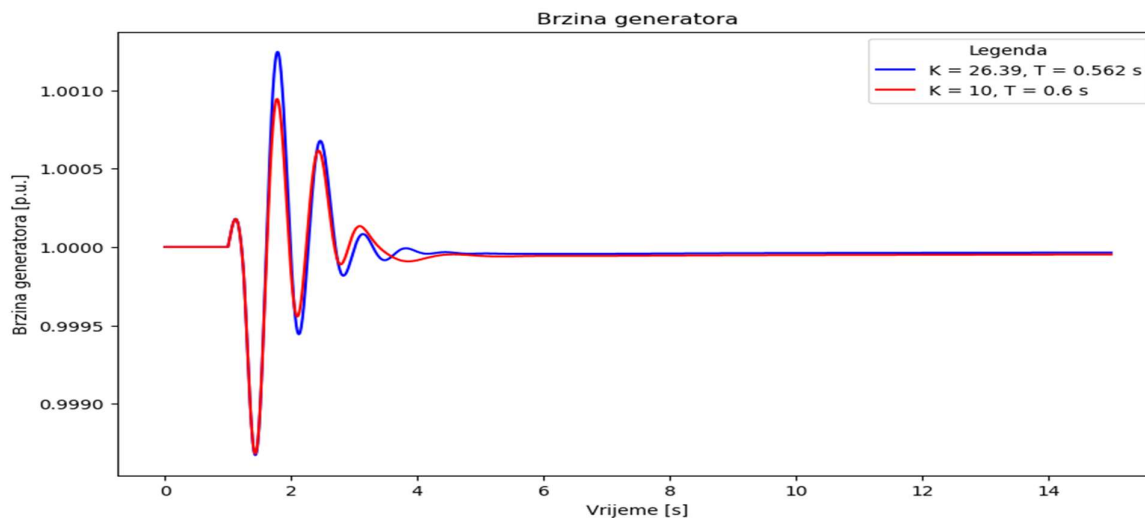
Slika 4.116 Usporedba djelatne snage za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom genetskog algoritma za  $t = 250 \text{ ms}$ , scenarij 4

Usporedba kuta rotora, prikazana slikom 4.117, pokazuje da stabilizator parametriran genetskim algoritmom daje oscilacije veće amplitude, a vrijeme dostizanja ustaljene vrijednosti je sporije. Ipak, s obzirom da se radi o manjim vrijednostima - rasponu kuta od  $-1.32 \text{ rad}$  do  $-1.19 \text{ rad}$ , razlika nije presudna.



Slika 4.117 Usporedba kuta rotora za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom genetskog algoritma za  $t = 250 \text{ ms}$ , scenarij 4

Oscilacije brzine za stabilizator parametriran analitičkom metodom su niže nego pri primjeni stabilizatora parametriranog metodom genetskog algoritma (slika 4.118). Kao i za prethodna razmatranja, može se zaključiti da primjena stabilizatora i postavke parametara neće nužno unaprijediti sve vrijednosti veličina u jednakoj mjeri, ali će ih svakako poboljšati.



Slika 4.118 Usporedba brzine generatora za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom genetskog algoritma za  $t = 250 \text{ ms}$ , scenarij 4

Kada se usporede rezultati Scenarija 2 za genetski algoritam i rezultati ovog scenarija, jasno je da su u prethodnom rezultati bili gotovo identični rezultatima koji su dobiveni analitičkom metodom. Prema tome, metoda mekog računarstva ne mora nužno dati identične ili približne rezultate kao i analitička, a također ni ti odzivi ne moraju nužno biti bolji od onih dobivenih analitičkom metodom.

#### 4.7.3 Metoda simuliranog kaljenja

Metoda simuliranog kaljenja ima iste početne postavke kao i u Scenariju 2. U ovom scenariju se pak dobiju četiri vrijednosti s bliskim iznosima pojačanja i vremenskih konstanti. Rezultati su prikazani tablicom 4.33, a dobiju se za četiri vrijednosti početne temperature.

Tablica 4.33 Rezultati simuliranog kaljenja za  $t = 250 \text{ ms}$ , scenarij 4

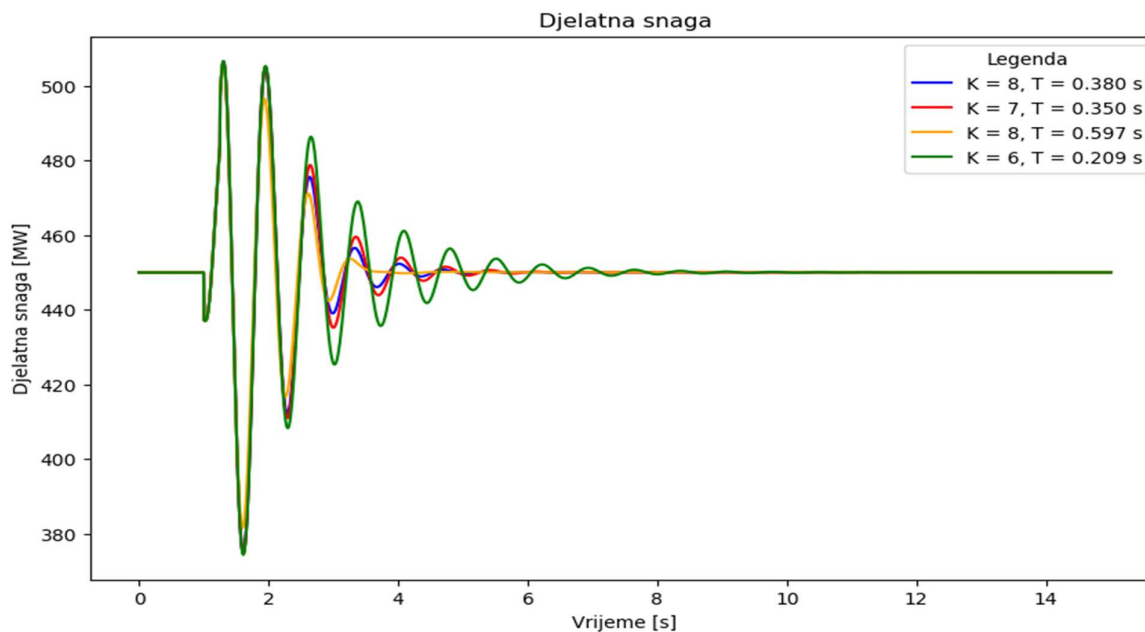
Početna temperatura	Broj iteracija	Pojačanje, $K$	Vremenska konstanta, $T$ [s]	Vrijeme [s]
500	1500	8	0.380	0.037
1000	1500	7	0.350	0.037
1500	1500	8	0.597	0.037
2000	1500	6	0.209	0.031

Za analizu se uzimaju svih četiri rezultata i ponovno se pokazuje, kao i u Scenariju 2, da se metodom simuliranog kaljenja dobiju rezultati koji su međusobno najbliži. Prva analiza koja će biti provedena za dobivene vrijednosti je modalna analiza, a rezultatni oscilatorni modovi su prikazani tablicom 4.34.

Tablica 4.34 Oscilatorni modovi za stabilizator parametriran metodom simuliranog kaljenja za  $t = 250$  ms, scenarij 4

	$K = 8,$ $T = 0.380$ s	$K = 7,$ $T = 0.350$ s	$K = 8,$ $T = 0.597$ s	$K = 6,$ $T = 0.209$ s
1	-1.59147466 $\pm 9.070433072$	-1.305859247 $\pm 8.976896803$	-2.131234455 $\pm 9.145898047$	-0.767701139 $\pm 8.793653287$
2	-2.20439941 $\pm 9.272483481$	-2.189337117 $\pm 9.234338419$	-3.086754002 $\pm 11.1749665$	-2.175553000 $\pm 9.206919271$
3	-3.058179672 $\pm 11.15343106$	-3.059164288 $\pm 11.15160434$	-3.913844076 $\pm 11.36419967$	-3.06071823 $\pm 11.14923271$
4	-3.842462775 $\pm 11.37585627$	-3.840524056 $\pm 11.37462998$	-3.970704031 $\pm 10.5266932$	-3.837784351 $\pm 11.37287105$
5	-4.235911827 $\pm 12.61285269$	-4.235892584 $\pm 12.61282333$	-4.236379779 $\pm 12.61318567$	-4.235863416 $\pm 12.61277811$

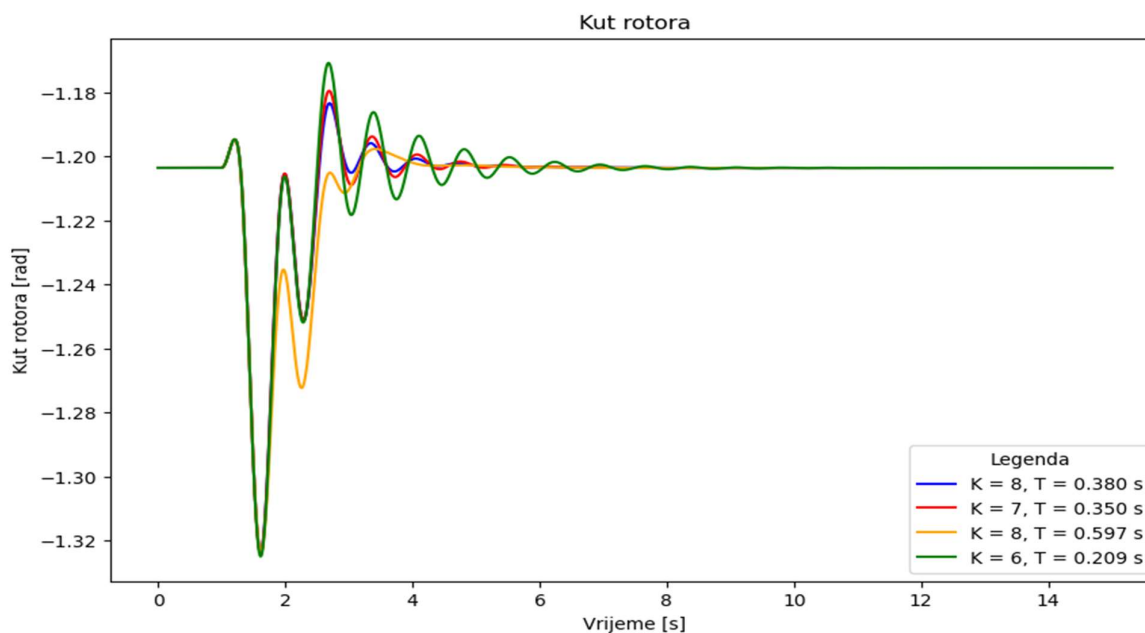
Prema rezultatima se vidi razlika u prigušenju pojedinih slučajeva. Najveći pomak u lijevu stranu se postiže pri primjeni stabilizatora čiji su parametri pojačanje  $K = 8$  i vremenska konstanta  $T = 0.597$  sekundi, a najlošiji pri pojačanju  $K = 6$  i vremenskoj konstanti  $T = 0.209$  sekunde. Analiza se nastavlja provođenjem simulacija u vremenskoj domeni čiji su rezultati predstavljeni u nastavku.



Slika 4.119 Djelatna snaga za stabilizatore parametrirane metodom simuliranog kaljenja za  $t = 250$  ms, scenarij 4

Prvi rezultati predstavljaju djelatnu snagu, a odzivi su prikazani slikom 4.119 na kojoj se uočava da tri vrijednosti pojačanja i vremenske konstante rezultiraju približno jednakim odzivima kojima se smanjuju oscilacije djelatne snage. Pojačanje  $K =$  i vremenska konstanta  $T = 0.209$  sekundi ne daje zadovoljavajuće rezultate, ali će se odluka o njegovom prihvaćanju ili odbacivanju opet donijeti na temelju vrijednosti funkcije cilja.

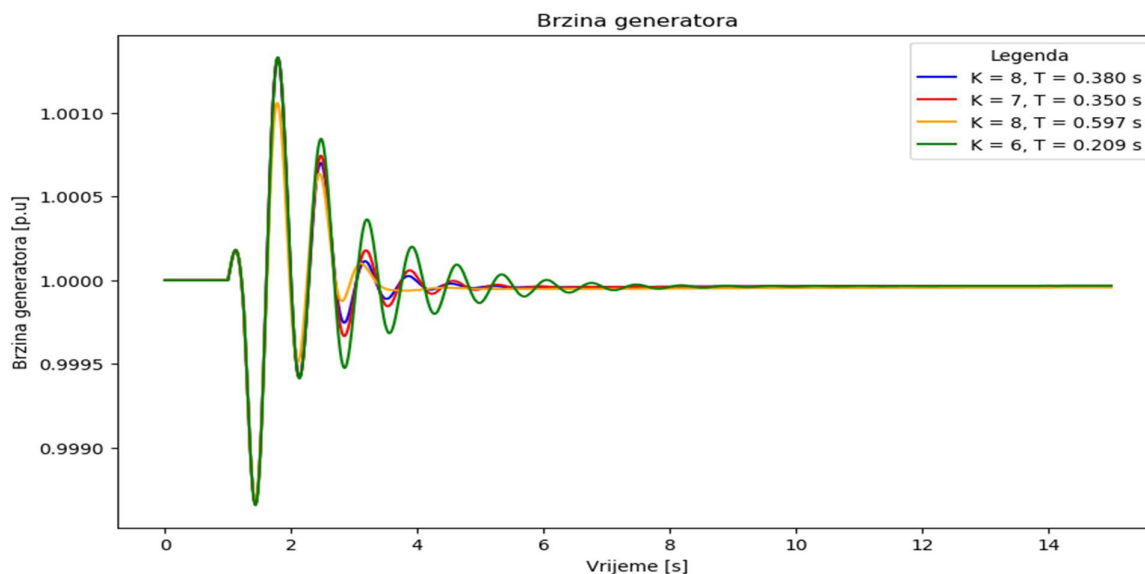
Kut rotora prikazan je slikom 4.120 i iz njega se opet vidi da stabilizator parametriran pojačanjem  $K = 6$  i vremenskom konstantom  $T = 0.209$  sekunde ne daje dovoljno prigušenje oscilacija. Stabilizatori parametrirani s preostalim kombinacijama parametara kako se dobiju simuliranim kaljenjem daju odzive koji daju manja nadvišenja i brže otklanjanju oscilacije.



Slika 4.120 Kut rotora za stabilizatore parametrirane metodom simuliranog kaljenja za  $t = 250$  ms, scenarij 4

Treći promatrani signal, brzina generatora, također pokazuje unaprjeđenje kvalitete regulacije nakon primjene stabilizatora elektromehaničkih oscilacija s pomoću parametara određenih metodom simuliranog kaljenja (slika 4.121). Kao i za djelatnu snagu i kut rotora, stabilizator s parametrima  $K = 6$  i  $T = 0.209$  sekunde ni za brzinu generatora ne daje dovoljno dobar odziv u odnosu na odziv bez stabilizatora elektromehaničkih oscilacija - nadvišenja brzine i dalje postoje dok prigušenje oscilacija traje oko 8 sekundi što je znatno lošije u odnosu na ostala tri odziva.





Slika 4.121 Brzina generatora za stabilizatore parametrirane metodom simuliranog kaljenja za  $t = 250$  ms, scenarij 4

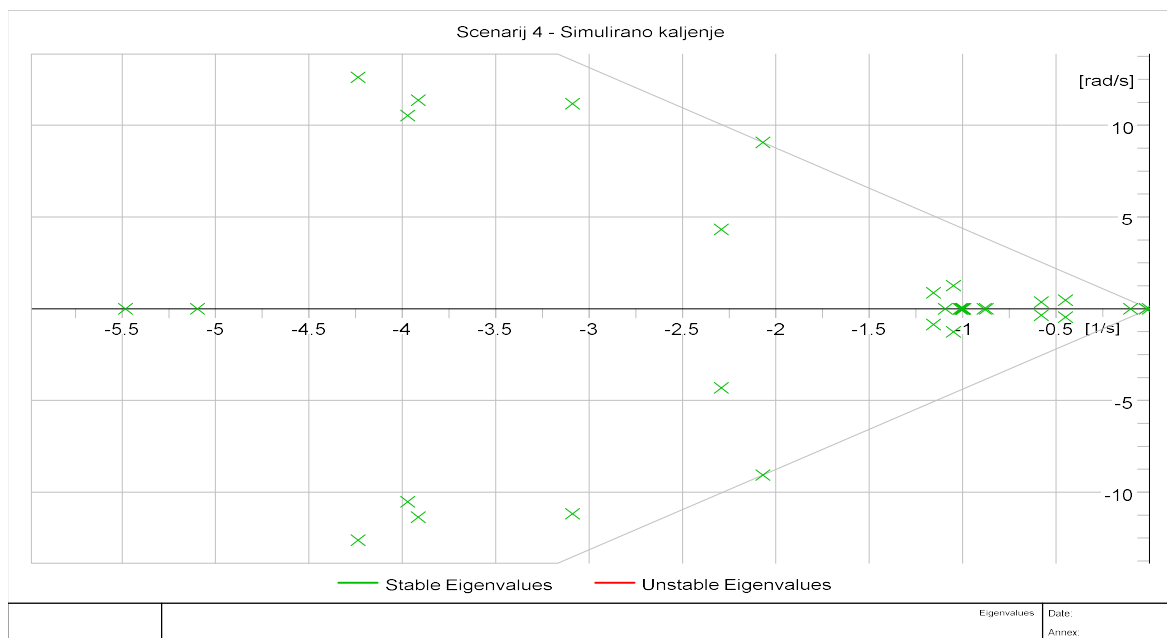
Prema rezultatima se već uočava da vrijednost pojačanja  $K = 6$  ne dovodi do smanjenja oscilacija djelatne snage, ali se konačna odluka donosi na temelju vrijednosti funkcije cilja, koja je prikazana tablicom 4.35.

Tablica 4.35 Vrijednosti funkcije cilja za stabilizatore parametrirane metodom simuliranog kaljenja za  $t = 250$  ms, scenarij 4

Parametri	Koeficijent prigušenja	Djelatna snaga	Kut rotora	Brzina generatora	Ukupno
$K = 8,$ $T = 0.380$ s	0.172817	-0.153716	0.686501	0.999917	1.705519
$K = 7,$ $T = 0.350$ s	0.143954	-0.200884	0.682426	0.999913	1.625409
$K = 8,$ $T = 0.597$ s	0.226946	0.075585	0.597425	0.999933	1.899889
$K = 6,$ $T = 0.209$ s	0.086971	-0.372669	0.662638	0.999902	1.376842

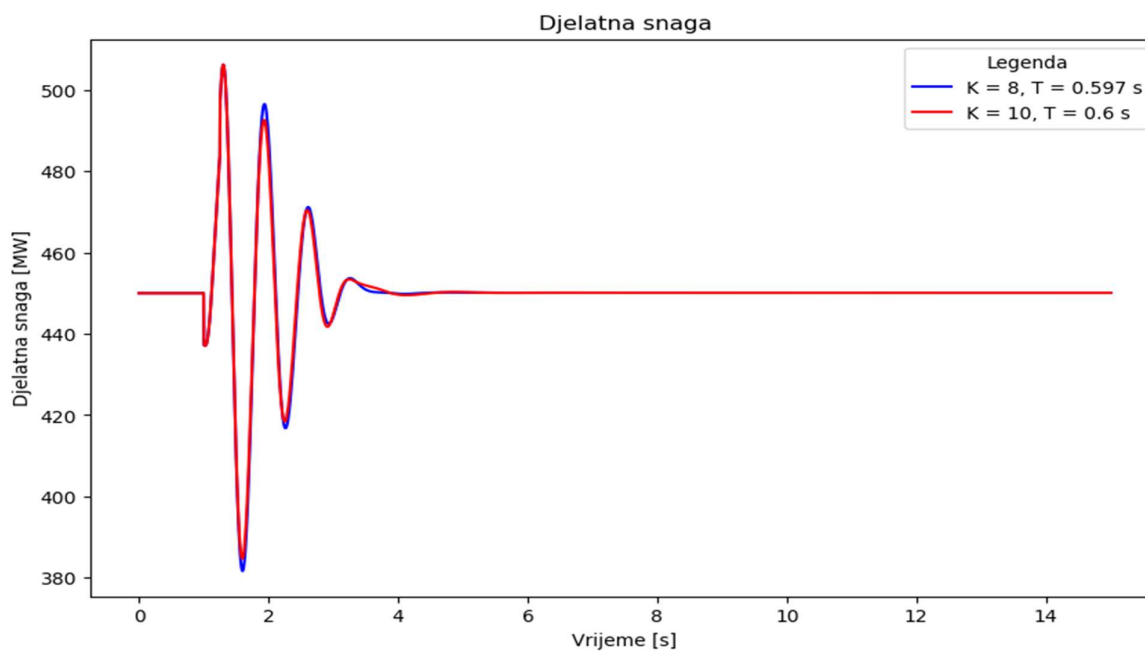
Prema rezultatima, najveću vrijednost funkcije cilja ima kombinacija parametara pri kojemu je pojačanje  $K = 8$  i vremenska konstanta  $T = 0.597$  sekundi. Za ove vrijednosti je ujedno najveća vrijednost prigušenja - najbolji odziv u kompleksnoj frekvencijskoj domeni, ali i u vremenskoj domeni. Vrijednost funkcije cilja je značajno viša nego za ostale parametre dobivene metodom simuliranog kaljenja te se ta vrijednost uzima kao konačna. Rezultati u oscilatornoj domeni, krivulja mjesta korijena, su prikazani slikom 4.122. Oscilatorni modovi koji odgovaraju koji

odgovaraju etiologiji lokalnog niskofrekvencijskog moda u lijevoj strani kompleksne ravnine što znači da je oscilatorna stabilnost sustava poboljšana.



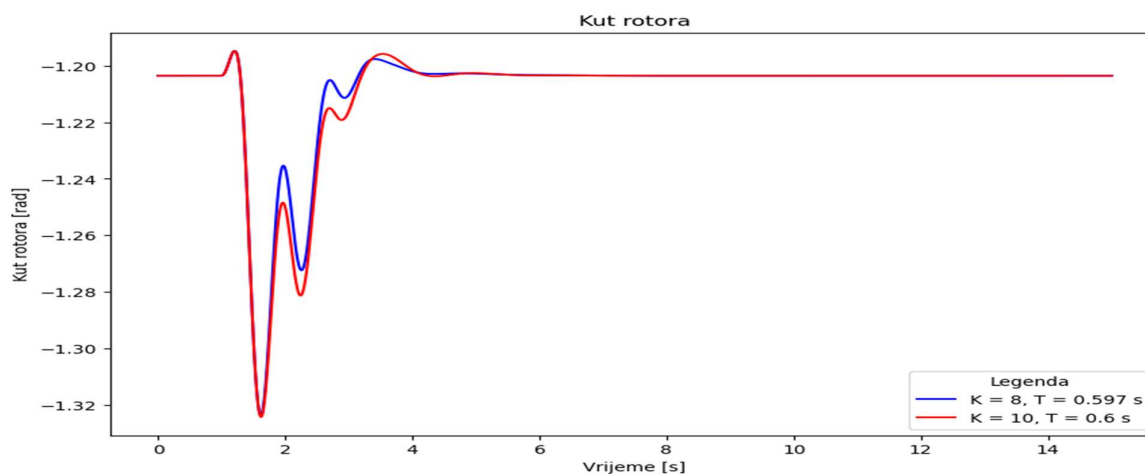
Slika 4.122 Krivulja mjesta korijena metode simuliranog kaljenja za  $t = 250$  ms, scenarij 4

Usporedba djelatne snage za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom simuliranog kaljenja prikazana je slikom 4.123. Oba stabilizatora učinkovito otklanjanju oscilacije snage, a razlika u brzini ili amplitudama je gotovo zanemariva.



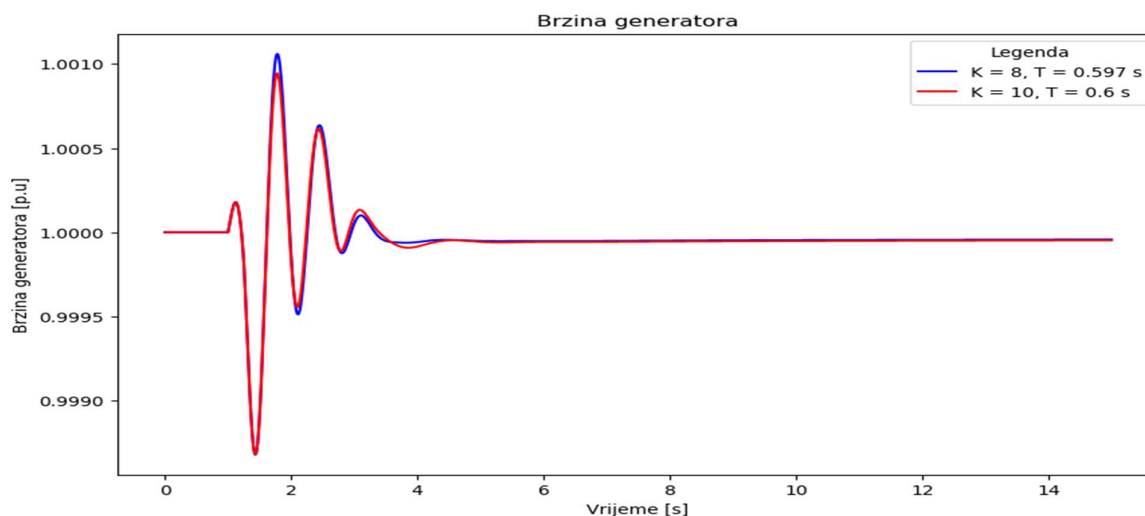
Slika 4.123 Usporedba djelatne snage za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom simuliranog kaljenja za  $t = 250$  ms, scenarij 4

Usporedbom kuta rotora za stabilizatore parametrirane analitičkom i metodom simuliranog kaljenja (slika 4.124) uočava se da se manja odstupanja kuta rotora postižu pri manjoj vrijednosti pojačanja.



Slika 4.124 Usporedba kuta rotora za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom simuliranog kaljenja za  $t = 250 \text{ ms}$ , scenarij 4

Brzina generatora, kao treća veličina iz vremenske domene koja se promatra pri parametriranju stabilizatora elektromehaničkih oscilacija, također ovisi o parametrima koji su postavljeni. Usporedba odziva stabilizatorom parametriranim analitičkom metodom i metodom simuliranog kaljenja prikazana je slikom 4.125. Usporedba odziva pokazuje da stabilizator parametriran analitičkom metodom ima manje oscilacije u odnosu na početnu brzinu, ali i sporije postizanje vrijednosti koja je zabilježena prije poremećaja, koja je ujedno i željena vrijednost.



Slika 4.125 Usporedba brzine generatora za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom simuliranog kaljenja za  $t = 250 \text{ ms}$ , scenarij 4

Metoda simuliranog kaljenja je i u scenariju u kojemu je duže trajanje poremećaja pokazala dobre performanse s obzirom na to da su rezultati međusobno jako bliski neovisno o početnim uvjetima,

kao i u odnosu na rezultate dobivene analitičkom metodom. Pored toga, svi rezultati dobiveni ovom metodom će sigurno rezultirati poboljšanjem stabilnosti (oscilatorne i tranzijentne) te neće doći do odbacivanja rezultata zbog izrazito lošeg odziva sustava.

#### 4.7.4 Tabu pretraživanje

Posljednja metoda kojom se određuju parametri stabilizatora elektromehaničkih oscilacija za slučaj trajanja poremećaja u vremenu od 250 ms je metoda tabu pretraživanja. Početni uvjeti i broj iteracija ostaje isti kao i za Scenarij 2 te su dobiveni rezultati prikazani tablicom 4.36. Rezultati pojačanja za 1000, 1500 i 2000 iteracija se ne razlikuju značajno, dok su vremenske konstante u jako širokom rasponu.

Tablica 4.36 Rezultati metode tabu pretraživanja za  $t = 250$  ms, scenarij 4

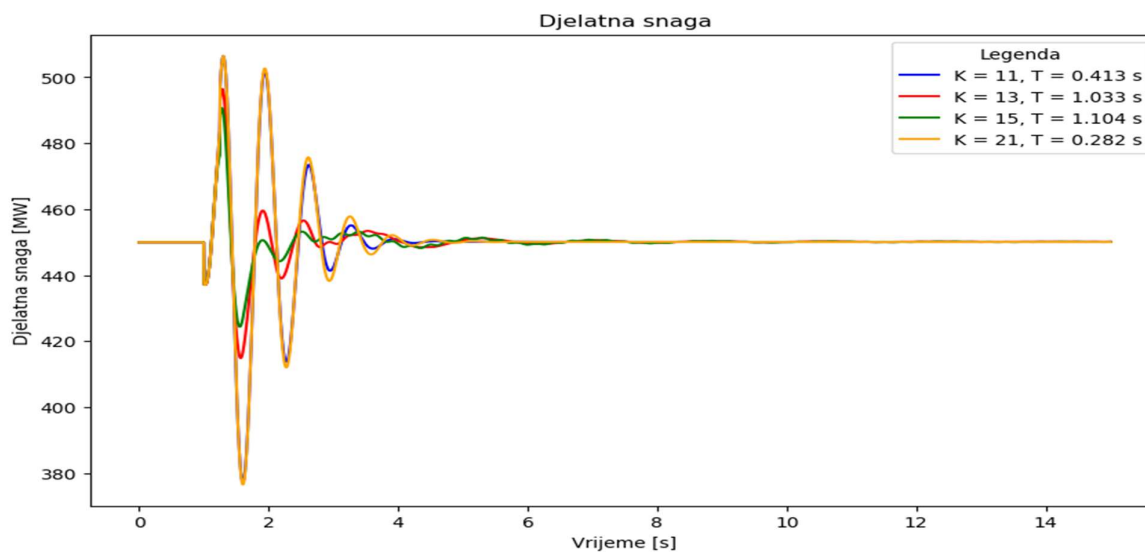
Broj iteracija	Pojačanje, $K$	Vremenska konstanta, $T$ [s]
500	21	0.282
1000	11	0.413
1500	15	1.104
2000	13	1.033

Dobiveni rezultati modalne analize, prikazani tablicom 4.37, pokazuju da nema nijednog nestabilnog moda iako za pojačanje  $K = 13$  i  $K = 15$  zbog velike vremenske konstante postoji mogućnost odlaska u nestabilno područje. To se najviše uočava iz prvog oscilatornog moda, koji zapravo više i ne pripada u etiologiju lokalnog moda s frekvencijom od 21, odnosno 23 rad/s.

Tablica 4.37 Oscilatorni modovi za stabilizator parametriran metodom tabu pretraživanja za  $t=250$  ms, scenarij 4

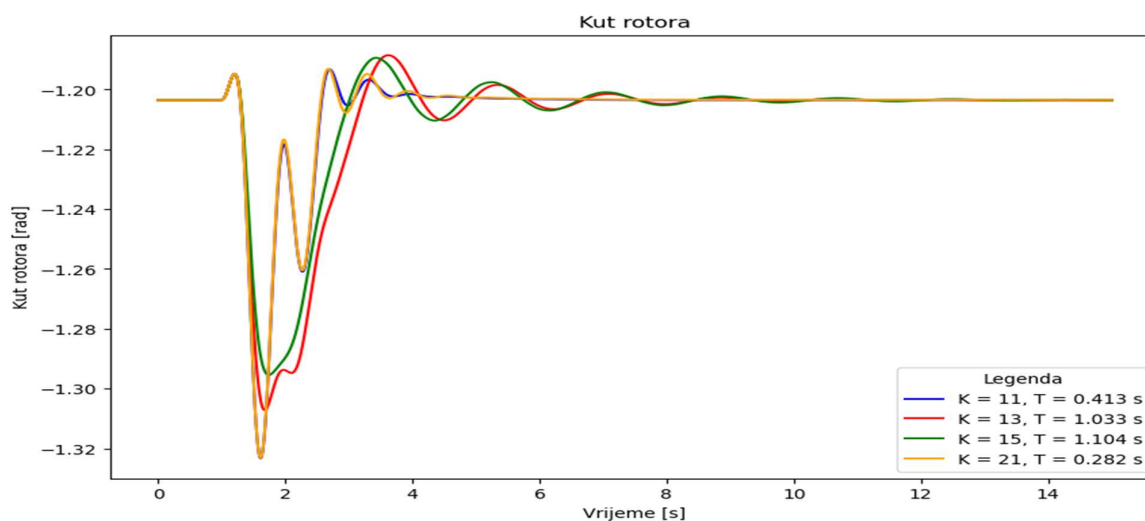
	$K = 11,$ $T = 0.413$ s	$K = 13,$ $T = 1.033$ s	$K = 15,$ $T = 1.104$ s	$K = 21,$ $T = 0.282$ s
1	-2.052662849 ±9.131103502	-1.766963303 ±21.25882808	-0.394574128 ±23.00118959	-1.990795638 ±9.791528828
2	-2.529659616 ±9.67676873	-2.150890337 ±9.172736779	-2.151420752 ±9.173653559	-2.067841202 ±9.22252501
3	-3.055130566 ±11.16217608	-3.069873471 ±11.14131447	-3.069243326 ±11.14153107	-3.052330038 ±11.15548252
4	-3.85037063 ±11.38116182	-3.824399577 ±11.36343835	-3.825093511 ±11.36417619	-3.84367111 ±11.38153569
5	-4.23597848 ±12.61295868	-4.235675923 ±12.61244911	-4.235685791 ±12.61247815	-4.23590429 ±12.61293238

Analiza se nastavlja provedbom simulacija u vremenskoj domeni. Usporedba djelatne snage za sve četiri kombinacije parametara prikazana je slikom 4.126. Kako se vidi na slici, najmanje nadvišenje pokazuju upravo stabilizatori parametrirani parametrima pojačanje  $K = 13$ , vremenska konstanta  $T = 1.033$  sekunde i  $K = 15$ , vremenska konstanta  $T = 1.104$  sekunde iako oni uzrokuju izobličenje veličine pri postizanju konačne vrijednosti.



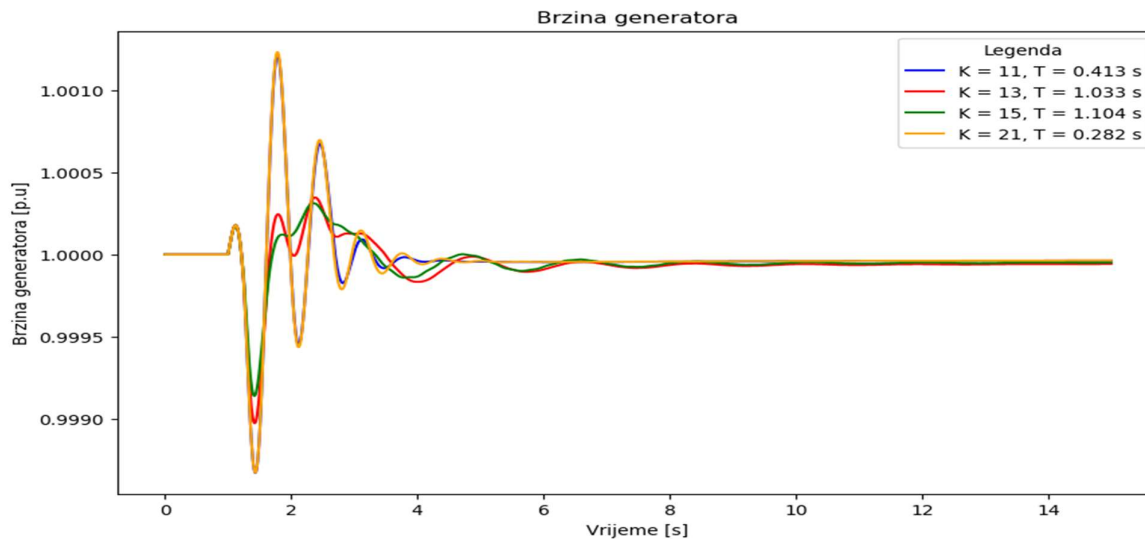
Slika 4.126 Djelatna snaga za stabilizatore parametrirane metodom tabu pretraživanja za  $t = 250$  ms, scenarij 4

Pored izobličenja djelatne snage, i kut rotora (slika 4.127) ima veća odstupanja i duže vrijeme ustaljivanja za stabilizatore parametrirane pojačanjima  $K = 13$  i  $K = 15$ . Uzrok tih odstupanja je velika vremenska konstanta čime se u odnosu na ostale promatrane vrijednosti jako narušava kvaliteta regulacije.



Slika 4.127 Kut rotora za stabilizatore parametrirane metodom tabu pretraživanja za  $t = 250$  ms, scenarij 4

Izobličenja, uočena kod djelatne snage, vidljiva su i u odzivu brzine generatora (slika 4.128). Vrijednosti brzine za stabilizatore parametrirane pojačanjem  $K = 11$  i  $K = 21$  imaju značajno veće amplitude oscilacije, ali i značajno kraće vrijeme ustaljivanja (između 4 i 5 sekundi), dok je za preostala dva stabilizatora vrijeme skoro 15 sekundi i uz nešto nižu vrijednost nakon poremećaja.



Slika 4.128 Brzina generatora za stabilizatore parametrirane metodom tabu pretraživanja za  $t = 250$  ms, scenarij 4

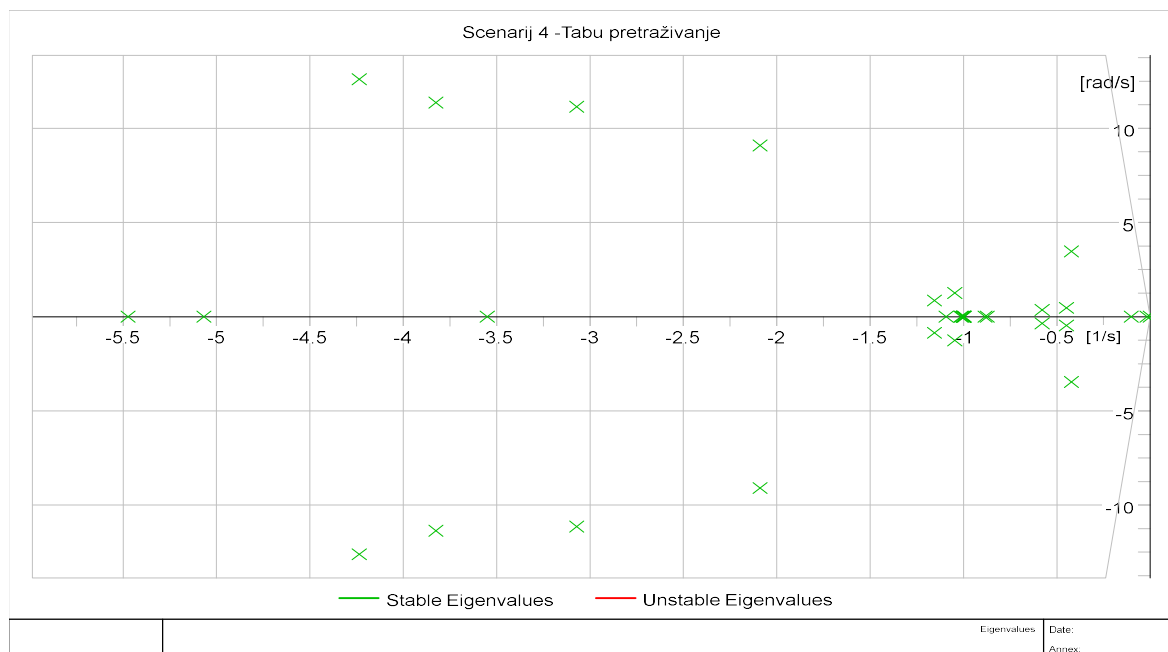
Iz rezultata se može uočiti da vrijednosti pojačanja uz veliku vremensku konstantu mogu dovesti do pojave oscilacija. Izbor optimalne vrijednosti iz niza vrijednosti određenih tabu pretraživanjem i uz različite početne uvjete se kao i za ostale metode temelji na vrijednosti funkcije cilja, koja je prikazana tablicom 4.38. Iz rezultata koeficijenta prigušenja se jasno vidi da je dominantni mod najbolje prigušen za vrijednost pojačanja  $K = 11$ .

Tablica 4.38 Vrijednosti funkcije cilja za stabilizatore parametrirane metodom tabu pretraživanja za  $t = 250$  ms, scenarij 4

Parametri	Koeficijent prigušenja	Djelatna snaga	Kut rotora	Brzina generatora	Ukupno
$K = 11, T = 0.413$ s	0.219325	-0.054199	0.659409	0.999924	1.824460
$K = 13, T = 1.033$ s	0.082831	0.728617	0.387269	0.999968	2.198684
$K = 15, T = 1.104$ s	0.017152	0.827128	0.529940	0.999975	2.374195
$K = 21, T = 0.282$ s	0.199242	-0.096399	0.664517	0.999923	1.767282

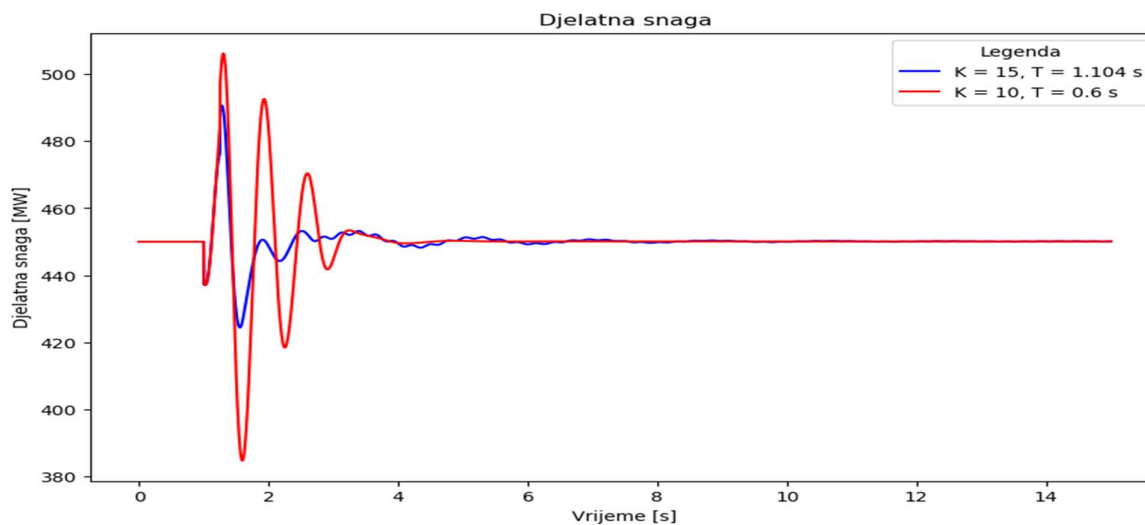
Iako se iz odziva djelatne snage, brzine generatora i kuta rotora jasno moglo uočiti da su odzivi stabilizatora parametriranih s pojačanjem  $K = 13$  i  $K = 15$  na granici izazivanja nestabilnosti, prema kriteriju najveće vrijednosti funkcije cilja, upravo su parametri pojačanje  $K = 15$  i vremenska konstanta  $T = 1.104$  sekunde optimalna vrijednost parametara. Krivulja mjesta korijena prikazana je

slikom 4.129 i kao što se može uočiti, dominantni oscilatorni mod je jako blizu ishodišta kompleksne ravnine.



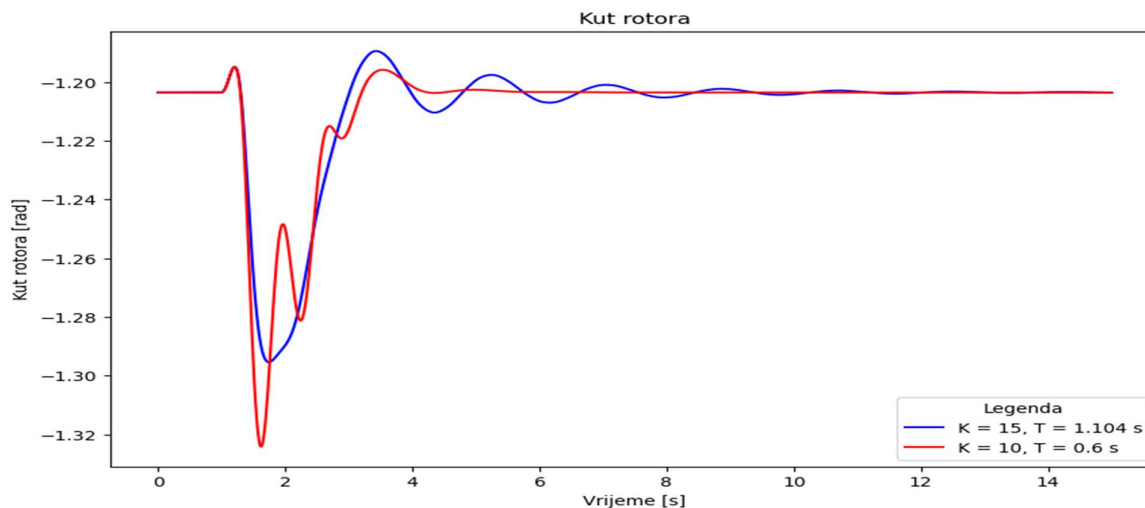
Slika 4.129 Krivulja mjesta korijena za tabu pretraživanje za  $t = 250$  ms, scenarij 4

Usporedba djelatne snage (slika 4.130) uz primjenu stabilizatora parametriranog analitičkom metodom i metodom tabu pretraživanja pokazuje da iako stabilizator parametriran optimizacijskom metodom dovodi do izobličenja snage, amplituda oscilacija je manja što može ukazati i na poboljšanje tranzijentne stabilnosti. Glavni nedostatak je što u svakom trenutku ovaj stabilizator može postati novi izvor oscilatorne nestabilnosti.



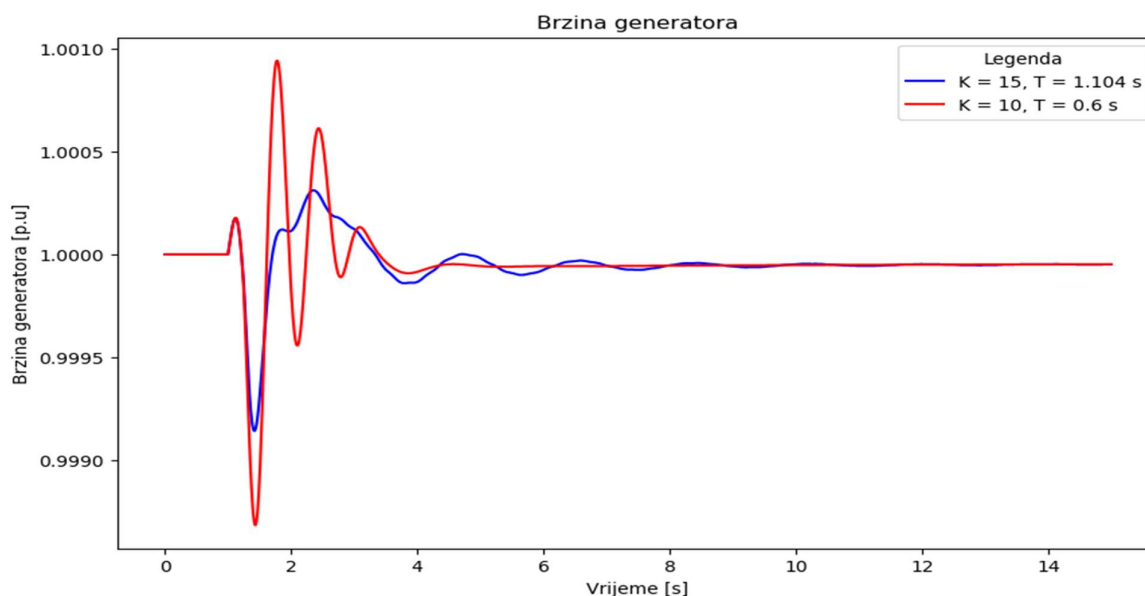
Slika 4.130 Usporedba djelatne snage za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom tabu pretraživanja za  $t = 250$  ms, scenarij 4

Kut rotora (slika 4.131) sporije postiže konačnu vrijednost sa stabilizatorom parametriranim metodom tabu pretraživanja u odnosu na stabilizator parametriran vrijednostima dobivenim analitičkom metodom. Iako postoje značajne oscilacije, najveća amplituda je pri tome  $-1.3$  rad, dok je za vrijednost pojačanja  $K = 10$ , najveća amplituda  $-1.32$  radijana.



Slika 4.131 Usporedba kuta rotora za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom tabu pretraživanja za  $t = 250$  ms, scenarij 4

Što se tiče usporedbe brzine generatora, i tu se manje amplitude oscilacija vide za stabilizator parametriran tabu pretraživanjem (slika 4.132). Vrijeme ustaljivanja, postizanja konačne vrijednosti, je znatno kraće za stabilizator parametriran analitičkom metodom.



Slika 4.132 Usporedba brzine generatora za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom tabu pretraživanja za  $t = 250$  ms, scenarij 4

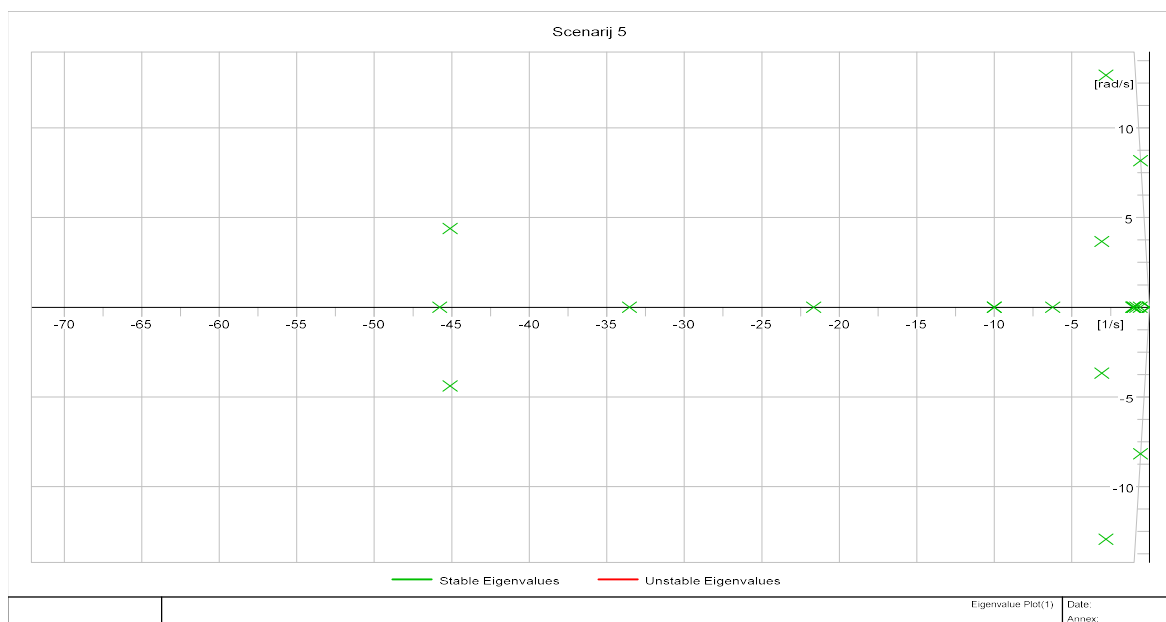
Metodom tabu pretraživanja određene su vrijednosti parametara stabilizatora elektromehaničkih oscilacija koje se inicijalno ne bi uopće nalazile u području pretraživanja analitičkom metodom.



Iz rezultata se može zaključiti da su neke optimizacijske metode manjkave s obzirom da se može prihvatiti i rezultat koji neće nužno dovesti do najboljeg odziva. Konkretno, kombinacija parametara koja je dobivena ovom metodom dovodi do manjih oscilacija amplituda promatranih veličina, ali te oscilacije duže traju. Sa stajališta tranzijentne stabilnosti ovi parametri i nisu najbolji s obzirom na ostale obuhvaćene analizom, a po pitanju oscilatorne stabilnosti su svakako dobiveni najbolji rezultati.

#### 4.8 Scenarij 5 - Višestrojni sustav s visokim udjelom obnovljivih izvora energije

U Scenariju 5 se značajan dio proizvodnje zamjenjuje obnovljivim izvorima - ukupno 280 MW iz obnovljivih izvora spojenih preko invertera. Zbog tako visoke razine integracije, isporuka djelatne snage generatora Gen1 se smanjuje na 270 MW, a generatori Gen2, Gen4 i Gen5 se u potpunosti isključuju. Obnovljivi izvori se nadomještaju jednim ekvivalentnim izvorom spojenim na sabirnicu 14 budući da na njoj vlada najniži napon te neće dovesti do porasta napona izvan dozvoljenih granica. Za novu konfiguraciju i stanje mreže se provodi modalna analiza i određuje novi dominantni mod. Rezultati modalne analize prikazani su tablicom 4.39, a za razliku od prethodna četiri scenarija sada postoji 25 modova, odnosno sustav se može opisati sa 25 različite jednadžbe stanja. Budući da su se promijenile i radne točke generatora postojati će mala razlika u iznosu prigušenja dominantnog pola. S obzirom na manji broj svojstvenih vrijednosti i krivulja mjesta korijena, prikazana slikom 4.133 je znatno jednostavnija. Postoji ukupno pet kompleksno-konjugiranih parova, od kojih su dva sa frekvencijama koje odgovaraju lokalnom modu.



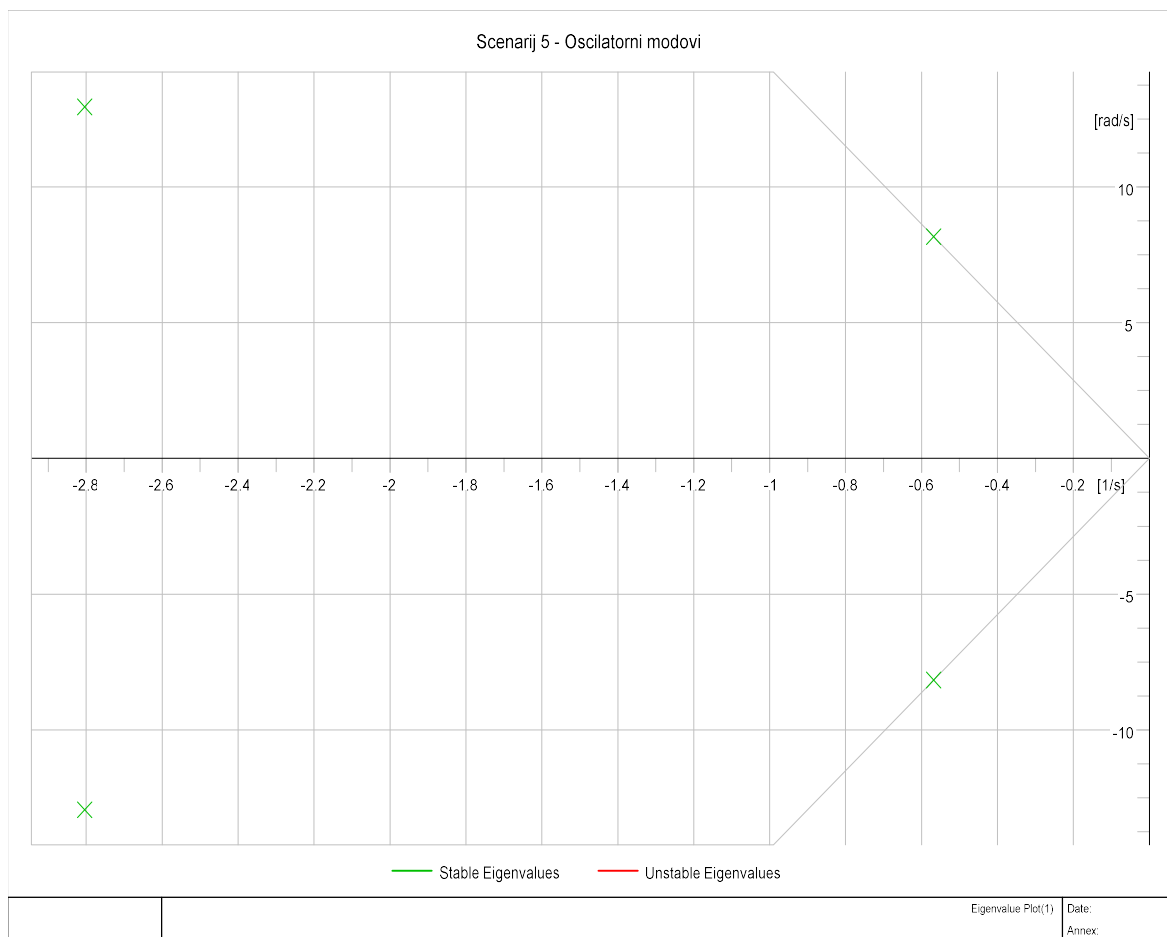
Slika 4.133 Krivulja mjesta korijena za sustav bez stabilizatora elektromehaničkih oscilacija u mreži s visokim udjelom obnovljivih izvora energije, scenarij 5

Tablica 4.39 Svojstvene vrijednosti IEEE sustava sa 14 sabirnica bez stabilizatora elektromehaničkih oscilacija uz visoku integraciju obnovljivih izvora energije, scenarij 5

Mod	Prigušenje, $\alpha$ [1/s]	Frekvencija prigušenja, $\omega$ [rad/s]	Frekvencija, Hz	Relativni koeficijent prigušenja, $\zeta$
01	0	0	0	nan
02	-0.014442995	0	0	1
03	-0.536505422	8.028013954	1.277698104	0.066680423
04	-0.536505422	-8.028013954	1.277698104	0.066680423
05	-0.673753822	0.442584621	0.07043953	0.835801053
06	-0.673753822	-0.442584621	0.07043953	0.835801053
07	-1	0	0	1
08	-1	0	0	1
09	-1.006638602	0	0	1
10	-1.08217596	0	0	1
11	-3.053616405	12.38889148	1.971753318	0.2393178
12	-3.053616405	-12.38889148	1.971753318	0.2393178
13	-3.060768112	3.806956382	0.605895926	0.626590954
14	-3.060768112	-3.806956382	0.605895926	0.626590954
15	-5.900103618	0	0	1
16	-9.99999712	0	0	1
17	-9.99999808	0	0	1
18	-21.44954291	0	0	1
19	-33.3212201	0	0	1
20	-45.1120295	4.450228325	0.708275836	0.995169477
21	-45.1120295	-4.450228325	0.708275836	0.995169477
22	-45.7482246	0	0	1
23	-49.99405562	0	0	1
24	-999.9999878	0	0	1
25	-1000.000054	0	0	1

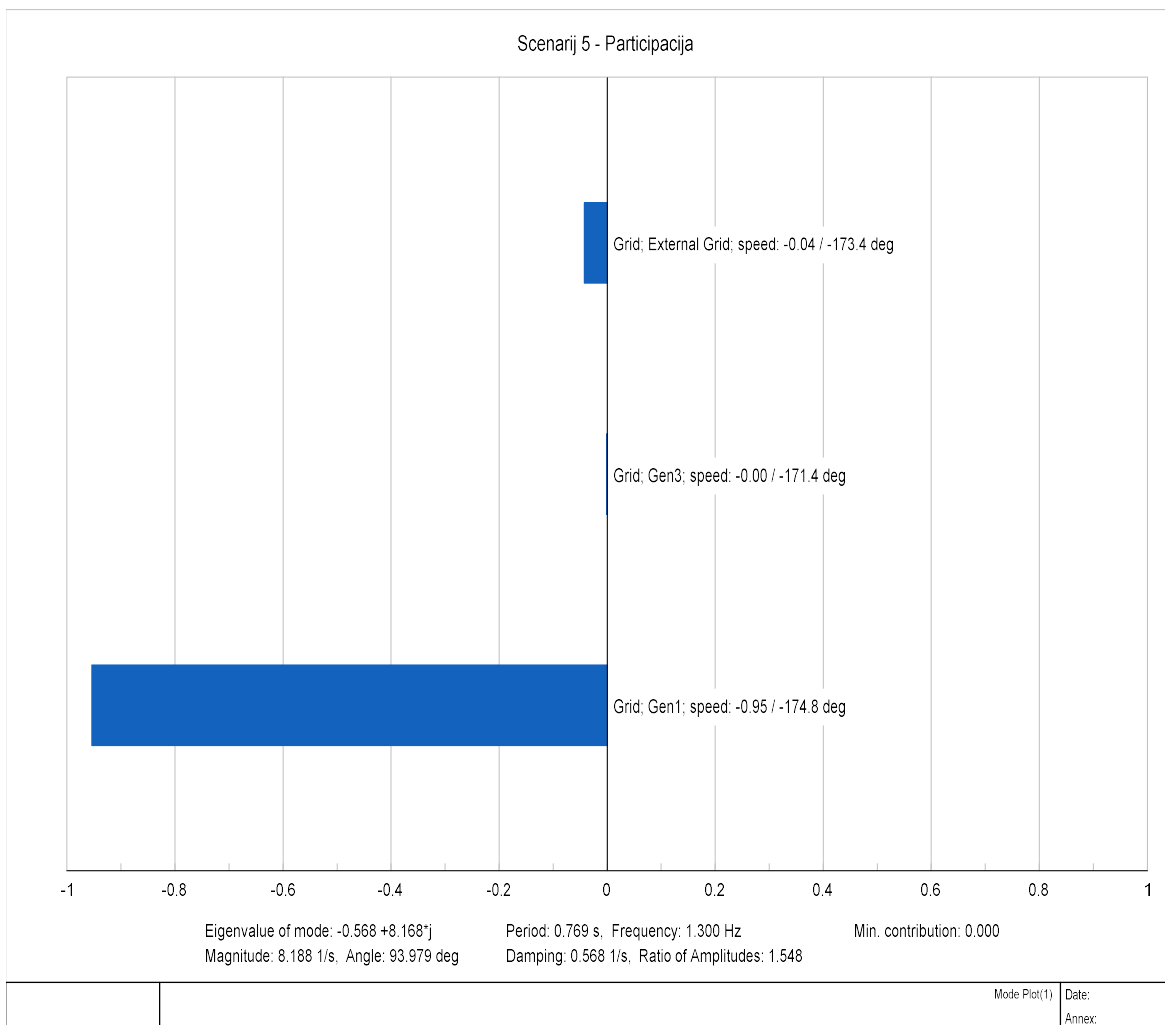
Dva niskofrekventna lokalna moda uzrokovani su jednim od dva aktivna generatora. Njihov položaj na krivulji mjesta korijena prikazan je slikom 4.134. Dominantni mod, najbliži ishodištu i sa frekvencijom oko 8 rad/s, je mod 3 iz tablice 4.39 i njegovo prigušenje iznosi -0.536505422 1/s.

Relativni koeficijent prigušenja tog moda iznosi 0.066680423 i budući da je blizu ishodišta, potrebno je povećati njegovo prigušenje te na taj način poboljšati oscilatornu stabilnost.



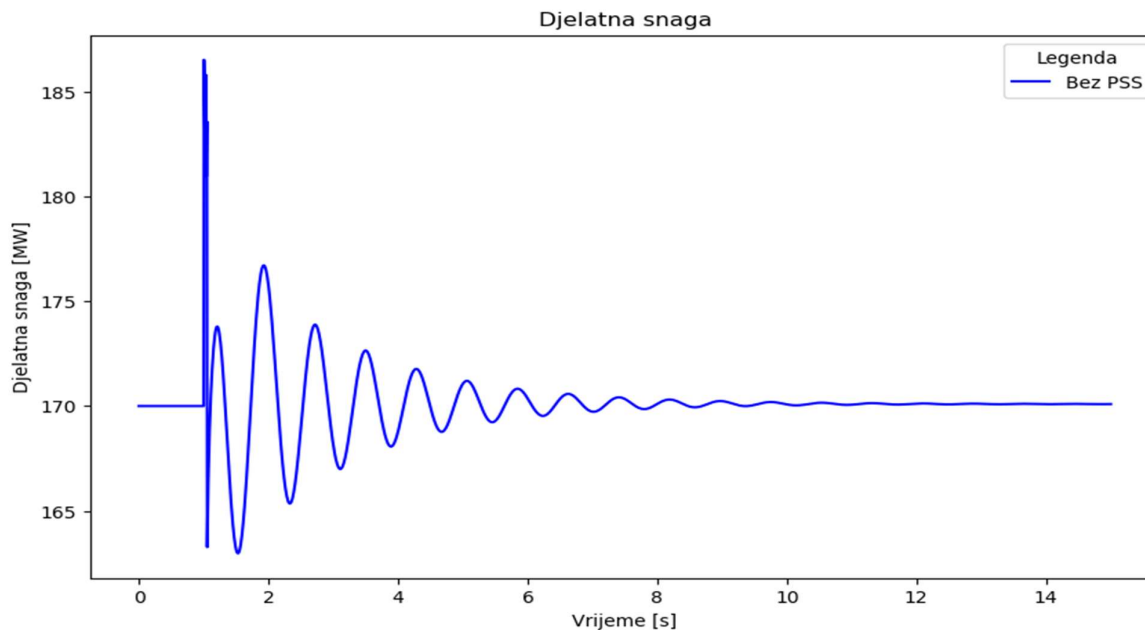
Slika 4.134 Oscilatorni modovi višestrojnog sustava s visokim udjelom obnovljivih izvora energije, scenarij 5

Budući da su modalnom analizom detektirana samo dva lokalna moda, koji su prikazani slikama 4.133 i 4.134 te tablicom 4.39, a iz rezultata je jasno da je dominantni mod oscilatorni mod naveden pod brojem 3 i 4 ( $-0.536505422 \pm 8.028013954j$ ), participacijska analiza se provodi upravo za taj par. Rezultat participacijske analize prikazan je slikom 4.135, na kojoj se vidi da u tom modu najveću participaciju (0.94) ima generator Gen1 - koji je i dalje najveći sinkroni generator u sustavu unatoč smanjenoj snazi. Prema rezultatima stabilizator elektromehaničkih oscilacija se postavlja u uzbudni krug generatora Gen1, s istom strukturom kao u prethodnim scenarijama te sa istom ulaznom veličinom (brzinom generatora).



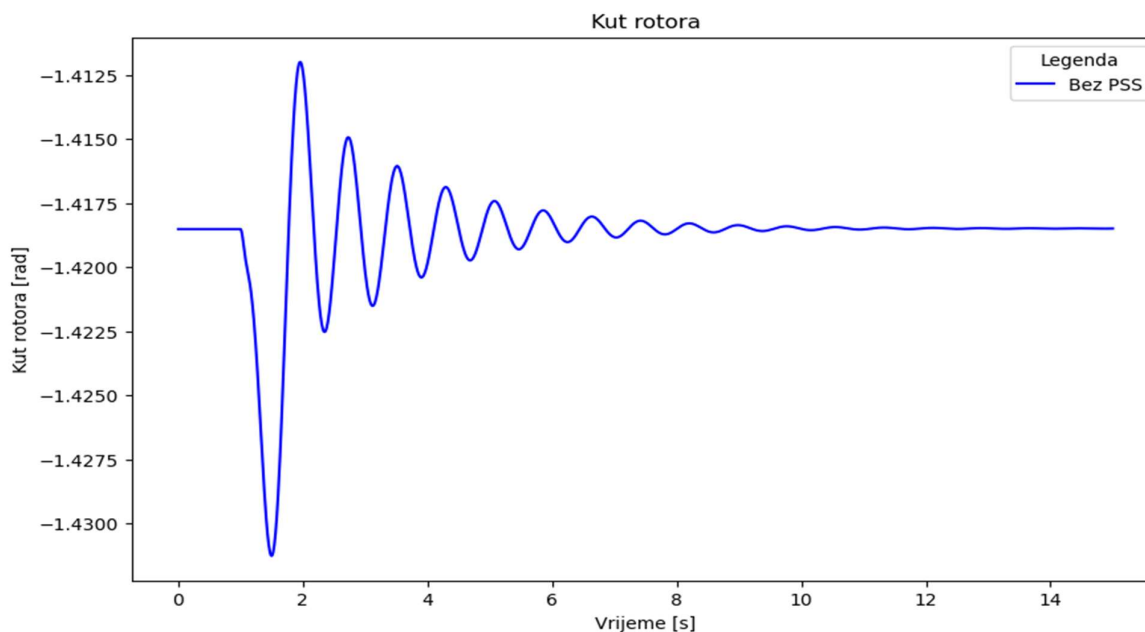
*Slika 4.135 Participacijska analiza dominantnog moda u sustavu s visokim udjelom obnovljivih izvora energije, scenarij 5*

Rezultati iz kompleksne frekvencijske domene se trebaju dopuniti rezultatima vremenske domene kako bi se stekao potpuni uvid u dinamičku sliku višestrojnog sustava. Djelatna snaga nakon malog poremećaja na sabirnici 4 u trajanju 50 ms je prikazana slikom 4.136. Djelatna snaga ima izražene oscilacije koje, uzevši u obzir da obnovljivi izvori energije unose varijacije u proizvodnji mogu dovesti do neželjenih posljedica kao što su isključenje dijelova mreže ili kritičnih vodova. Nakon pojave poremećaja, djelatna snaga se gotovo trenutno mijenja i doseže najveću vrijednost od oko 186 MW i najnižu 163 MW. Usporedbom sa prethodnim scenarijima jasno je da dolazi do manjih oscilacija snage, ali pri tome značajniji problem predstavlja skokovita promjena u prvom titraju budući da se u jako kratkom periodu pojavljuje velika promjena snage.



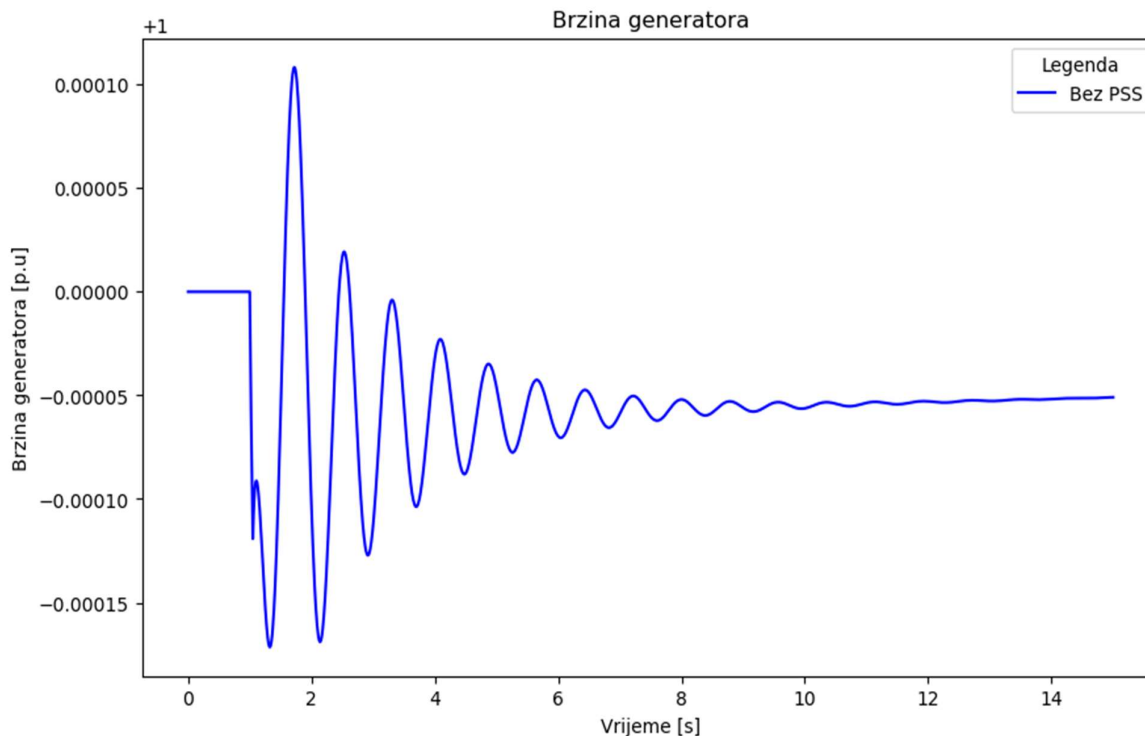
Slika 4.136 Djelatna snaga u sustavu s visokim udjelom obnovljivih izvora energije, scenarij 5

Kut rotora (slika 4.137) je veći nego u Scenarijima 1 do 4 budući da se promijenila i radna točka sustava te se mijenja iznos snage koju generator predaje u mrežu. Međutim, promjena kuta rotora nakon poremećaja prati isti obrazac ponašanja kao i za prethodne scenarije - do uspostave ravnotežnog stanja dolazi do oscilacija koje se u konačnici prigušuju te u konačnici kut rotora postiže vrijednost stanja prije poremećaja. Bez stabilizatora elektromehaničkih oscilacija vrijeme potrebno za prigušenje oscilacija i postizanje ustaljene vrijednosti je i do desetak sekundi.



Slika 4.137 Kut rotora u sustavu s visokim udjelom obnovljivih izvora energije, scenarij 5

Djelatna snaga i kut rotora u konačnici dosegnu vrijednost kao i prije poremećaja. Brzina generatora, prikazana slikom 4.138, pokazuje da vrijednost brzine nakon poremećaja doseže nešto nižu vrijednost koja se sporo povećava do vrijednosti koja je definirana radnom točkom generatora. Uz poznatu vezu brzine generatora i frekvencije, jasno je da se ta razlika mora otkloniti.



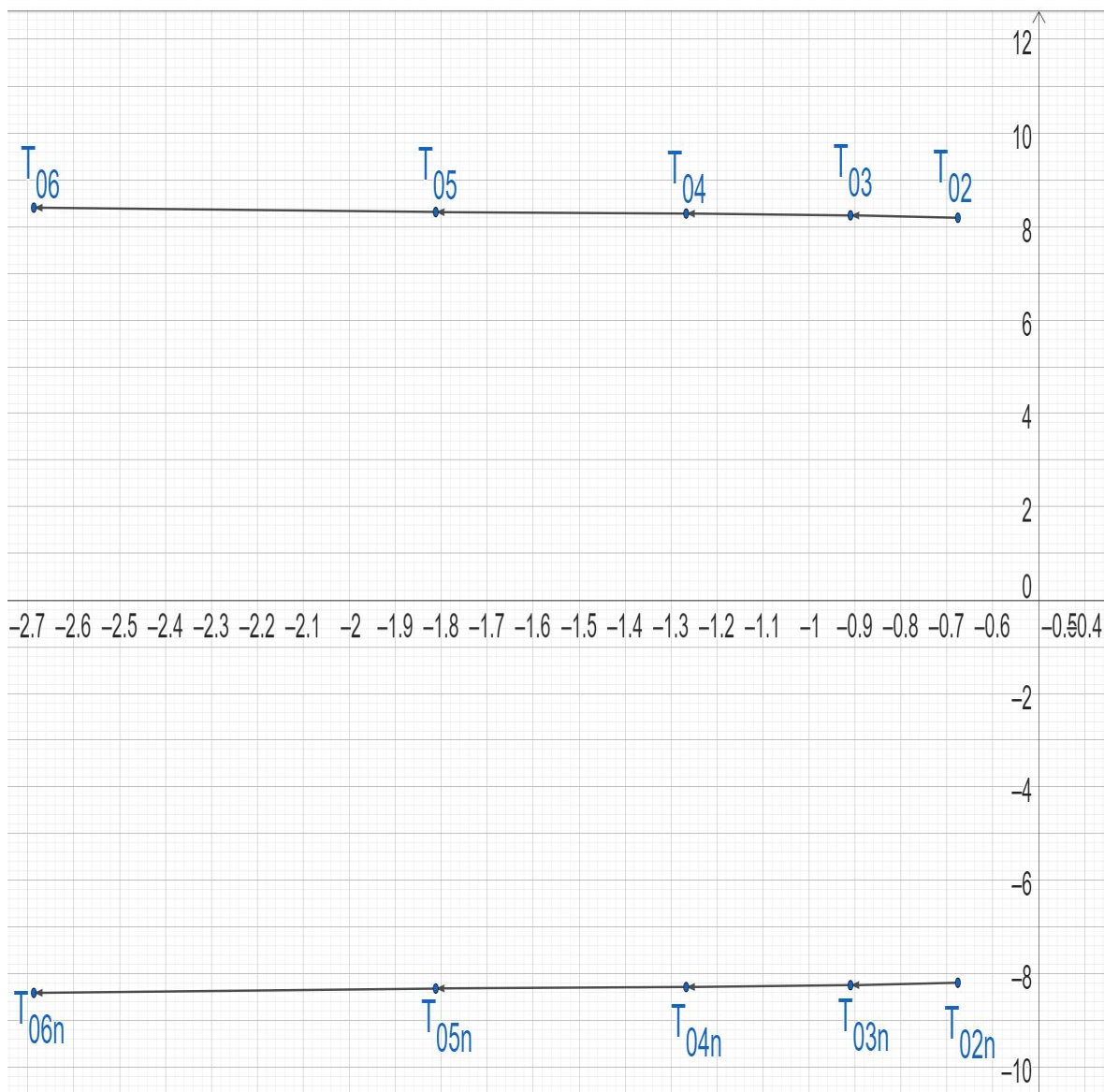
Slika 4.138 Brzina generatora u sustavu s visokim udjelom obnovljivih izvora energije, scenarij 5

Odabir parametara se opet provodi ponavljanjem modalne analize i simulacija u vremenskoj domeni. Rezultati iz kompleksne frekvencijske domene su svojstvene vrijednosti i relativni koeficijenti prigušenja, a prikazani su krivuljom mjesta korijena na slici 4.139. Povećanjem vremenske konstante se dominantni pol pomjera u lijevu stranu kompleksne ravnine i koeficijent prigušenja se povećava do određenog iznosa pojačanja nakon kojega je pomak sve manji te se u konačnici novi dominantni pol počinje primicati kompleksnoj osi.

Početna vrijednost se uzima kao  $T_1 = T_3 = T = 0.2$  s. Pojačanje se prema izrazu (3-38) računa za inercijsku konstantu  $H = 5.148$  s i prigušenje dominantnog pola  $\alpha_{dom} = -0.536505422$

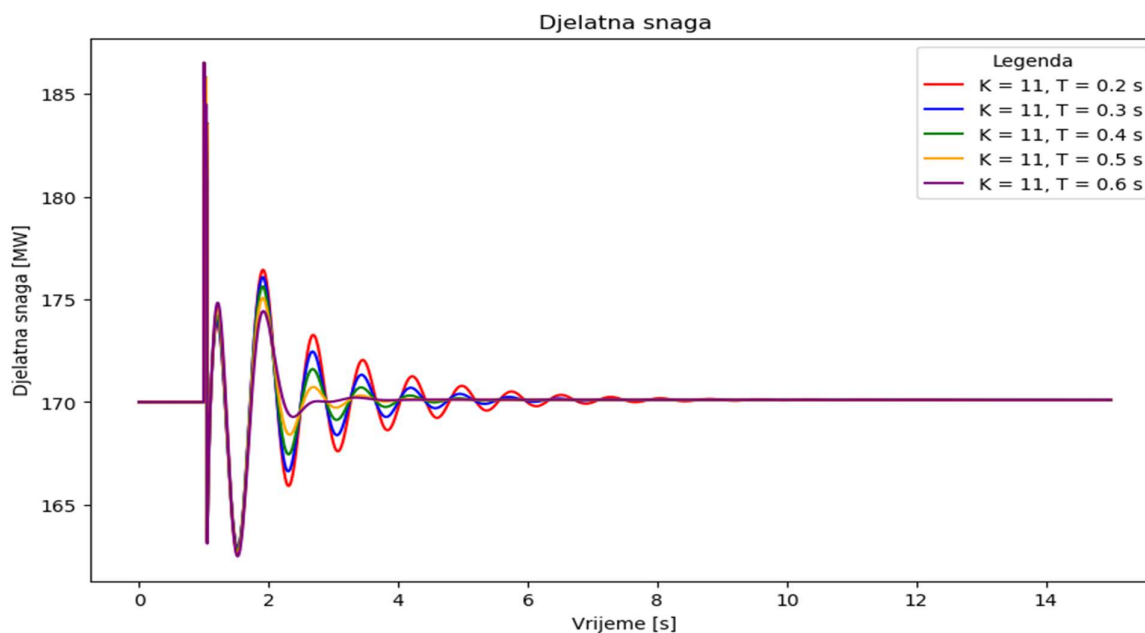
$$K_{init} = -\alpha_{dom} \cdot 4 \cdot H = -(-0.536505422) \cdot 4 \cdot 5.148 = 11.05 = 11$$

Dakle, kao početna vrijednost pojačanja se uzima  $K = 11$  i za tu vrijednost se rade varijacije vremenske konstante s ciljem određivanja optimalne vrijednosti.



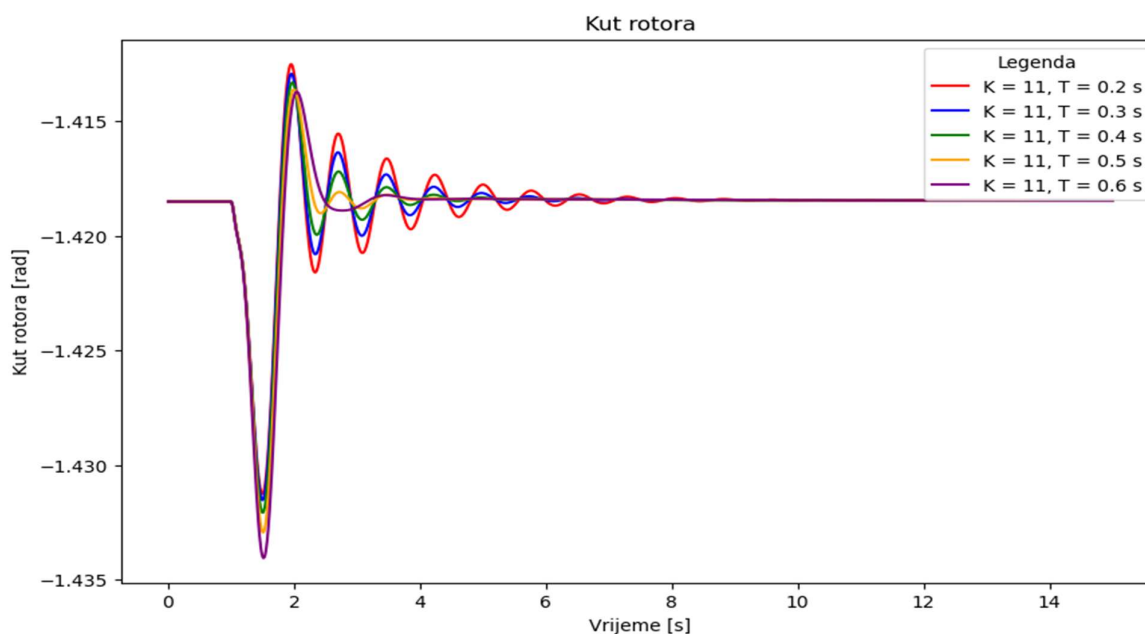
Slika 4.139 Krivulja mjesta korijena, scenarij 5

Rezultati vremenske domene su prikazani slikama 4.140 do 4.142 i prikazuju redom odzive djelatne snage za varijaciju vremenske konstante, kuta rotora i brzine generatora. Slikom 4.140, prikazana je djelatna snaga za varijacije vremenske konstante u rasponu od 0.2 sekunde do 0.6 sekundi. Kako se vremenska konstanta povećava, tako je i vrijeme postizanja ustaljene vrijednosti kraće, a amplituda oscilacija je sve manja.



Slika 4.140 Djelatna snaga za varijacije vremenske konstante u prvom skupu vrijednosti, scenarij 5

Identični su i rezultati za odzive kuta rotora. Povećanjem vremenske konstante se dobije niz odziva (slika 4.141) koji ukazuju na to da se većom vremenskom konstantom dobiju odzivi čija su odstupanja od početne vrijednosti sve manja. Najbrže postizanje ustaljene vrijednosti se odabirom parametara stabilizatora kojemu je vremenska konstanta  $T = 0.6$  sekundi.

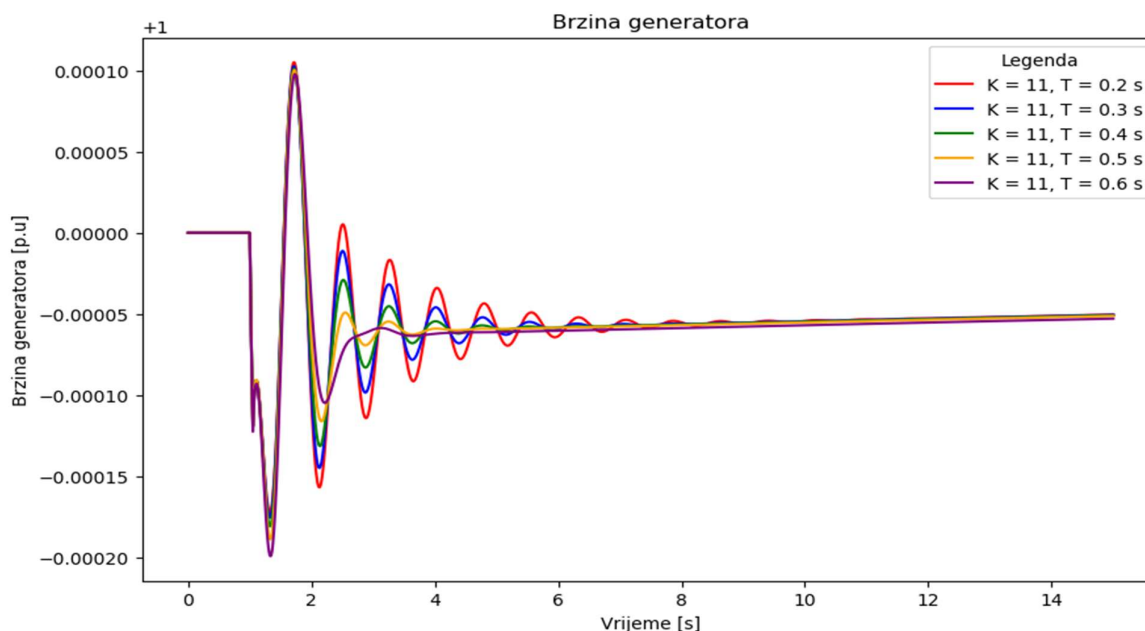


Slika 4.141 Kut rotora za varijacije vremenske konstante u prvom skupu vrijednosti, scenarij 5

Razlika brzine generatora za različite vremenske konstante, prikazana slikom 4.142, pokazuje da odstupanja vrijednosti brzina ne postoje kratko nakon pojave poremećaja, a razlika se uočava



tokom drugog i trećeg postizanja nadvišenja. Kako se povećava vremenska konstanta stabilizatora tako su amplitude odstupanja brzine sve manje. Iz slike se također može uočiti i da se u konačnici brzina lagano povećava prema vrijednosti prije poremećaja.



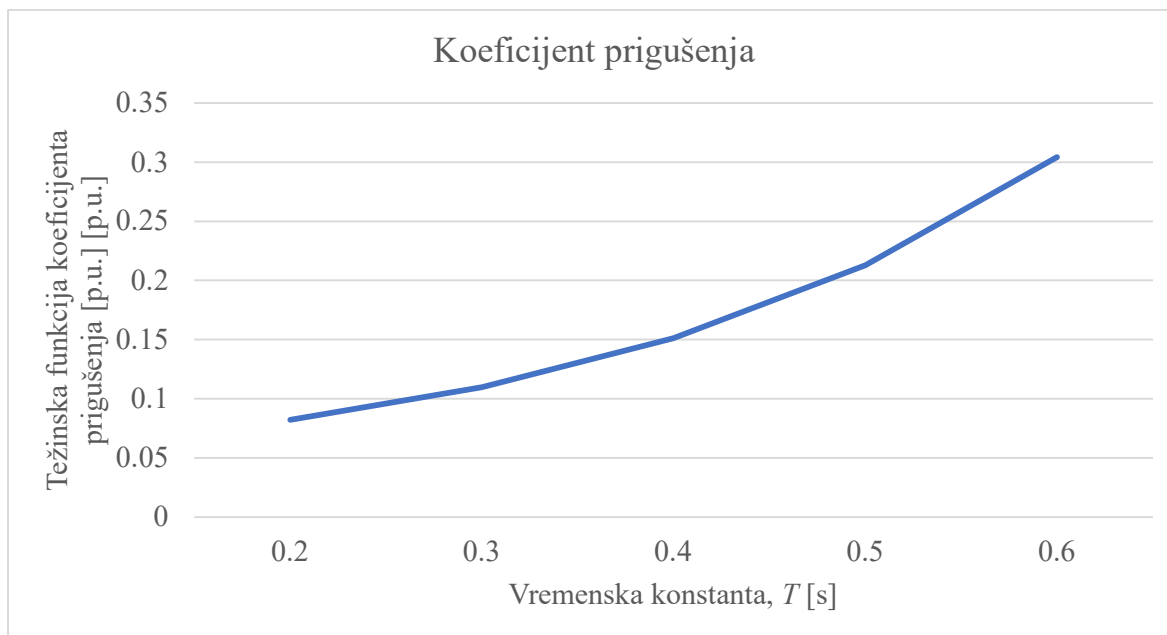
Slika 4.142 Brzina generatora za varijacije vremenske konstante u prvom skupu vrijednosti, scenarij 5

Za sve odzive u vremenskoj domeni, kao i rezultate iz kompleksne frekvencijske domene se određuju težinske funkcije prikazane tablicom 4.40. Prema rezultatima se uočava da ne postoji nijedna vrijednost vremenske konstante koja ispunjava uvjet (3-46).

Tablica 4.40 Težinske funkcije prvog skupa vremenskih konstanti, Scenarij 5

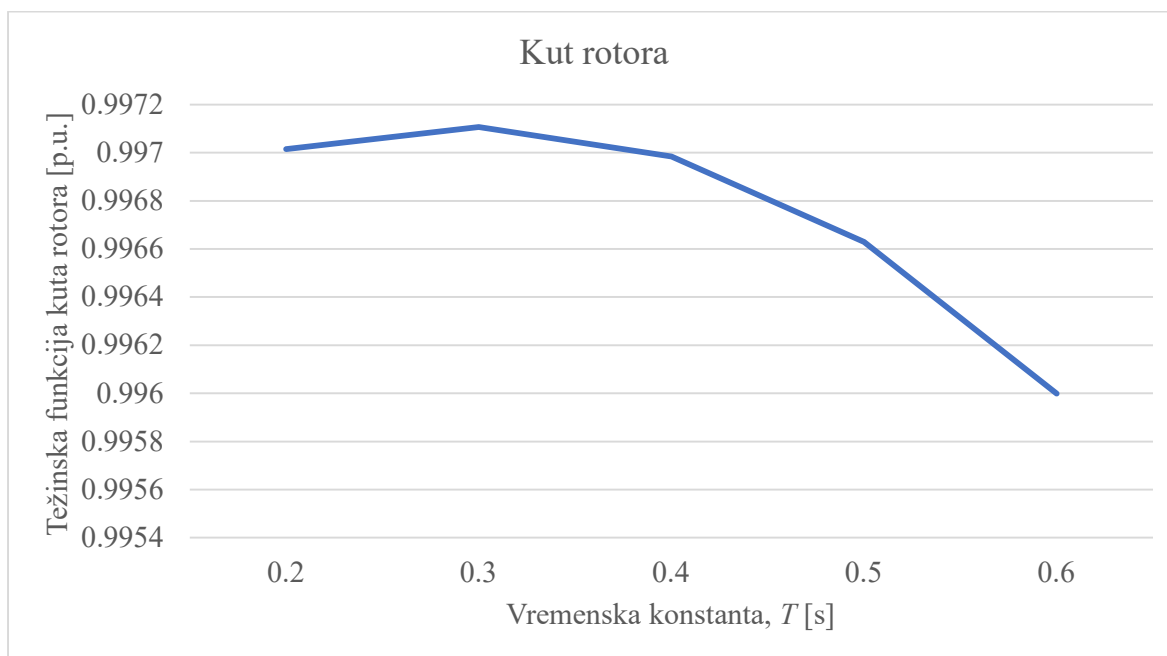
Vremenska konstanta, $T$ [s]	Koeficijent prigušenja	Kut rotora	Djelatna snaga	Brzina generatora	Ukupna težinska funkcija
0.2	0.082258	0.9970155	0.857389	0.999994	2.936657
0.3	0.109686	0.997107	0.872884	0.999994	2.979671
0.4	0.151242	0.996985	0.882957	0.999994	3.031179
0.5	0.212941	0.996628	0.888557	0.999994	3.098120
0.6	0.304387	0.995998	0.892243	0.999994	3.192623

Težinska funkcija koeficijenta prigušenja prikazana je slikom 4.143. Povećanjem vremenske konstante raste i koeficijent prigušenja do najveće vrijednosti koju postiže za  $T = 0.6$  sekundi.



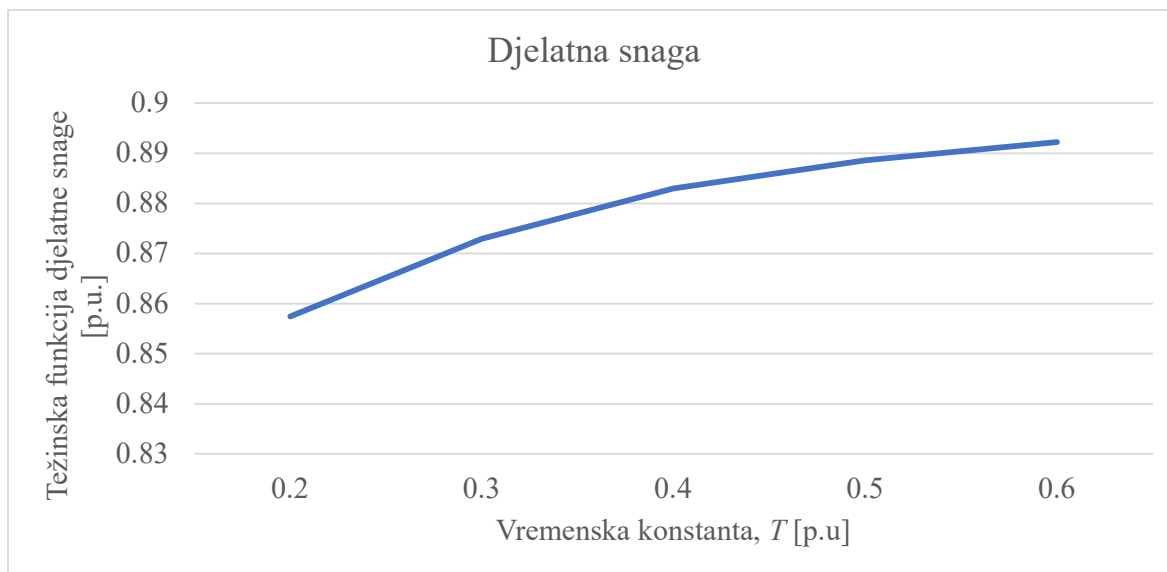
Slika 4.143 Težinska funkcija koeficijenta prigušenja za prvi skup varijacije vremenske konstante, scenarij 5

Slika 4.144 prikazuje težinsku funkciju kuta rotora. Povećanjem vremenske konstante, iznos težinske funkcije se smanjuje što implicira da se odstupanje kuta povećava.



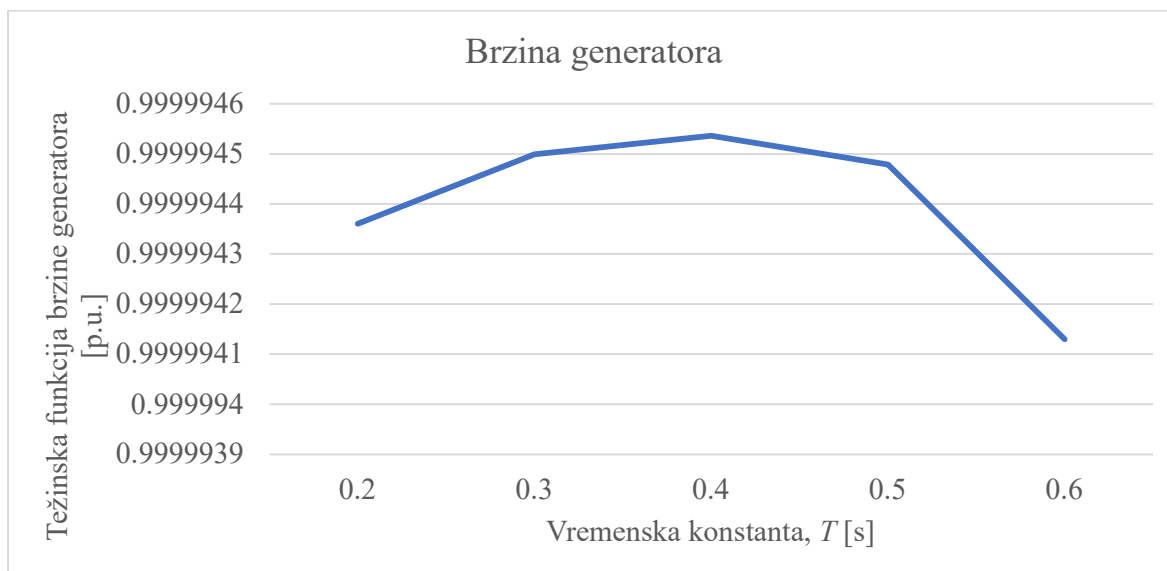
Slika 4.144 Težinska funkcija kuta rotora za prvi skup varijacije vremenske konstante, scenarij 5

Težinska funkcija djelatne snage prikazana je slikom 4.145. Kako raste vremenska konstanta, tako se i iznos težinske funkcije povećava - odstupanja djelatne snage u odnosu na početnu vrijednost prije poremećaja su sve manja.



Slika 4.145 Težinska funkcija kuta rotora za prvi skup varijacije vremenske konstante, scenarij 5

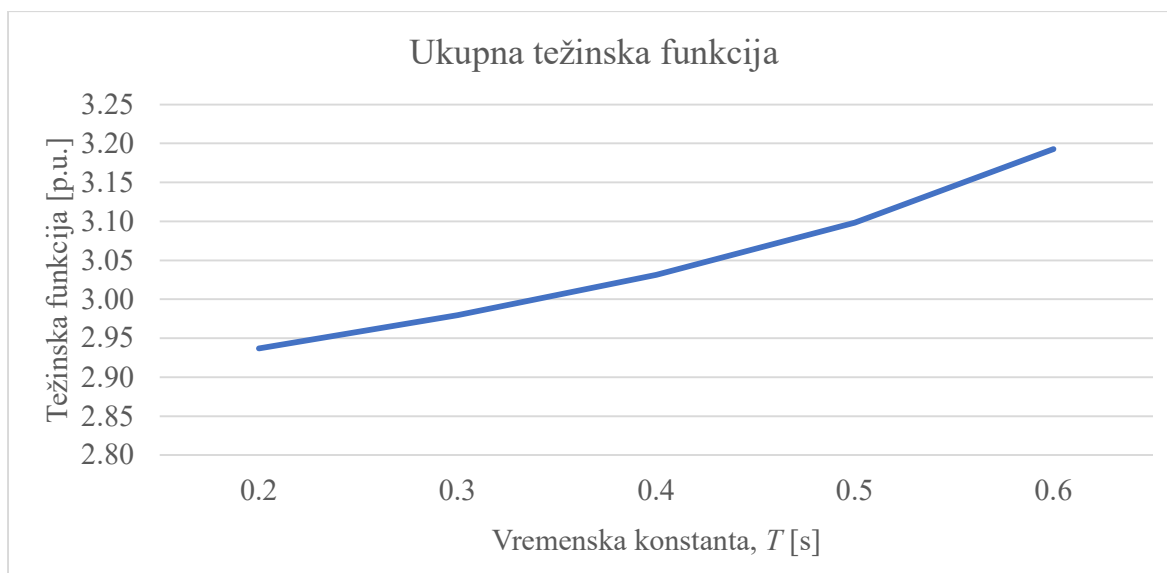
Težinska funkcija brzine generatora prikazana je slikom 4.146, a iz slike se vidi da je najmanje odstupanje (a time i najveća vrijednost težinske funkcije) brzine generatora vremenskoj konstanti  $T = 0.4$  sekunde. Međutim, najveća vrijednost težinske funkcije se dobije za vrijednost vremenske konstante  $T = 0.6$  sekundi.



Slika 4.146 Težinska funkcija brzine generatora za prvi skup varijacije vremenske konstante, scenarij 5

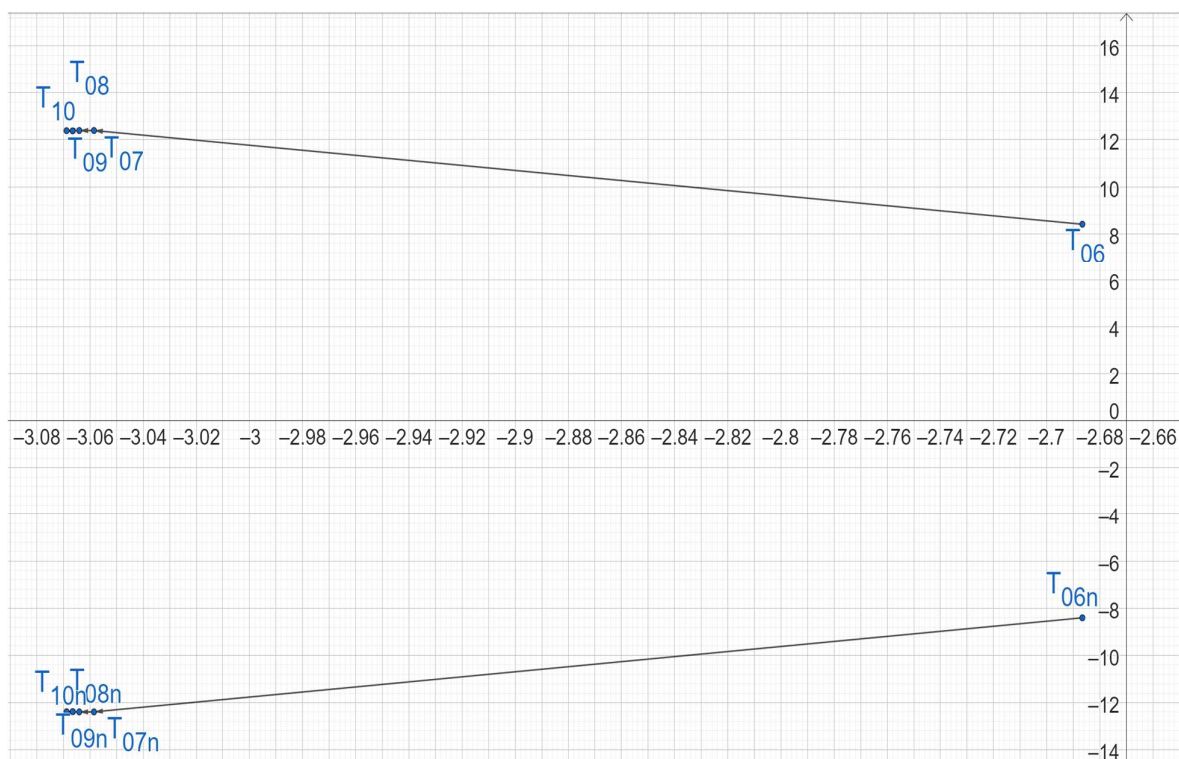
Odabir optimalne vrijednosti vremenske konstante se provodi na temelju ukupne težinske funkcije. Slikom 4.147 prikazana je ukupna težinska funkcija za koju se može uočiti da nema jasno izražen maksimum koji ispunjava uvjet iz potpoglavlja 3.121. Najveća vrijednost težinske funkcije je za

vremensku konstantu  $T = 0.6$  sekundi i funkcija je rastuća stoga se formira još jedan skup vremenskih konstanti raspona od 0.6 - 1 sekunde unutar kojeg se traži vrijednost vremenske konstante.



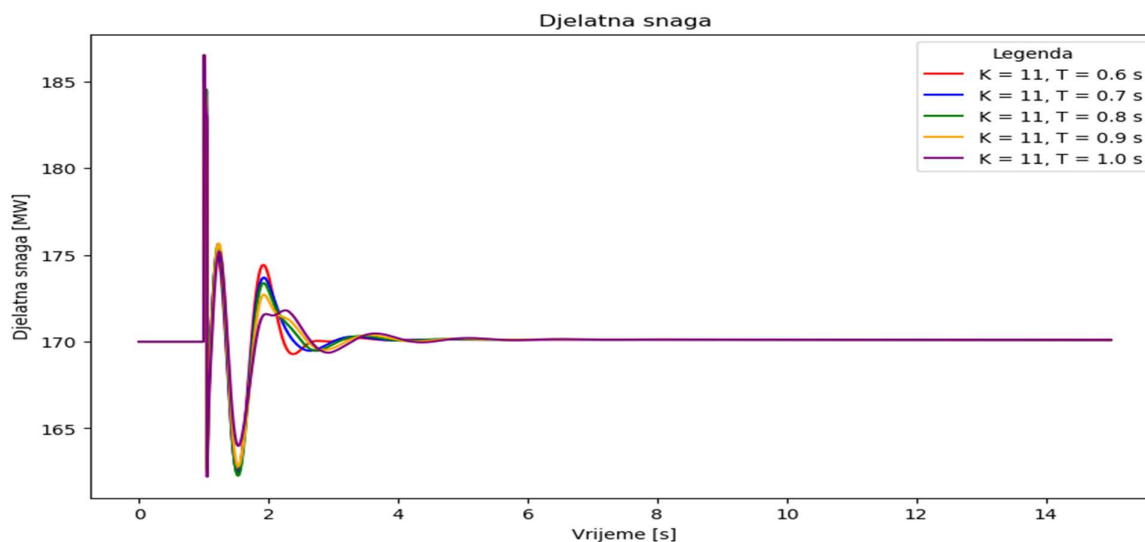
Slika 4.147 Ukupna težinska funkcija za prvi skup varijacije vremenske konstante, scenarij 5

S obzirom da u prvom skupu vrijednosti nije pronađena najbolja vrijednost vremenske konstante, formira se sljedeći skup čiji rezultati iz kompleksne frekvencijske domene prikazuje slika 4.148.



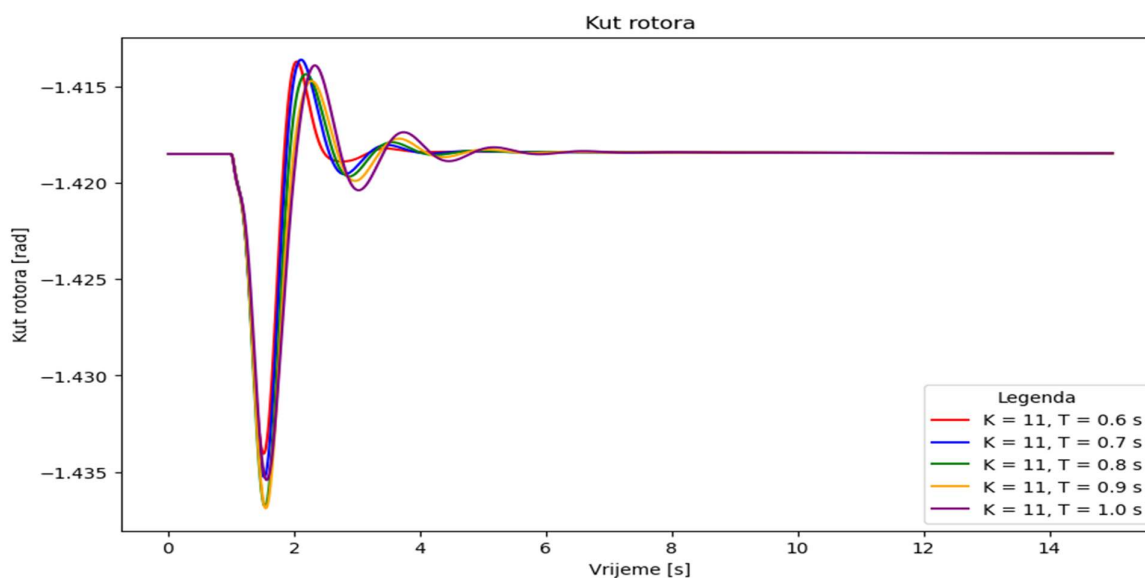
Slika 4.148 Položaj dominantnog pola pri varijaciji vremenske konstante za drugi skup vrijednosti, scenarij 5

Povećanjem vremenske konstante dominantni oscilatorni mod se pomjera u lijevu stranu kompleksne ravnine pri konstantnom pojačanju  $K = 11$ . Odzivi djelatne snage su prikazani slikom 4.149, a iz slike se uočava da će daljnje povećanje vremenske konstante stabilizatora rezultirati smanjenjem amplitude oscilacija. Međutim, povećanje vremenske konstante će ujedno rezultirati pojavom izobličenja djelatne snage i dužim trajanjem oscilacija.



Slika 4.149 Djelatna snaga za varijacije vremenske konstante u drugom skupu vrijednosti, scenarij 5

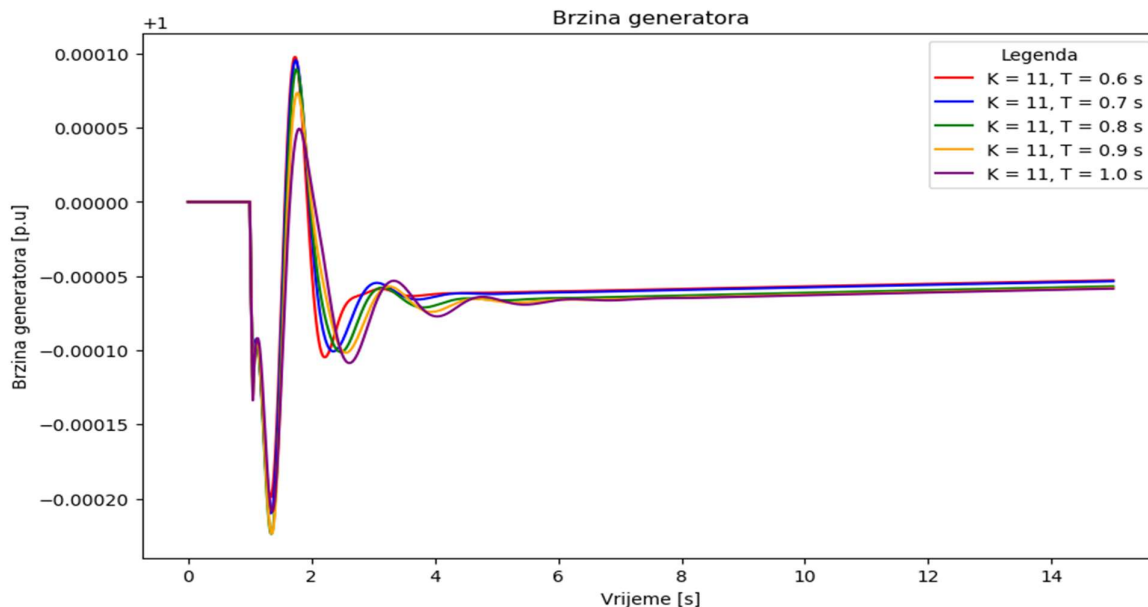
Odziv kuta rotora prikazan je slikom 4.150. Povećanje vremenske konstante pri konstantnom pojačanju će dovesti do pojave oscilacija kuta rotora koje se povećavaju što je konstanta veća.



Slika 4.150 Kut rotora za varijacije vremenske konstante u drugom skupu vrijednosti, scenarij 5

Kako se vremenska konstanta povećava, tako se amplitude oscilacija sve veće i odabirom prevelike vremenske konstante stabilizator može postati izvor nestabilnosti narušavajući tranzijentnu

stabilnost sustava. Ista situacija se događa i sa brzinom generatora, čije su varijacije u ovisnosti o vremenskoj konstanti prikazane slikom 4.151. Brzina generatora u prvom periodu ima izražene oscilacije i u konačnici nešto nižu brzinu. Međutim kada se uzme u obzir iznos tog odstupanja (0.99998 do 1.0001 p.u.), odstupanja se mogu zanemariti.



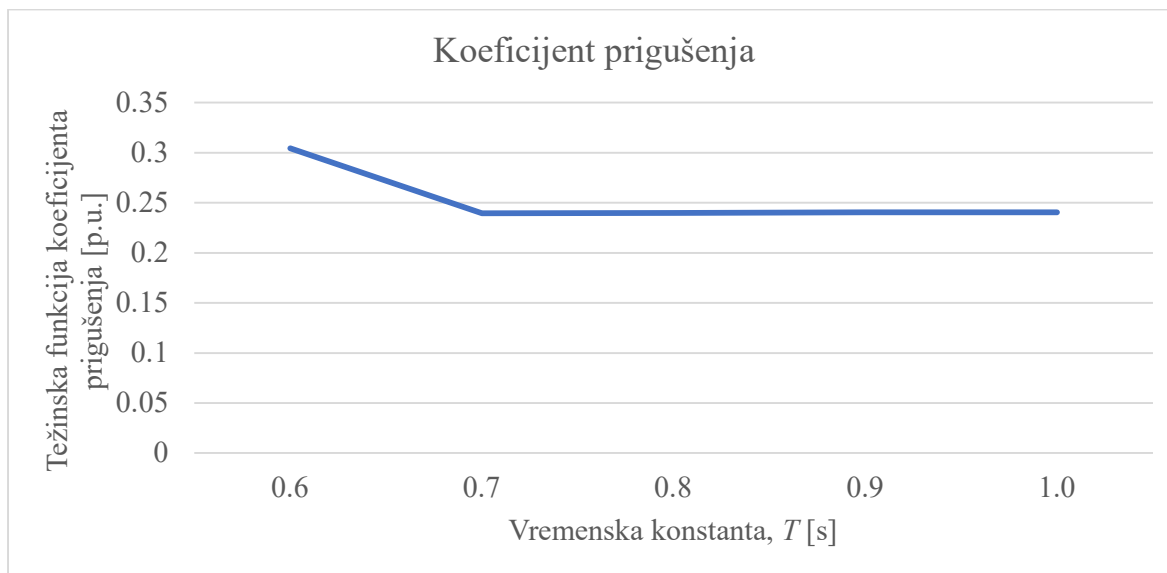
Slika 4.151 Brzina generatora za varijacije vremenske konstante u drugom skupu vrijednosti, scenarij 5

Težinske funkcije za drugi skup vrijednosti prikazane su tablicom 4.41 i iz nje se može vidjeti da je uvjet (3-46) ispunjen za vrijednost vremenske konstante  $T = 0.6$  sekundi. Zbog toga se ta vrijednost uzima kao optimalna i daljnji odabir vrijednosti pojačanja se nastavlja s tom vrijednošću. Također se može vidjeti da funkcija ima minimum u vrijednosti  $T = 0.8$  sekundi.

Tablica 4.41 Težinske funkcije za varijacije vremenske konstante za drugi skup vrijednosti, scenarij 5

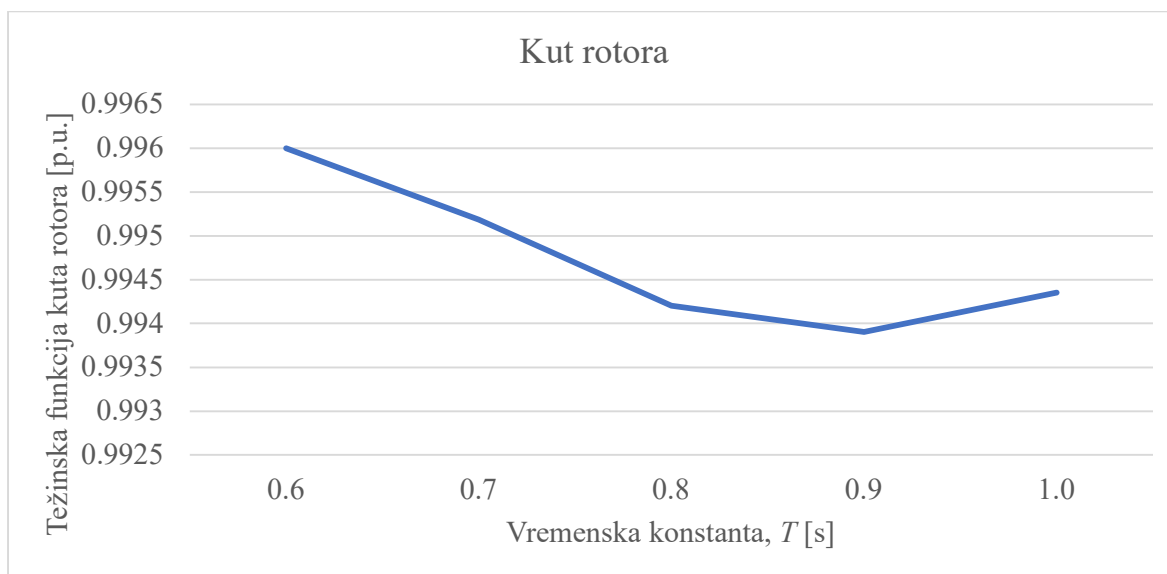
Vremenska konstanta, $T$ [s]	Koeficijen t prigušenja	Kut rotora	Djelatna snaga	Brzina generatora	Ukupna težinska funkcija
0.6	0.304387	0.995998	0.892243	0.999994	3.192623
0.7	0.239577	0.995186	0.891898	0.999994	3.126655
0.8	0.239990	0.994205	0.888883	0.999993	3.123071
0.9	0.240456	0.993905	0.897552	0.999993	3.131906
1.0	0.240411	0.994353	0.908802	0.999993	3.143560

Koeficijent prigušenja, čija je težinska funkcija prikazana slikom 4.152, najveću vrijednost u drugom skupu vrijednosti postiže pri vremenskoj konstanti  $T = 0.6$  sekundi nakon čega se vrijednost smanjuje. Ako se uzme u obzir da se povećanjem vremenske konstante dominantni pol približava ishodištu, jasno se može zaključiti da veća vremenska konstanta znači narušavanje oscilatorne stabilnosti.



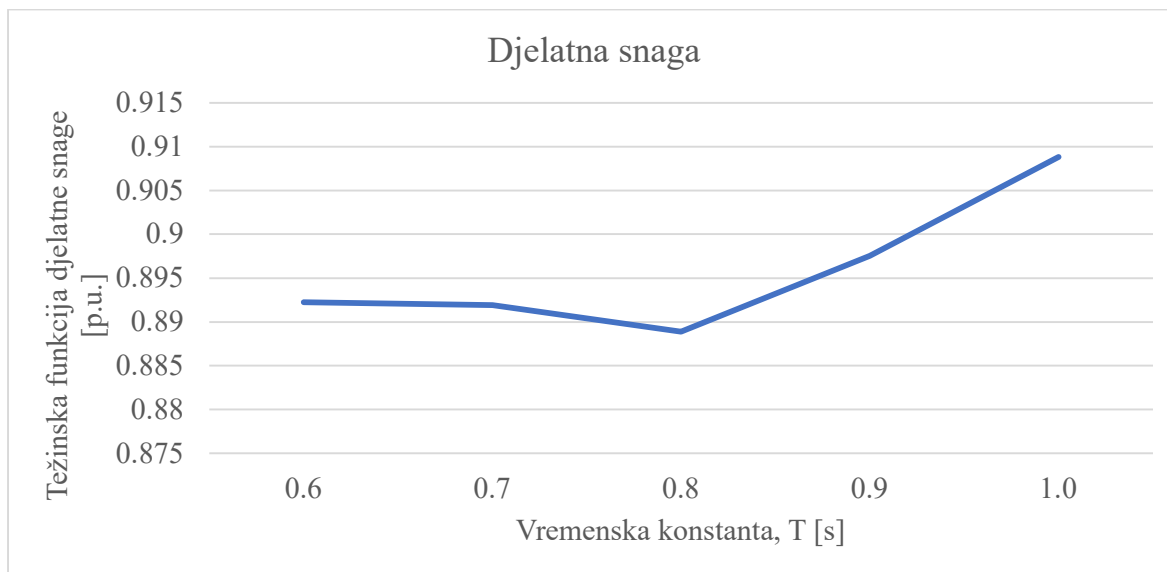
Slika 4.152 Težinska funkcija koeficijenta prigušenja za drugi skup vrijednosti, scenarij 5

Kut rotora, odnosno pripadna težinska funkcija za različite vrijednosti vremenske konstante, prikazan je slikom 4.153. Kako se povećava vrijednost vremenske konstante, tako vrijednost težinske funkcije pada do minimuma pri vrijednosti  $T = 0.9$  sekundi.



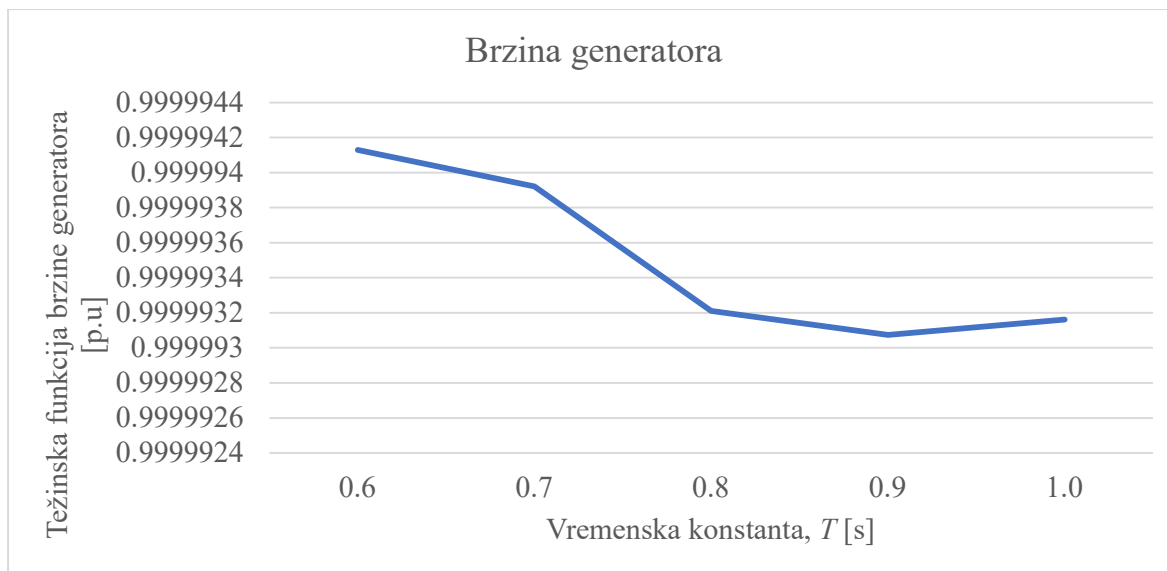
Slika 4.153 Težinska funkcija kuta rotora za drugi skup vrijednosti, scenarij 5

I za težinsku funkciju djelatne snage se može uočiti kako postiže lokalni minimum unutar promatranog raspona vrijednosti (slika 4.154). Nakon postizanja minimuma, vrijednost težinske funkcije brzo raste sa svakim povećanjem vremenske konstante.



Slika 4.154 Težinska funkcija djelatne snage za drugi skup vrijednosti, scenarij 5

Posljednja pojedinačna težinska funkcija je težinska funkcija brzine generatora i prikazana je slikom 4.155. Na slici se vidi da povećanje vremenske konstante dovodi do smanjenja vrijednosti funkcije - povećava se odstupanje vrijednosti brzine generatora u odnosu na početnu vrijednost poremećaja.

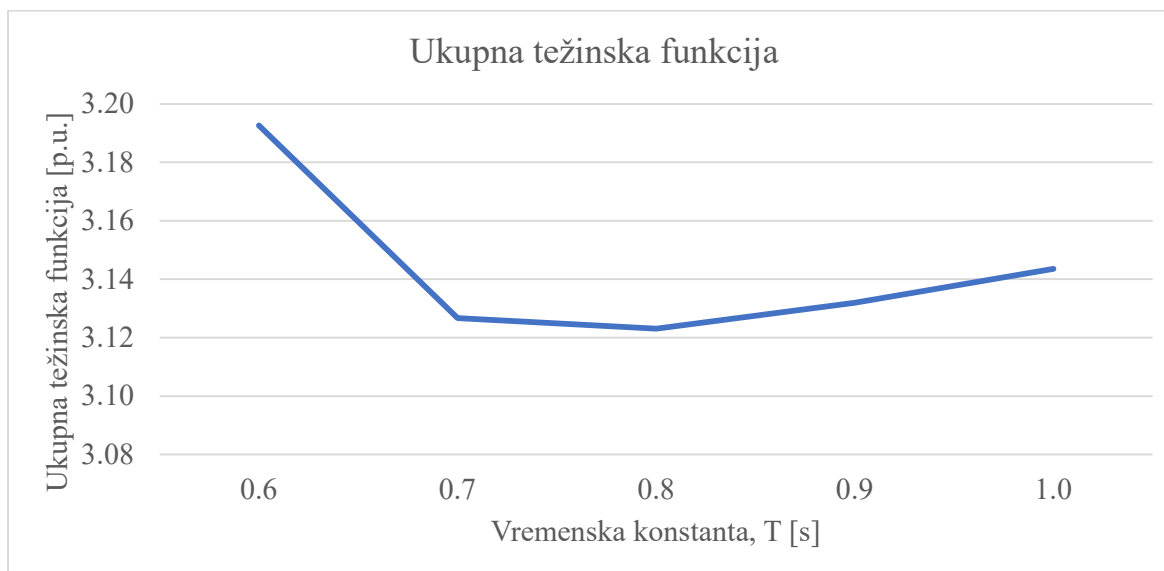


Slika 4.155 Težinska funkcija brzine generatora za drugi skup vrijednosti, scenarij 5

Ukupna težinska funkcija prikazana je slikom 4.156 i prema njoj se vidi da je lokalni maksimum pri vrijednosti vremenske konstante  $T = 0.6$  sekundi. Ujedno, to je jedina vrijednost za koju je

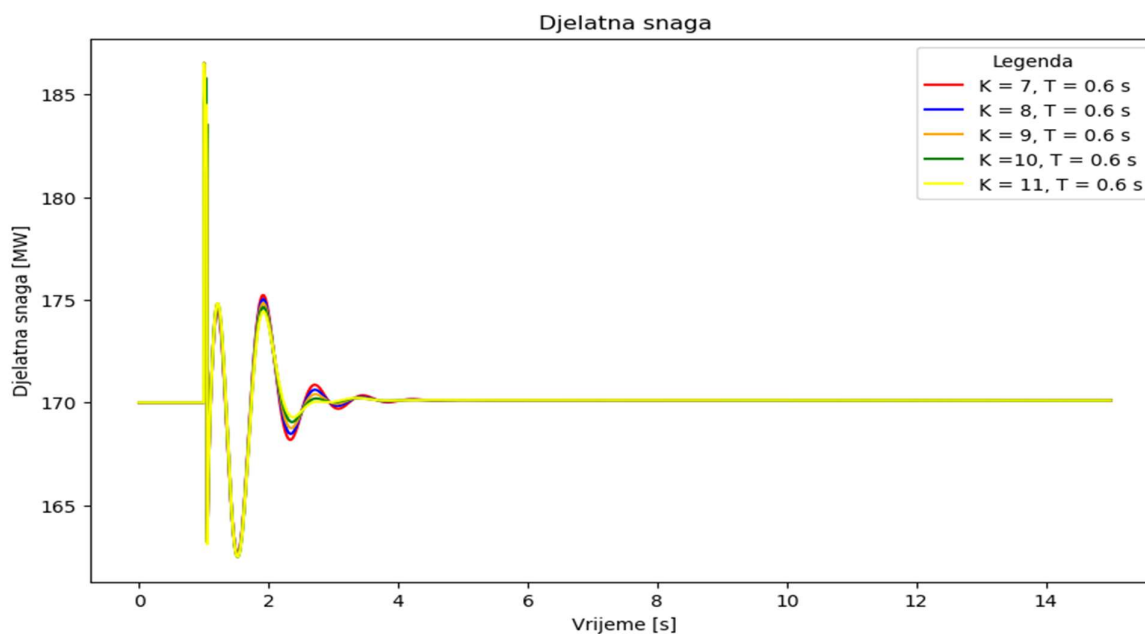


ispunjen uvjet (3-46) te se uzima kao vrijednost vremenske konstante stabilizatora. Za navedenu vrijednost se u nastavku traži vrijednost pojačanja.



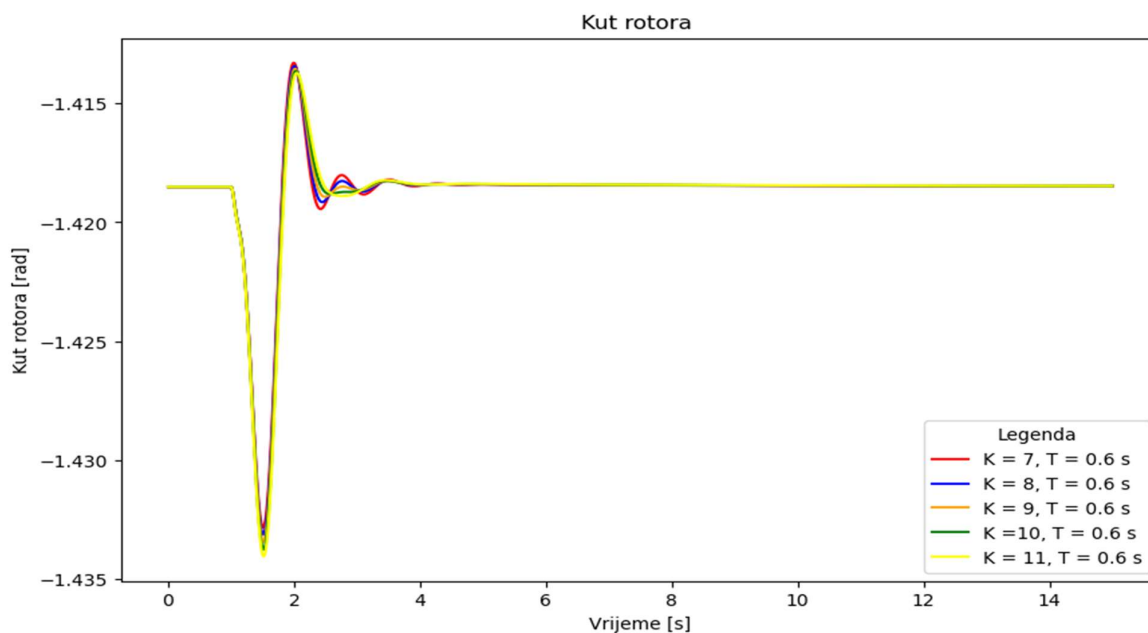
Slika 4.156 Ukupna težinska funkcija za drugi skup vrijednosti, scenarij 5

Određivanje pojačanja uz vremensku konstantu  $T = 0.6$  sekundi se radi u dva skupa vrijednosti - donjem s pojačanjima u rasponu 7 do 11 i gornjem s rasponima pojačanja od 12 do 15. Slikama 4.157 do 4.159 su prikazani odzivi djelatne snage, kuta rotora i brzine. Kao i u ranijim razmatranjima, djelatna snaga ima sve manje amplitude oscilacija kako se povećava vrijednost pojačanja.



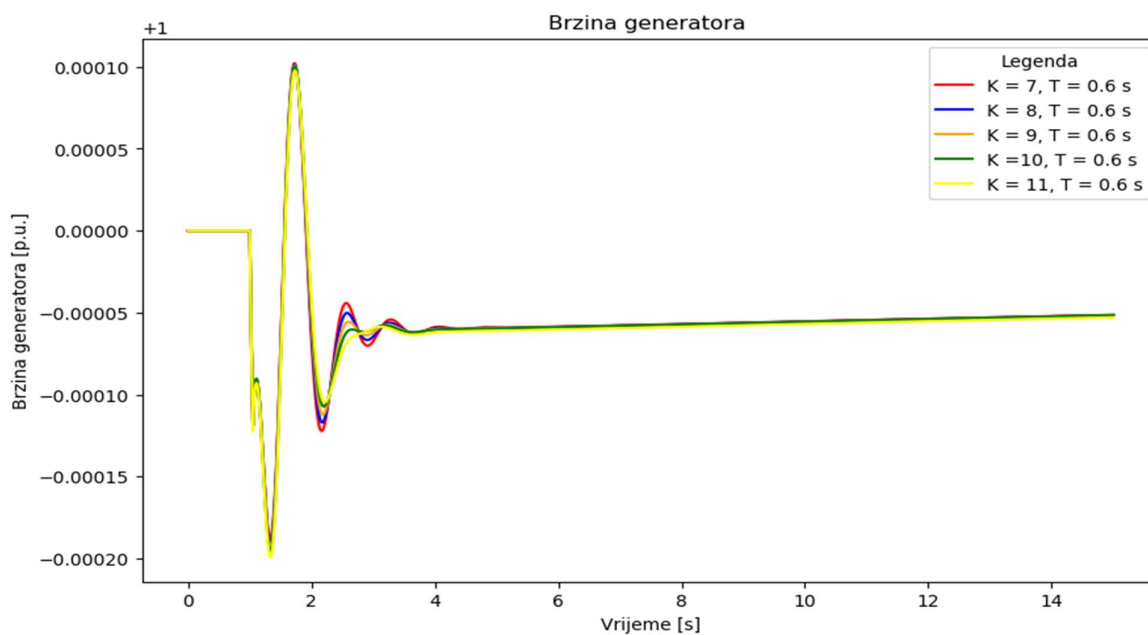
Slika 4.157 Djelatna snaga za varijacije pojačanja za donji skup vrijednosti, scenarij 5

Kut rotora, slika 4.158, također ima male razlike u amplitudama za varijacije pojačanje, a odziv se poboljšava kako se povećava vremenska konstanta stabilizatora.



Slika 4.158 Kut rotora za varijacije pojačanja za donji skup vrijednosti, scenarij 5

Najveća razlika se može uočiti za brzinu generatora, slika 4.159, za koju se uočava da povećanje vremenske konstante bloka za faznu kompenzaciju skraćuje vrijeme postizanja ustaljene vrijednosti veličine.



Slika 4.159 Brzina generatora za varijacije pojačanja za donji skup vrijednosti, scenarij 5

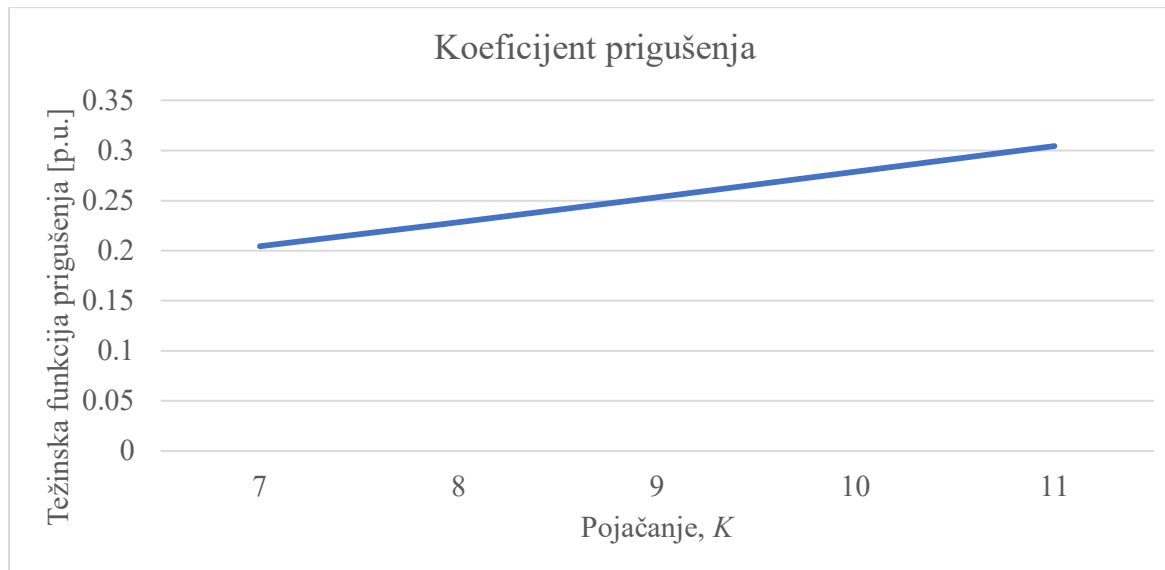
Za donji skup vrijednosti su određene vrijednosti pojedinačnih težinskih funkcija koje su prikazane tablicom 4.42. Povećanjem pojačanja povećava se i koeficijent prigušenja, odnosno poboljšava se

oscilatorna stabilnost sustava. Također, za veličine koje se promatraju u vremenskoj domeni su odstupanja sve manja u odnosu na vrijednost zabilježenu prije poremećaja.

Tablica 4.42 Težinske funkcije donjeg skupa vrijednosti u mreži s visokom integracijom obnovljivih izvora energije, scenarij 5

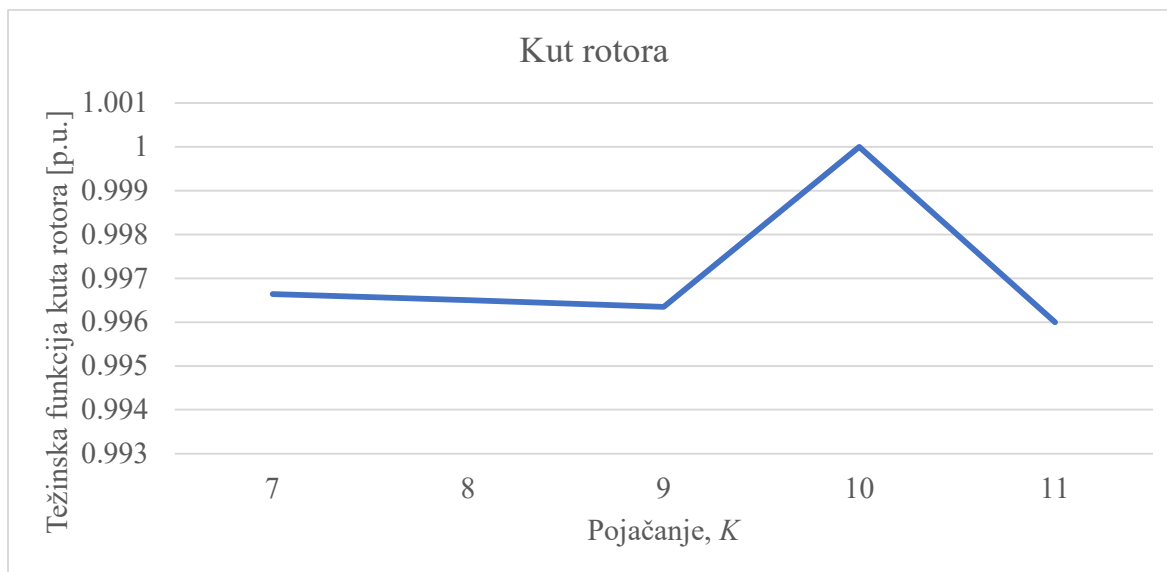
Pojačanje	Koeficijent prigušenja	Kut rotora	Djelatna snaga	Brzina generatora	Ukupna težinska funkcija
7	0.204498	0.996641	0.886567	0.999994	3.087701
8	0.22862	0.996505	0.887890	0.999994	3.113005
9	0.25355	0.996349	0.888763	0.999994	3.138659
10	0.27913	0.999999	0.889486	0.999996	3.168609
11	0.304387	0.995998	0.892243	0.999994	3.192623

U donjem setu ne postoji vrijednost koja se može uzeti kao najbolja i koja ispunjava postavljene uvjete da je lokalni ili globalni maksimum. Pojedinačne težinske funkcije su prikazane u slikama, a prva veličina koja je prikazana je koeficijent prigušenja (slika 4.160). Povećanje koeficijenta pojačanja stabilizatora elektromehaničkih oscilacija će poboljšati oscilatornu stabilnost i rezultat se očituje kao povećanje prigušenja sustava.



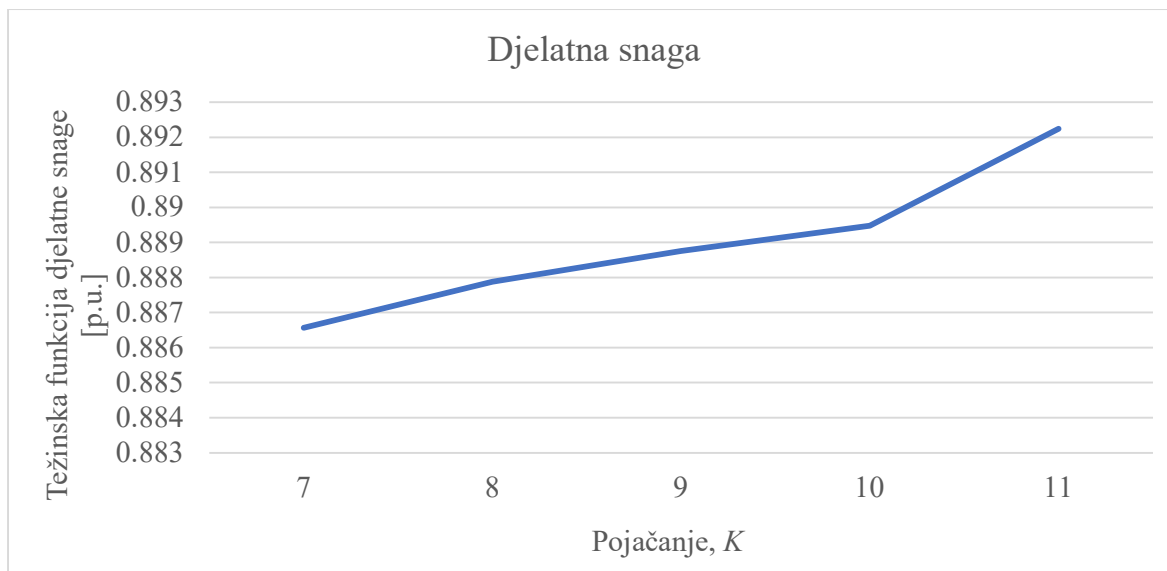
Slika 4.160 Težinska funkcija prigušenja za donji skup vrijednosti, scenarij 5

Težinska funkcija kuta rotora, slika 4.161, ima izraženo povećanje vrijednosti pri pojačanju  $K = 10$ .



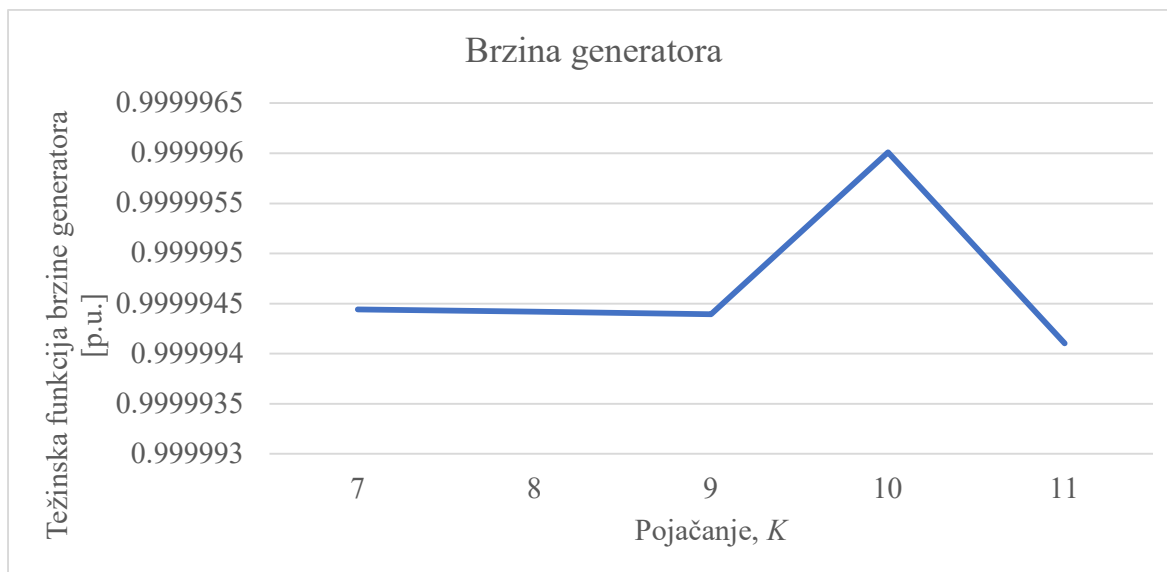
Slika 4.161 Težinska funkcija kuta rotora za donji skup vrijednosti, scenarij 5

Težinska funkcija djelatne snage prikazana je slikom 4.162. Povećanjem pojačanja se smanjuju odstupanja iznosa djelatne snage u odnosu na vrijednost prije poremećaja, što se uočava iz povećanja vrijednosti težinske funkcije.



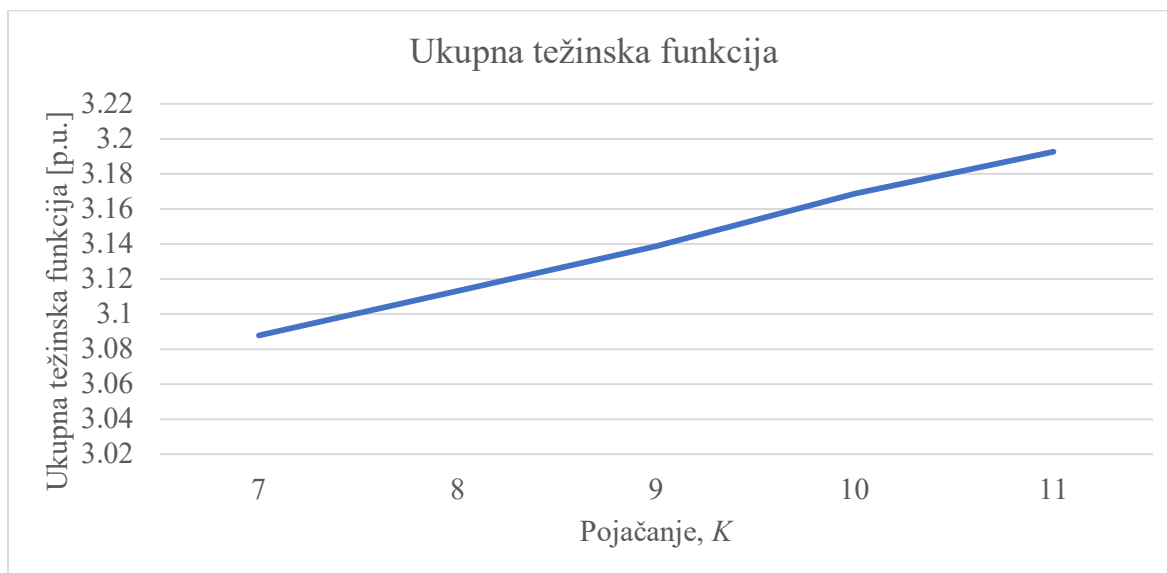
Slika 4.162 Težinska funkcija djelatne snage za donji skup vrijednosti, scenarij 5

Slikom 4.163 prikazana je težinska funkcija brzine generatora. Odstupanja i oblik težinske funkcije su slični težinskoj funkciji kuta rotora iz čega bi se moglo zaključiti, prema uvjetu odabira najbolje vrijednosti, da se najbolje performanse stabilizatora dobiju pri odabiru pojačanja  $K = 10$ .



Slika 4.163 Težinska funkcija brzine generatora za donji skup vrijednosti, scenarij 5

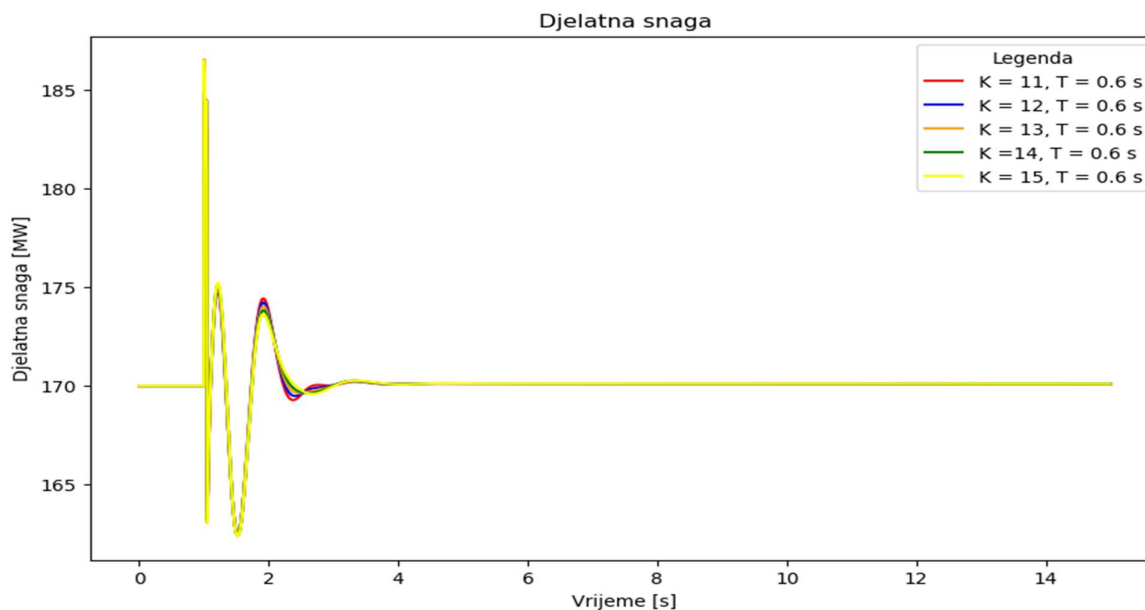
Unatoč prethodnim razmatranjima, koja ukazuju da bi vrijednost pojačanja mogla biti definirana prema pojedinačnim težinskim funkcijama, ukupna težinska funkcija donjeg skupa vrijednosti, prikazana slikom 4.164, pokazuje da u razmatranom skupu ne postoji nijedna vrijednost koja je jasno izražena kao globalni ili lokalni maksimum. Za taj skup najveća vrijednost težinske funkcije se dobije pri  $K = 11$ , a koja se uzima kao najbolja vrijednost pojačanja u donjem skupu vrijednosti varijacije pojačanja.



Slika 4.164 Ukupna težinska funkcija za donji skup vrijednosti, scenarij 5

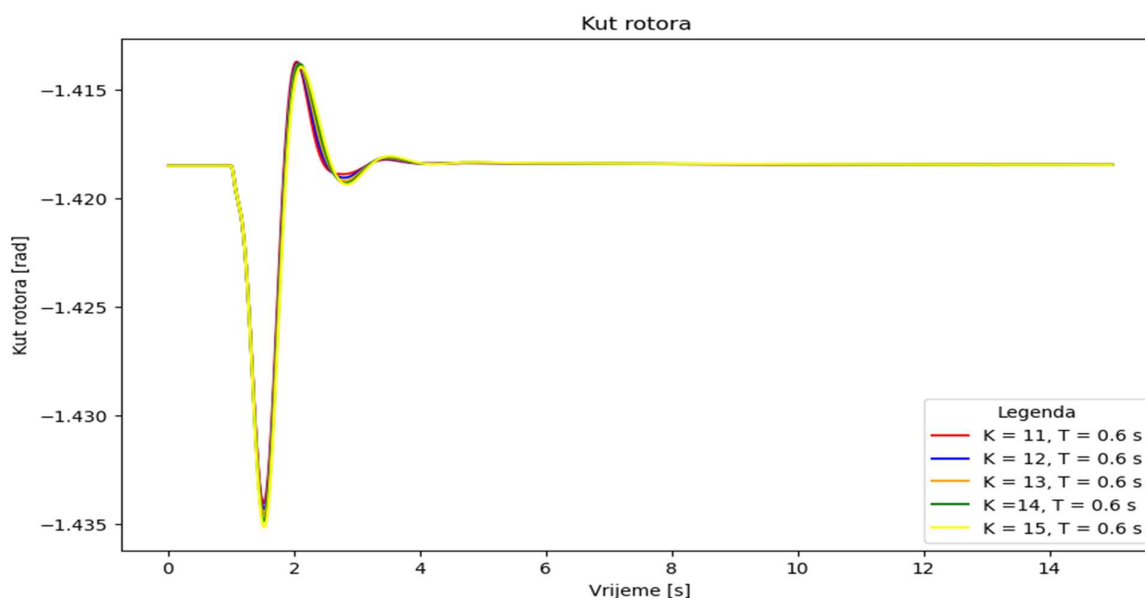
Razmatranje gornjeg skupa vrijednosti počinje prikazom oscilograma djelatne snage, kuta rotora i brzine generatora. Djelatna snaga, slika 4.165, ima sve manja odstupanja pri povećanju pojačanja.

Međutim, razlika u odzivima za pojedinačne vrijednosti se ne ističe u dovoljnoj mjeri da se može donijeti odluka o izboru najbolje vrijednosti pojačanja.



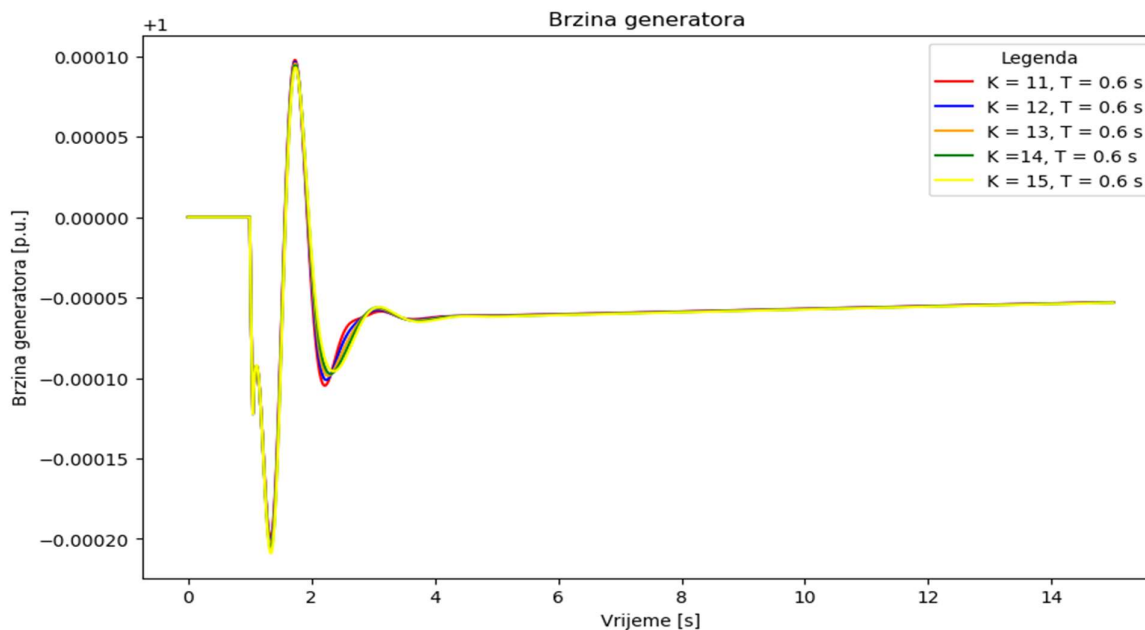
Slika 4.165 Djelatna snaga za varijacije pojačanja za gornji skup vrijednosti, scenarij 5

Za kut rotora, prikazan slikom 4.166 se može primijetiti narušavanje kvalitete regulacije pri povećanju pojačanja. Naime, pri vrijednosti pojačanja  $K = 15$  se već može uočiti pojava oscilacija pri postizanju ustaljene vrijednosti iznosa kuta.



Slika 4.166 Kut rotora za varijacije pojačanja za gornji skup vrijednosti, scenarij 5

Brzina generatora pak i dalje pokazuje tendenciju smanjenja amplitude oscilacija pri povećanju pojačanja (slika 4.167). S obzirom da su odstupanja brzine mala, promjene ne čine presudnu ulogu u određivanju najbolje vrijednosti pojačanja.



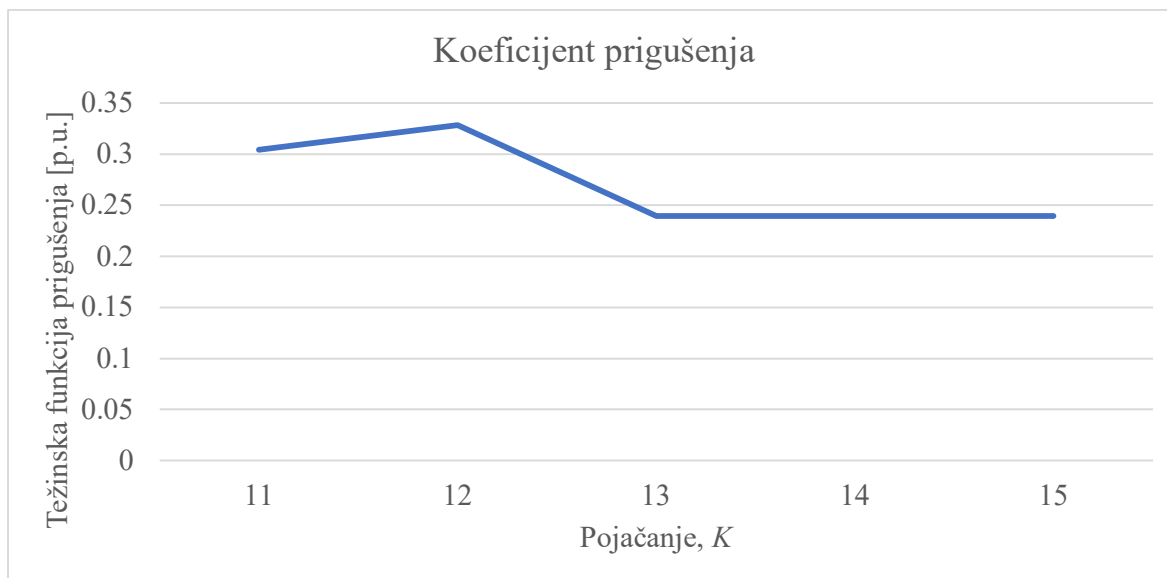
Slika 4.167 Brzina generatora za varijacije pojačanja za gornji skup vrijednosti, scenarij 5

Vrijednosti težinskih funkcija za varijacije pojačanja su prikazane tablicom 4.43 i iz tablice se može jasno odrediti vrijednost koja predstavlja maksimum funkcije, a to je pri pojačanju  $K = 12$ . Na ukupni iznos težinske funkcije najveći utjecaj ima koeficijent prigušenja, koji doseže svoj maksimum. Oscilatorna stabilnost je pri tome poboljšana, dominantni oscilatorni mod je duboko u lijevoj polovici kompleksne ravnine. Odstupanja kuta rotora i brzine generatora su jako malog iznosa te se stoga se kao konačna vrijednost parametara uzima vremenska konstanta  $T = 0.6$  i pojačanje  $K = 12$ . Uz taj parametar postignut je konsenzus istovremenog poboljšanja u vremenskoj i kompleksnoj frekvencijskoj domeni.

Tablica 4.43 Težinske funkcije donjeg skupa vrijednosti uz visoku integraciju obnovljivih izvora energije, scenarij 5

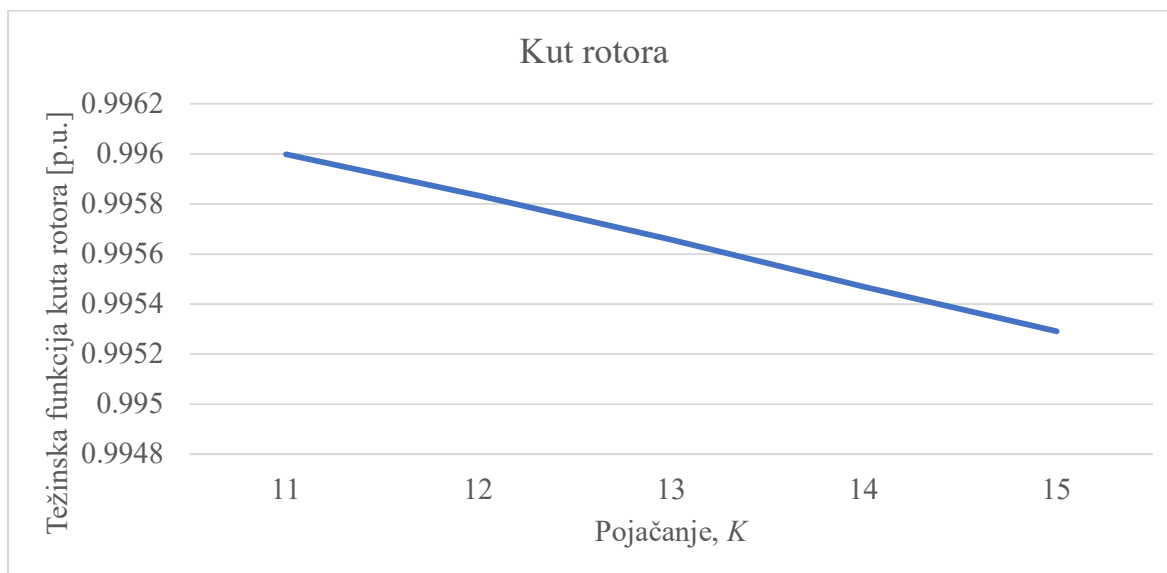
Pojačanje	Koeficijent prigušenja	Kut rotora	Djelatna snaga	Brzina generatora	Ukupna težinska funkcija
11	0.304387	0.995998	0.892243	0.999994	3.192623
12	0.328349	0.995833	0.892806	0.999994	3.216982
13	0.239439	0.995659	0.893132	0.999994	3.128222
14	0.239479	0.995469	0.893291	0.999994	3.128233
15	0.239546	0.9952917	0.8934797	0.999994	3.128311

Težinska funkcija koeficijenta prigušenja prikazana je slikom 4.168. Razlike u iznosima za pojedine koeficijente pojačanja su malene, ali dovoljne da se u ovom skupu vrijednosti dobije lokalni maksimum.



Slika 4.168 Težinska funkcija prigušenja za gornji skup vrijednosti, scenarij 5

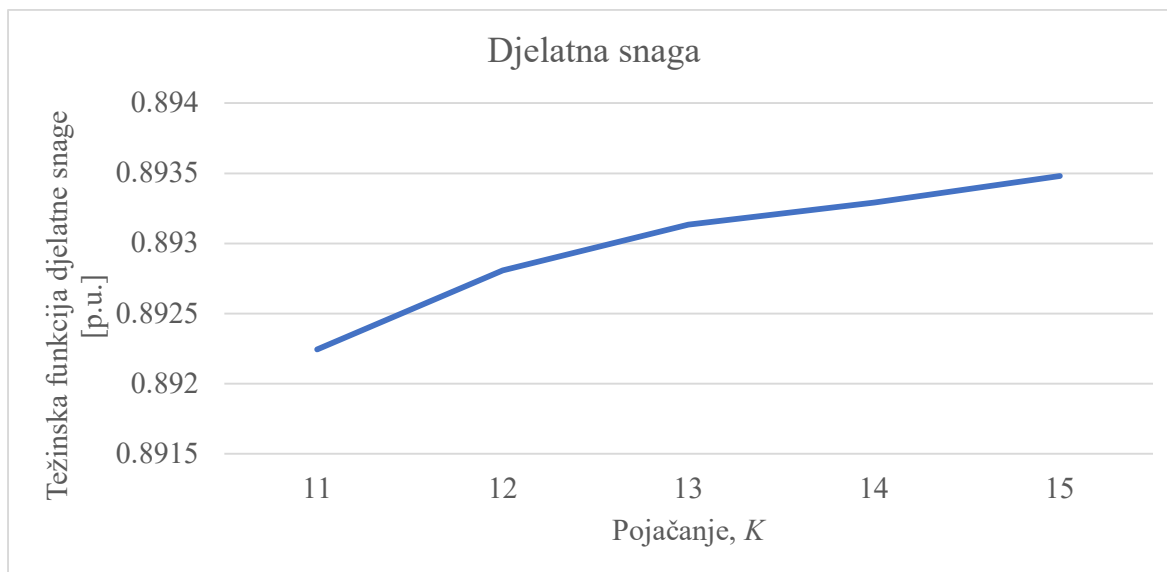
Težinska funkcija kuta rotora je prikazana slikom 4.169 i iz nje se uočava da će povećanje pojačanja rezultirati povećanjem odstupanja trenutnih vrijednosti kuta rotora u odnosu na početnu, odnosno da će oscilacije i promjene amplitude biti sve veće kako pojačanje ima veću vrijednost.



Slika 4.169 Težinska funkcija kuta rotora za gornji skup vrijednosti, scenarij 5

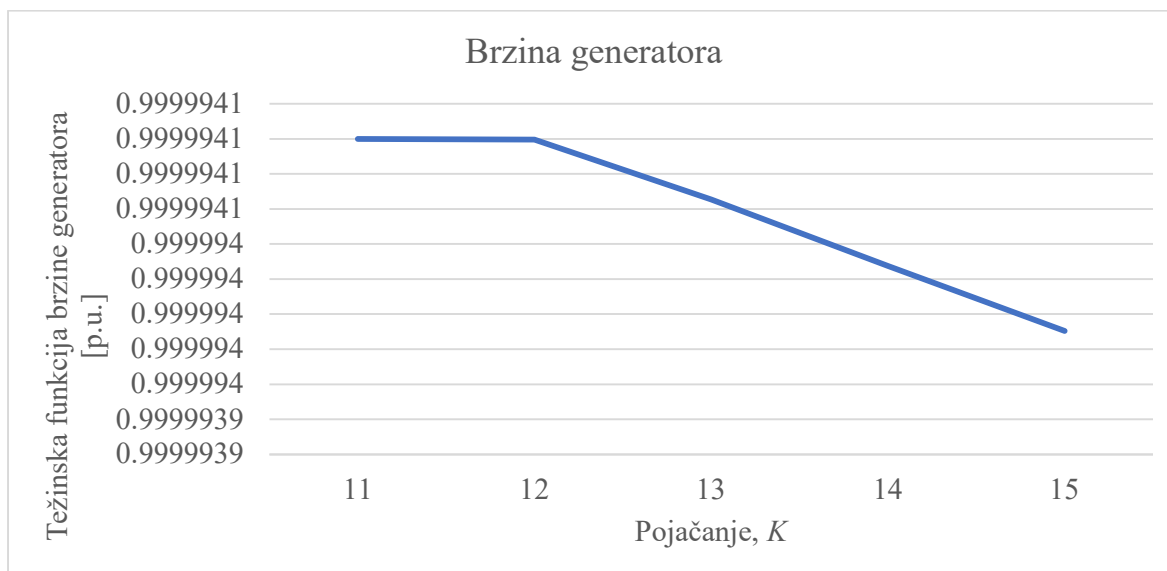
Težinska funkcija djelatne snage je prikazana slikom 4.170, a pokazuje da se povećanjem pojačanja smanjuju odstupanja djelatne snage u odnosu na početnu vrijednost snage zabilježenu prije poremećaja.





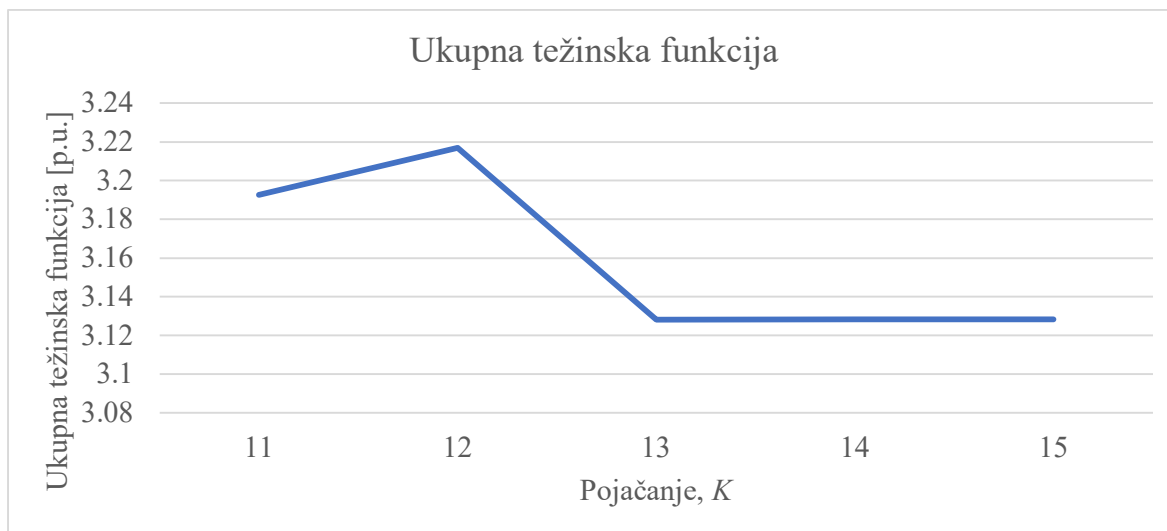
Slika 4.170 Težinska funkcija djelatne snage za gornji skup vrijednosti, scenarij 5

Zadnja pojedinačna funkcija koja se prikazuje je težinska funkcija brzine generatora i prikazana je slikom 4.171. Za brzinu generatora se već oscilogramima moglo vidjeti povećanje oscilacija pri povećanju pojačanja, a težinskom funkcijom se to i potvrđuje budući da se njezina vrijednost smanjuje kako vrijednost pojačanja raste.



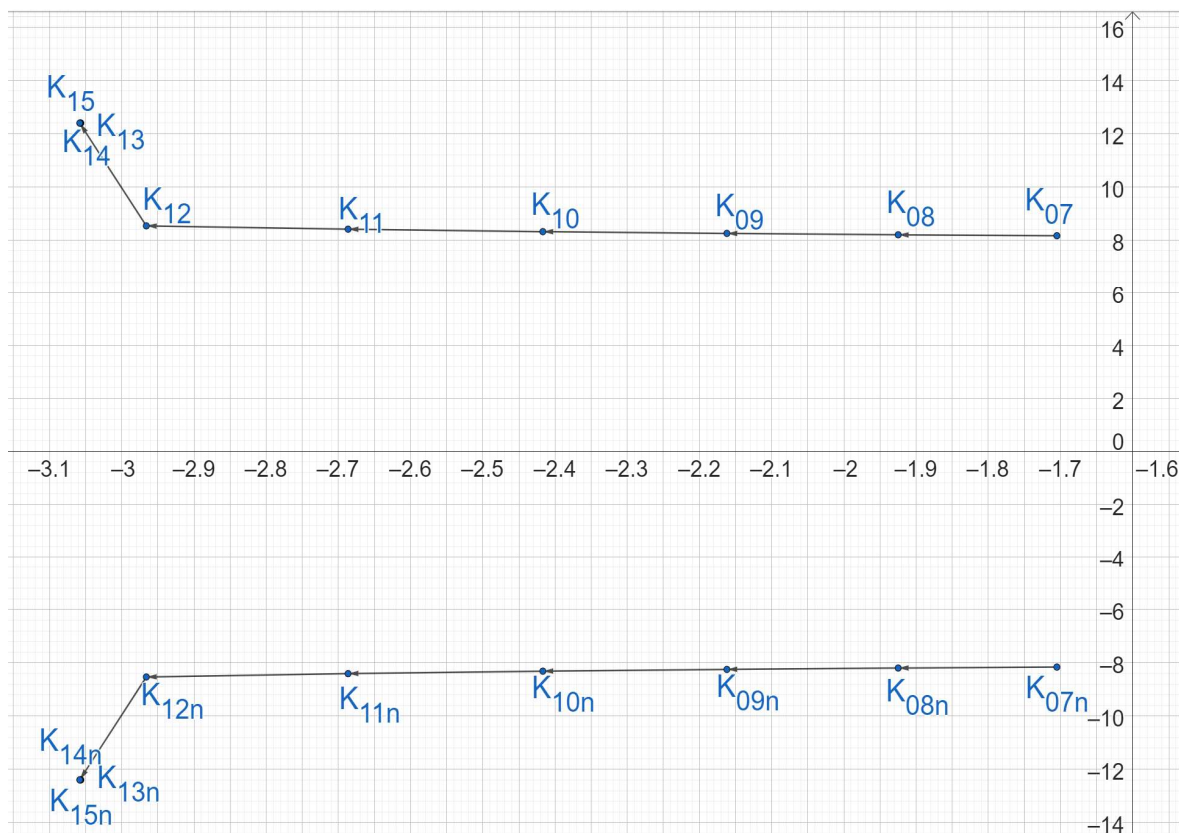
Slika 4.171 Težinska funkcija brzine generatora za gornji skup vrijednosti, scenarij 5

Zadnja slika, 4.172, dobivena na temelju tablice prikazuje ukupnu težinsku funkciju za sve vrijednosti pojačanja gornjeg skupa vrijednosti i tu se još jednom jasno uočava najveća vrijednost pri  $K = 12$ .



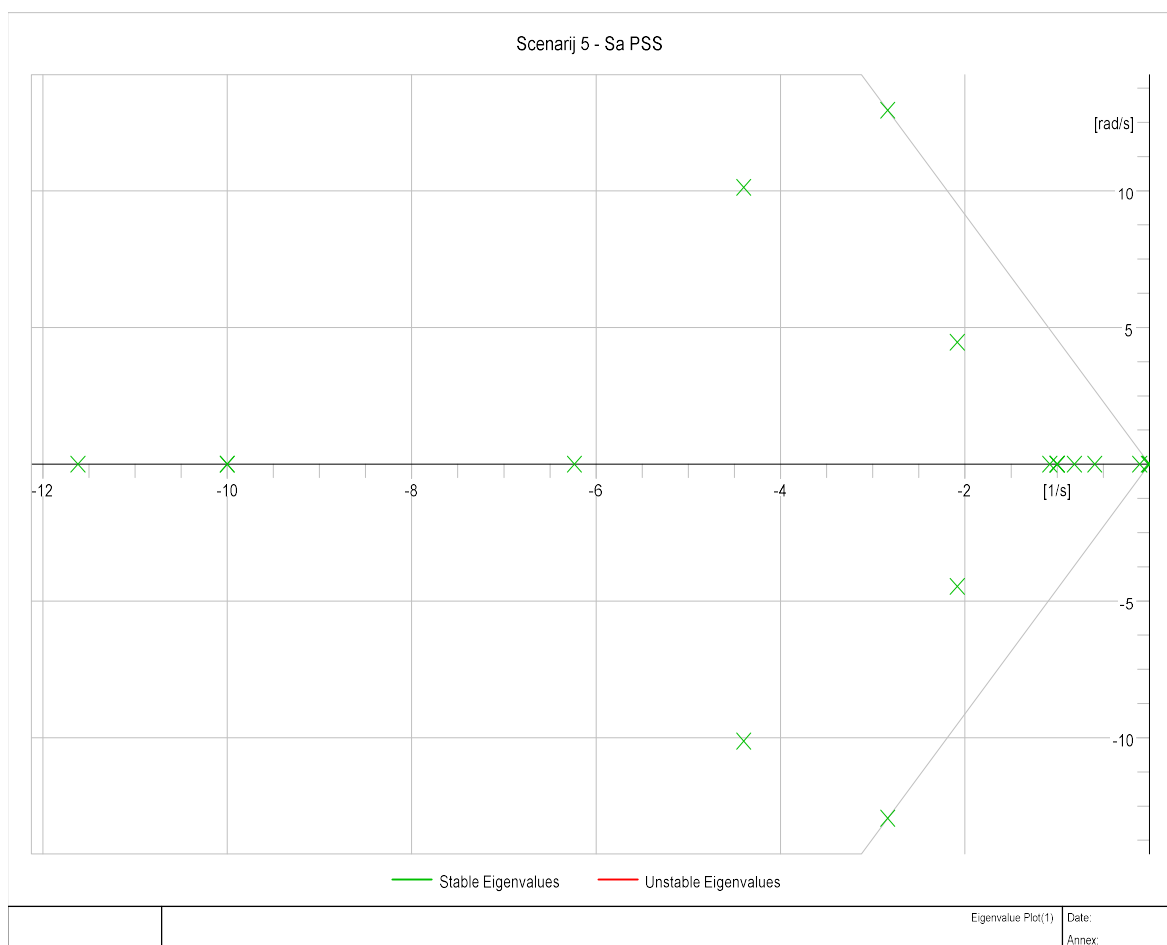
Slika 4.172 Ukupna težinska funkcija pri varijaciji pojačanja za gornji skup vrijednosti, scenarij 5

Slika 4.173 prikazuje položaj dominantnog pola pri svakoj iteraciji pojačanja, a jasno se uočava da će sa stajališta oscilatorne stabilnosti, najbolji utjecaj biti postignut pri pojačanju  $K = 15$ . Međutim, razlike između pojačanja 13-15 su jako male što će pri daljnjem povećanju pojačanja rezultirati vraćanjem polova nazad prema ishodištu te narušavanjem oscilatorne stabilnosti.



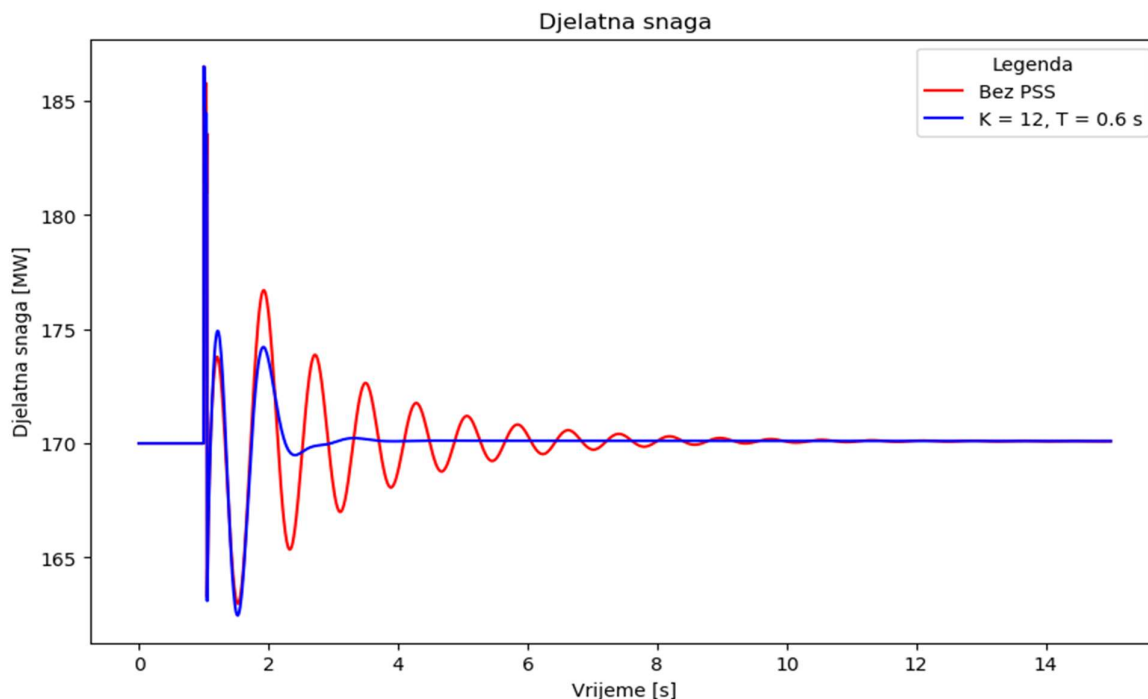
Slika 4.173 Položaj dominantnog pola pri povećanju pojačanja u mreži s visokim udjelom obnovljivih izvora energije, scenarij 5

Pri povećanju pojačanja se oscilatorni parovi dominantnih modova prigušuju i pomjeraju u lijevu polovicu kompleksne ravnine. Za vrijednost parametara koji pokazuju najbolje unaprjeđenje oscilatorne i tranzijentne stabilnosti se provodi konačna provjera u kompleksnoj frekvencijskoj i vremenskoj domeni. U kompleksnoj frekvencijskoj domeni se provodi modalna analiza čiji je rezultat krivulja mjesta korijena prikazana slikom 4.174. Uočava se manji broj oscilatornih modova, što je i očekivano budući da je dio generatora i pripadnih upravljačkih krugova isključen te nemaju utjecaja na oscilatornu stabilnost sustava.



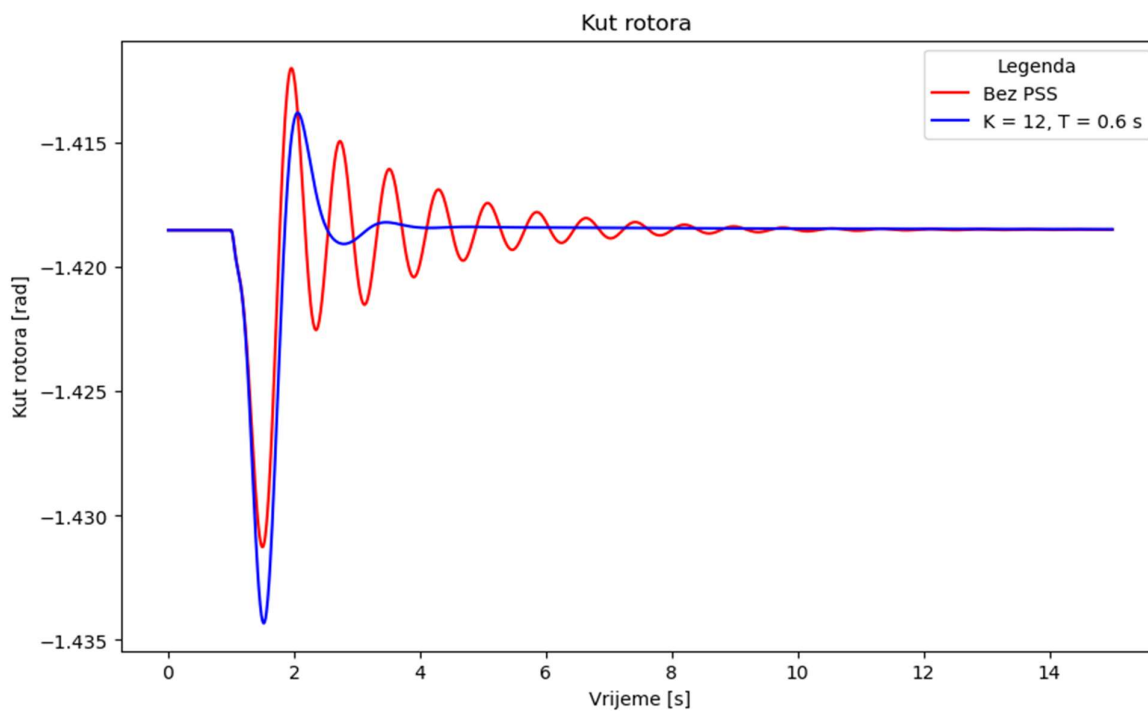
Slika 4.174 Krivulja mjesta korijena za sustav sa stabilizatorom elektromehaničkih oscilacija, scenarij 5

Usporedbom djelatne snage sa stabilizatorom i bez stabilizatora elektromehaničkih oscilacija (slika 4.175) se uočava da primjena stabilizatora dovodi do bržeg otklanjanja oscilacija u sustavu. Amplitude oscilacija su pri tome i znatno niže. Otklanjanje poremećaja traje otprilike 4 sekunde, u odnosu na desetak sekundi potrebnih za prigušenje oscilacija ukoliko nije implementiran stabilizator elektromehaničkih oscilacija.



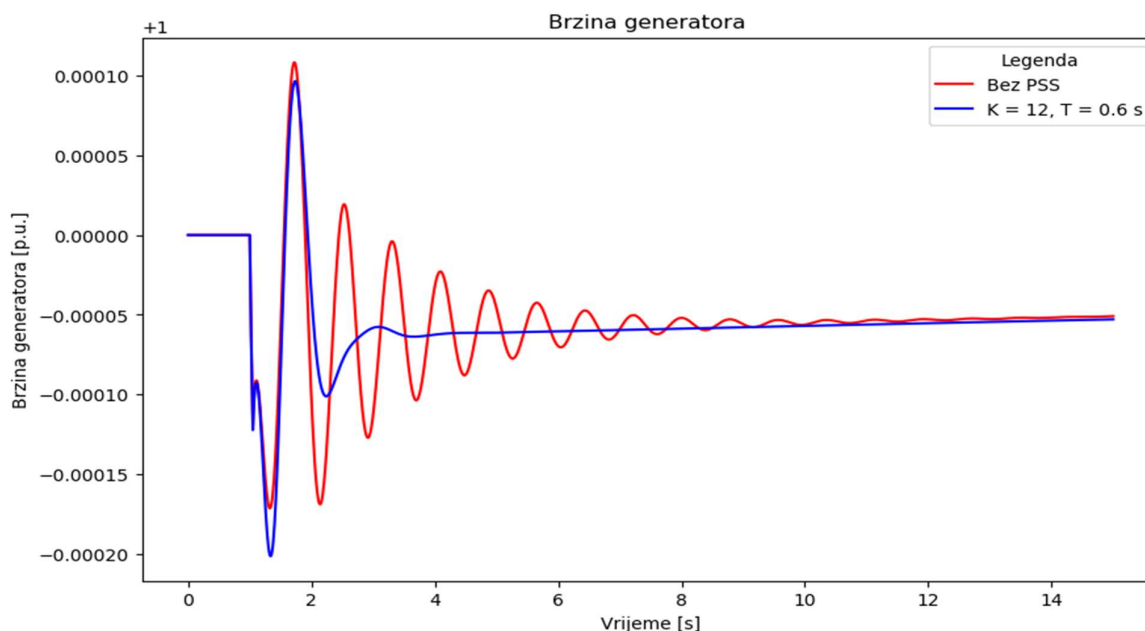
Slika 4.175 Usporedba odziva djelatne snage sa i bez stabilizatora elektromehaničkih oscilacija, scenarij 5

Kod kuta rotora je poboljšanje još i jasnije uočljivo, slika 4.176. Iako je prva oscilacija sa znatno višom amplitudom, dolazi samo do dvije značajne oscilacije te se nakon toga uspostavlja konačna vrijednost kuta rotora.



Slika 4.176 Usporedba odziva kuta rotora sa i bez stabilizatora elektromehaničkih oscilacija, scenarij 5

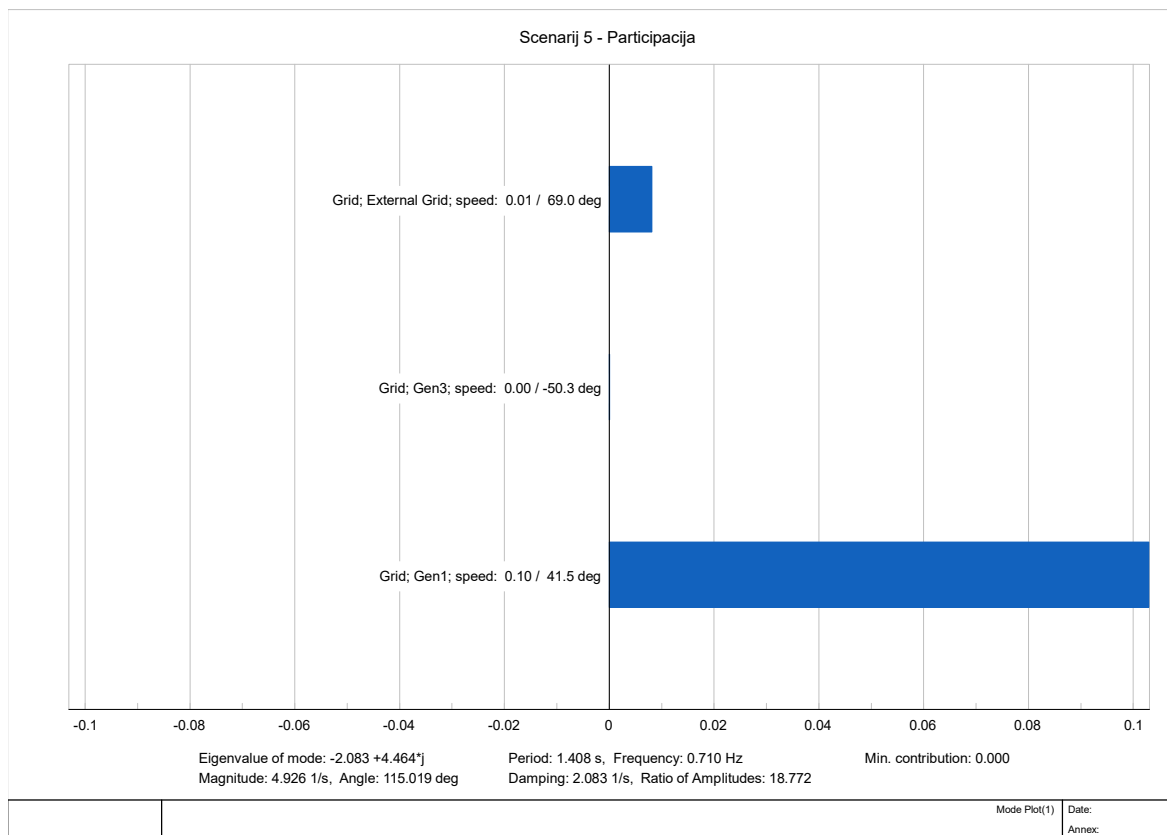
Brzina generatora se i sa primjenom stabilizatora ne vraća na vrijednost prije poremećaja, slika 4.177. Međutim, iako je ta vrijednost i nešto niža, oscilacije brzine su značajno manje te se oscilacije brzo prigušuju.



Slika 4.177 Usporedba odziva brzine generatora sa i bez stabilizatora elektromehaničkih oscilacija

Preostala analiza se nadovezuje na modalnu analizu, a to je participacijska analiza dominantnog moda. Rezultat je prikazan slikom 4.178 i iz njega se jasno vidi da unatoč primjeni stabilizatora elektromehaničkih oscilacija, novi dominantni mod je izazvan generatorom Gen1. Razlog za to leži, između ostaloga, i u tome što u sustavu rade samo dva sinkrona generatora, a unatoč značajnom smanjenju djelatne snage i promjeni radne točke, generator Gen1 i dalje isporučuje najveću snagu u sustav od svih generatora.

Analitička metoda parametriranja stabilizatora elektromehaničkih oscilacija primijenjena na mrežu s visokim udjelom obnovljivih izvora energije ukazuje na to da se bez obzira na konfiguraciju i radnu točku generatora dobiju vrijednosti približno jednake za svaki razmatrani slučaj. Metoda je primjenjiva i u sustavu koji ima jako veliki udio obnovljivih izvora energije, kao što je to u Scenariju 5. Vrijednosti parametara u velikoj mjeri određuje upravo najveći generator u mreži, a to je u ovom slučaju bio generator Gen1. Isključivanjem određenog dijela generatora smanjena je inercija u sustavu što je izazvalo izobličenja i skokovite promjene djelatne snage u sustavu kratko nakon poremećaja. Primjenom stabilizatora elektromehaničkih oscilacija odstupanja nastala pri tome se mogu svesti na što manju mjeru, a što je posebno pogodno pri smanjenju djelatne snage koja ima gotovo trenutno skokovito povećanje kratko nakon poremećaja.



*Slika 4.178 Participacijska analiza dominantnog moda, scenarij 5*

## 4.9 Scenarij 6 - Primjena metoda mekog računarstva u sustavu s velikim udjelom obnovljivih izvora energije

U scenariju 6 konfiguracija sustava je identična kao i za scenarij 5. Odabir parametara se vrši metodama roja čestica, genetskog algoritma, simuliranog kaljenja i tabu pretraživanja. Postavke i ograničenja svake od navedenih metoda su iste kao u scenarijima 2 i 4. Početno ograničenje za svaki od njih je pojačanje  $K$  u rasponu od 1 do 50 te vremenska konstanta  $T$  u rasponu od 0.2 sekunde do 1.5 sekundi.

### 4.9.1 Metoda roja čestica

Za ovu metodu se razmatra pet različitih postavki početnog broja čestica, a rezultati su prikazani tablicom 4.44. Za svaku varijaciju se bilježi vrijeme potrebno za provođenje optimizacije i rezultat optimizacijske procedure. Prema rezultatima se vidi da se pri zadanim postavkama optimizacije (broj iteracija, početni rojevi čestica) kao rezultat dobiju vrijednosti čija su pojačanja jako velika kao i vremenske konstante. Iz svih dobivenih rezultata, za razmatranje se mogu uzeti rezultati za početne rojeve od 100 i 200 čestica. Preostale tri vrijednosti pri primjeni za stabilizator elektromehaničkih oscilacija će izazvati trajne oscilacije veličina u vremenskoj domeni, a u kompleksnoj

frekvencijskoj će dovesti do nedovoljnog prigušenja ili čak nestabilnih oscilatornih modova. Zbog toga se te vrijednosti odbacuju kao moguća rješenja.

Tablica 4.44 Rezultati metode optimizacije roja čestica, scenarij 6

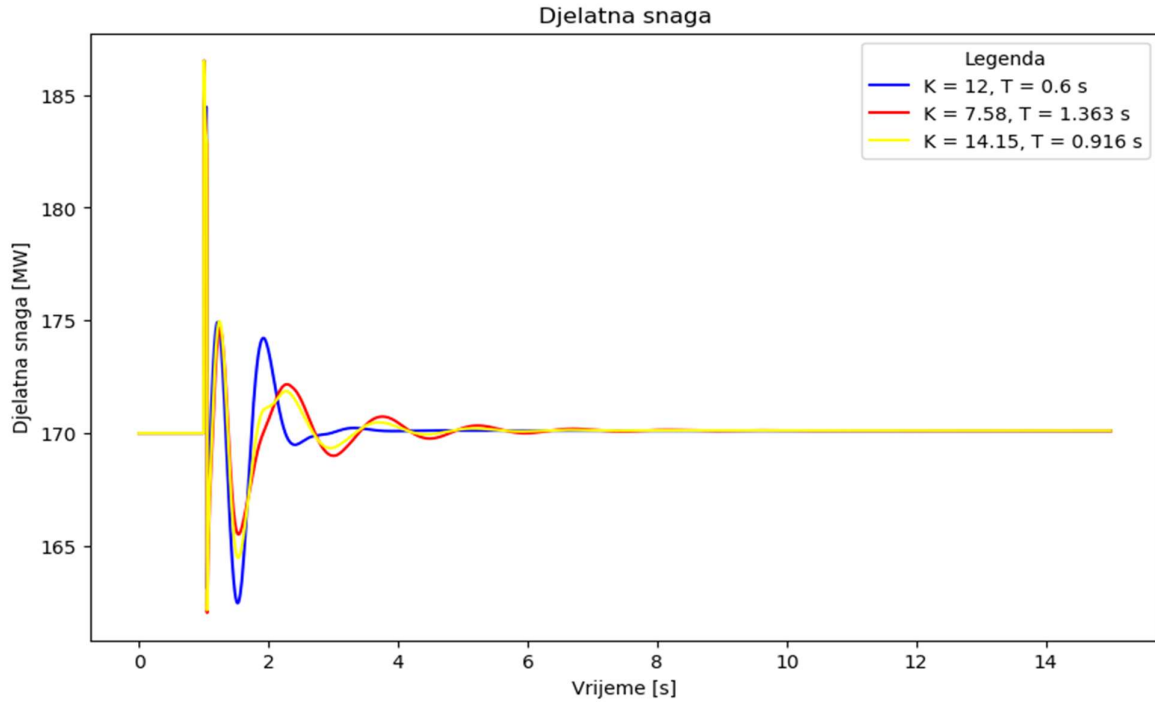
Broj iteracija	Početni roj	Pojačanje, $K$	Vremenska konstanta, $T$ [s]	Vrijeme optimizacija, $t$ [s]
1000	100	7.58	1.363	3.734
1000	200	14.15	0.916	6.275
1000	300	25.55	1.184	9.920
1000	400	47.03	1.263	14.845
1000	500	37.64	1.274	12.430

Za dva moguća rješenja se provodi modalna analiza čiji su rezultati svojstvene vrijednosti. Oscilatorni modovi koji odgovaraju lokalnom modu su navedeni tablicom 4.45. Iz rezultata se uočava da su svi oscilatorni modovi prigušeni te su navedeni svi modovi bliski lokalnom koji bi mogli stvarati probleme u sustavu.

Tablica 4.45 Oscilatorni modovi za parametre određene metodom roja čestica, scenarij 6

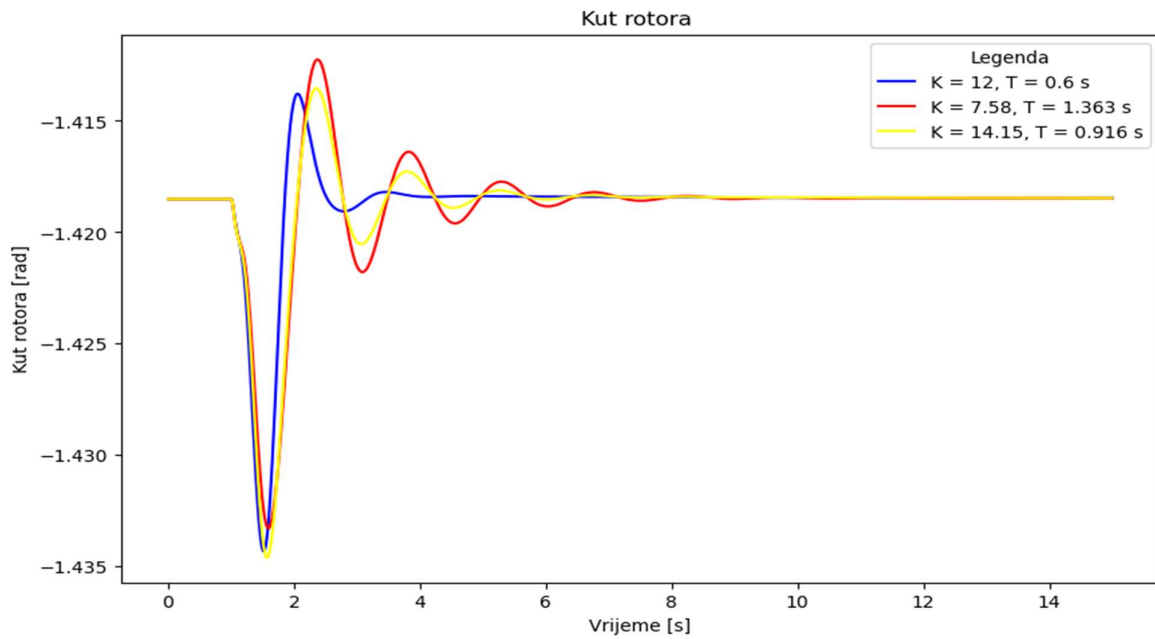
	$K = 7.58, T = 1.363$ s	$K = 14.15, T = 0.916$ s
1	-0.865908968 $\pm 4.403525461$	-1.142838076 $\pm 4.416517864$
2	-3.0613865 $\pm 12.37929959$	-3.06515076 $\pm 12.38024799$
3	-5.258343942 $\pm 15.97387158$	-5.413576711 $\pm 14.54935306$

Obje kombinacije parametara će povećati prigušenje u sustavu i dovesti do pomaka oscilatornih modova dalje od ishodišta kompleksne ravnine. Rezultat dobiven pri početnoj populaciji od 200 čestica će značajno bolje prigušiti dominantne polove, ali se u konačnici, kao i u prethodnim razmatranjima, odluka donosi na temelju vrijednosti funkcije cilja. Usporedba odziva dobivenih primjenom stabilizatora parametriranog analitičkom metodom (plava krivulja, parametri  $K = 12$  i vremenske konstanta  $T = 0.6$  s) i metodom roja čestica prikazana je slikama 4.179 do 4.181, pri čemu je slikom 4.179 prikazana djelatna snaga. Sa slike se može uočiti da obje vrijednosti dobivene optimizacijskom metodom smanjuju amplitudu oscilacija djelatne snage, ali se isto tako produljuje vrijeme prigušenja oscilacija.



Slika 4.179 Djelatna snaga za metodu roja čestica, scenarij 6

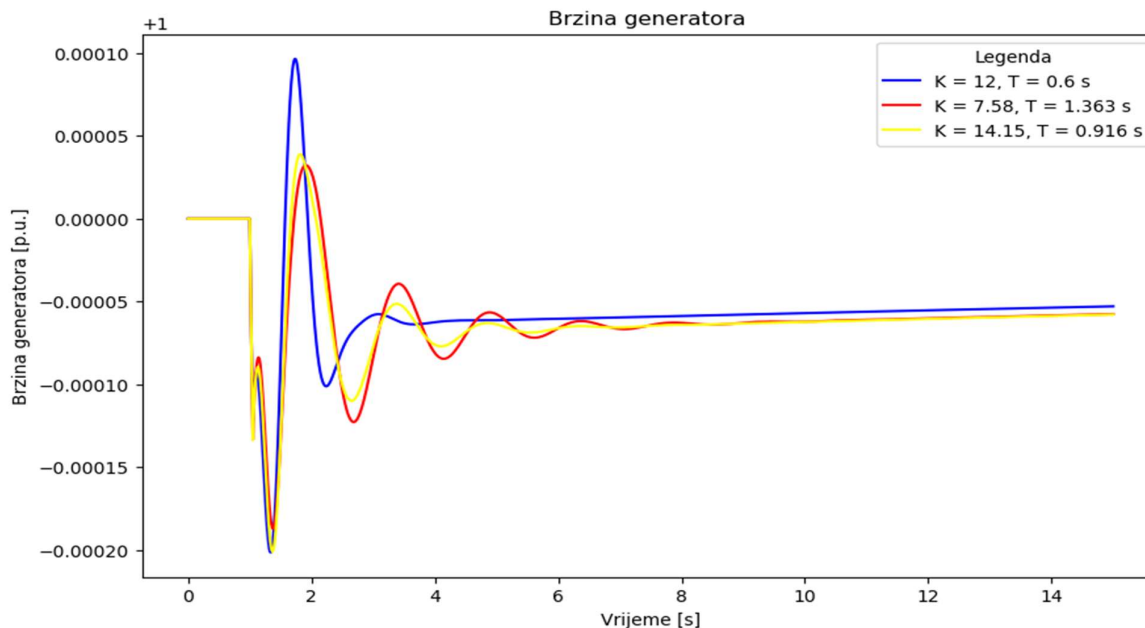
Kut rotora, slika 4.180, pak pokazuje znatno lošiju kvalitetu regulacije te se povećavaju i amplitude oscilacija kao i njihovo trajanje. Prema tome, jasno je da se analitička metoda u tom smislu pokazuje kao bolja.



Slika 4.180 Kut rotora za metodu roja čestica, scenarij 6



Brzina generatora prikazana je slikom 4.181 te se uočava da su oscilacije snage opet gotovo zane-marive. Međutim, i ovdje se unatoč tim malim razlikama može vidjeti da je analitička metoda brže dovela do smirivanja nastalih oscilacija. Pored toga, konačna vrijednost je nešto viša čime će se brže postići vrijednost prije poremećaja.



Slika 4.181 Brzina generatora za metodu roja čestica, scenarij 6

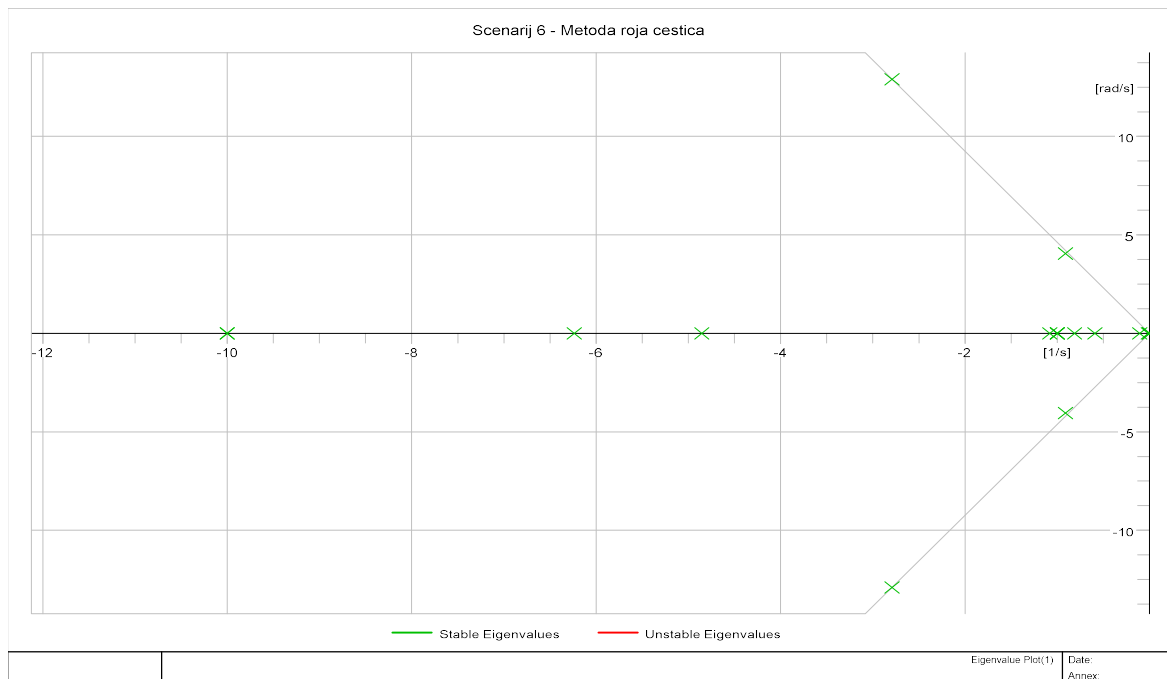
Prema slikama se može zaključiti da set parametara pri kojoj je pojačanje  $K = 14.15$  te vremenska konstanta  $T = 0.916$  sekundi rezultira manjim oscilacijama u odnosu na kombinaciju pri kojoj je pojačanje  $K = 7.58$  i vremenska konstanta  $T = 1.363$  sekunde. Oscilacije su izraženije zbog veće vremenske konstante koja je gotovo na gornjoj granici dozvoljene. Prema tome, može se zaključiti da je optimalna vrijednost pojačanja ispod 1 sekunde. Odluka o optimalnoj vrijednosti pojačanja i vremenske konstante se donosi na temelju vrijednosti funkcije cilja, koja je prikazana tablicom 4.46.

Tablica 4.46 Usporedba težinskih funkcija za različite parametre stabilizatora metode roja čestica, scenarij 6

Parametri	Početni broj čestica	Koeficijent prigušenja	Djelatna snaga	Kut rotora	Brzina generatora	Ukupno
$K = 7.58,$ $T = 1.363 \text{ s}$	100	0.192945	0.918436	0.996505	0.999993	3.107879
$K = 14.15,$ $T = 0.916 \text{ s}$	200	0.250513	0.914029	0.996349	0.999993	3.160885

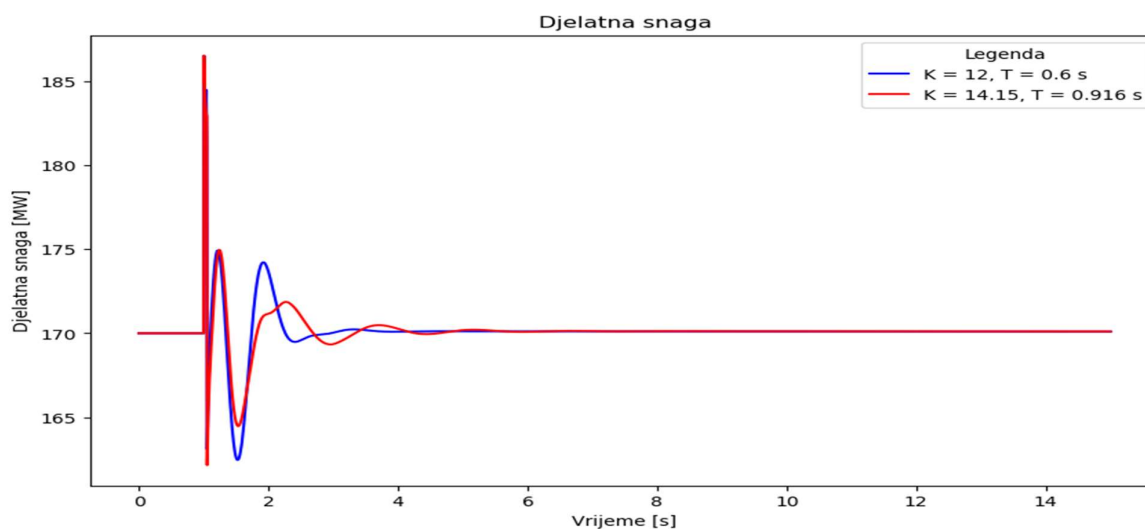
Vrijednost funkcije cilja potvrđuje da je optimalna vrijednost parametara pojačanje  $K = 14.15$  i vremenska konstanta  $T = 0.916$  sekundi. Za tu vrijednost, od svih dobivenih kombinacija za

različite početne populacije, dobije se najbolji kompromis između poboljšanja oscilatorne i tranzijentne stabilnosti. Za dobivenu kombinaciju, koeficijent prigušenja dominantnog pola je 0.2505. Polovi su u duboko u lijevoj polovici kompleksne ravnine te je slikom 4.182 prikazana krivulja mjesta korijena. Svi polovi su u lijevoj strani i sustav je stabilan.



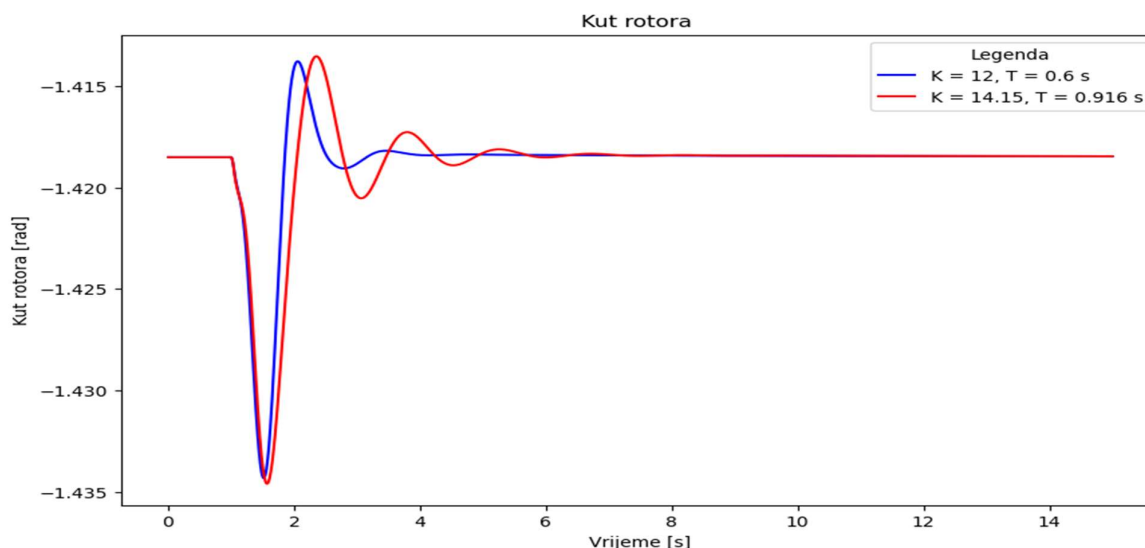
Slika 4.182 Krivulja mjesta korijena za metodu roja čestica, scenarij 6

Odzivi u vremenskoj domeni se uspoređuju s odzivom stabilizatora parametriranog analitičkom metodom. Djelatna snaga, prikazana slikom 4.183, ima značajno veću skokovitu promjenu kada se parametri stabilizatora elektromehaničkih oscilacija odabiru optimizacijskom metodom. Prednost je pak što su sve ostale oscilacije značajno manje amplitude.



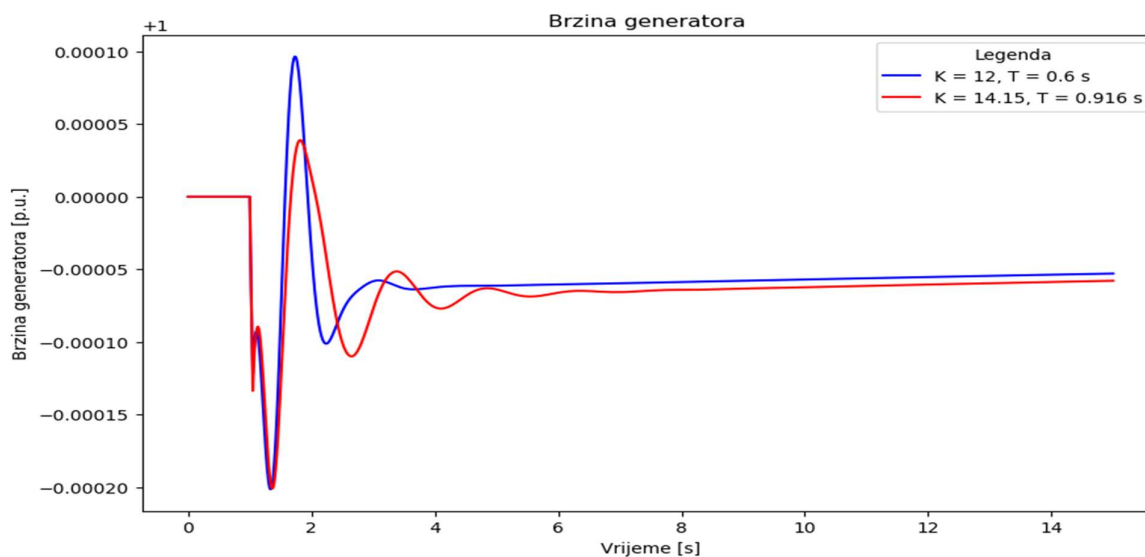
Slika 4.183 Usporedba djelatne snage za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom roja čestica, scenarij 6

Odziv kuta rotora na mali poremećaj je prikazan slikom 4.184. Stabilizatorom parametriranim analitičkom metodom se postiže brže otklanjanje posljedica poremećaja uz manje amplitude oscilacija.



Slika 4.184 Usporedba kuta rotora za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom roja čestica, scenarij 6

Brzina generatora se nakon poremećaja ne vraća na vrijednost koja je zabilježena prije pojave poremećaja (slika 4.185). Primjenom stabilizatora elektromehaničkih oscilacija koji je parametriran analitičkom metodom posljedice poremećaja u vidu oscilacija brzine se otklanjaju u roku tri do četiri sekunde iako povratak na ustaljenu vrijednost traje znatno duže. Ako je pak stabilizator parametriran optimizacijskom metodom, oscilacije su manje amplitude, ali duže traju.



Slika 4.185 Usporedba brzine generatora za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom roja čestica, scenarij 6

Analizom rezultata dobivenih metodom roja čestica se primjećuje da optimizacijskom metodom nije moguće dobiti rezultate koji će donijeti poboljšanje kvalitete odziva nakon poremećaja. Za skoro sve varijacije početnih uvjeta i početne populacije čestica rezultati se nalaze u području vrijednosti koje će rezultirati nestabilnošću. Rezultat koji se može uzeti kao optimalan u usporedbi s analitičkom metodom daje znatno lošiji odziv veličina u kompleksnoj frekvencijskoj i vremenskoj domeni čime se može zaključiti da analitička metoda daje bolji rezultat.

#### 4.9.2 Genetski algoritam

Druga optimizacijska metoda odabira parametara stabilizatora elektromehaničkih oscilacija je metoda genetskog algoritma. Kao i u scenarijima 2 i 4, optimizacija se provodi za 50, 100 i 200 generacija te 100, 200, 300, 400 i 500 jedinki početne populacije. Rezultati optimizacije su prikazani tablicom 4.47 skupa s vremenima potrebnim za provođenje optimizacije.

Iz tablice rezultata se mogu odbaciti sva rješenja koja će rezultirati lošim odzivom nakon poremećaja (izazvati će velike amplitude veličine ili uzrokovati trajnu nestabilnost). Vrijednosti koje se odbacuju su sve koje imaju kombinaciju velikog pojačanja i velike vremenske konstante.

Tablica 4.47 Rezultati genetskog algoritma za početna ograničenja, scenarij 6

Broj generacija	Broj populacije	Pojačanje, $K$	Vremenska konstanta, $T$ [s]	Vrijeme optimizacije, $t$ [s]
50	100	11.55	0.504	2.139
	200	4.31	1.119	4.313
	300	8.89	1.152	6.386
	400	29.65	0.506	8.647
	500	20.03	1.102	10.791
100	100	9.32	0.571	4.246
	200	32.09	1.454	8.510
	300	20.83	0.347	12.756
	400	27.61	0.978	17.146
	500	4.37	0.328	21.586
200	100	27.87	1.039	8.607
	200	10.08	0.836	17.071
	300	22.89	0.691	25.593
	400	13.23	0.214	34.473
	500	4.25	0.673	43.156

Velika vremenska konstanta će sigurno dovesti do većih odstupanja veličine. Za 50 generacija se odbacuje vrijednost pri 500 početnih jedinki, za 100 generacija se odbacuju rezultati za 200 i 400 jedinki te za 200 generacija se odbacuje rezultat za 100 jedinki. Svi prihvaćeni rezultati se dalje analiziraju provedbom modalne analize te analize u vremenskoj domeni. Rezultati modalne analize su prikazani tablicom 4.48 gdje su navedeni svi značajni oscilatorni modovi. Kao i u scenariju 5 te optimizaciji metodom čestica, uzimaju se u obzir i oscilatorni modovi koji su granično u grupi lokalnih modova, raspona frekvencija od 4 rad/s do 20 rad/s.

Tablica 4.48 Oscilatorni modovi stabilizatora parametriranih genetskim algoritmom, scenarij 6

	Mod 1	Mod 2	Mod 3
$K = 11.55,$ $T = 0.504 \text{ s}$	-1.92157305 $\pm 8.341659097$	-2.76365903 $\pm 4.280275019$	-3.0545375 $\pm 12.39158616$
$K = 4.31,$ $T = 1.119 \text{ s}$	-2.019315196 $\pm 5.102045568$	-3.059039056 $\pm 12.39338463$	-4.701590179 $\pm 8.57362117$
$K = 8.89,$ $T = 1.152 \text{ s}$	-1.06308258 $\pm 4.504952474$	-3.06472237 $\pm 12.38031885$	-5.6164707 $\pm 14.625142$
$K = 29.65,$ $T = 0.506 \text{ s}$	-1.84115687 $\pm 4.33962828$	-3.067443848 $\pm 12.39792084$	-4.540330465 $\pm 10.94685214$
$K = 9.32,$ $T = 0.571 \text{ s}$	-2.016640053 $\pm 8.256631536$	-2.783497479 $\pm 4.36602574$	-3.05474991 $\pm 12.39165442$
$K = 20.83,$ $T = 0.347 \text{ s}$	-1.584004485 $\pm 8.551108538$	-2.733862291 $\pm 4.028631372$	-3.053871291 $\pm 12.39118574$
$K = 4.37,$ $T = 0.328 \text{ s}$	-0.712774743 $\pm 8.111706314$	-3.00871154 $\pm 3.85084876$	-3.053630109 $\pm 12.389227$
$K = 10.08,$ $T = 0.836 \text{ s}$	-1.717917737 $\pm 4.76697183$	-3.064013863 $\pm 12.39396103$	-5.383416313 $\pm 10.40386731$
$K = 22.89,$ $T = 0.691 \text{ s}$	-1.340510107 $\pm 4.340344534$	-3.068722078 $\pm 12.38000581$	-5.237078852 $\pm 13.74945675$
$K = 13.23,$ $T = 0.214 \text{ s}$	-0.736048119 $\pm 8.235471672$	-2.960192381 $\pm 3.794258088$	-3.053511789 $\pm 12.38932626$
$K = 4.25,$ $T = 0.673 \text{ s}$	-1.37999931 $\pm 8.071240681$	-2.986060305 $\pm 4.184624706$	-3.05421891 $\pm 12.39041717$

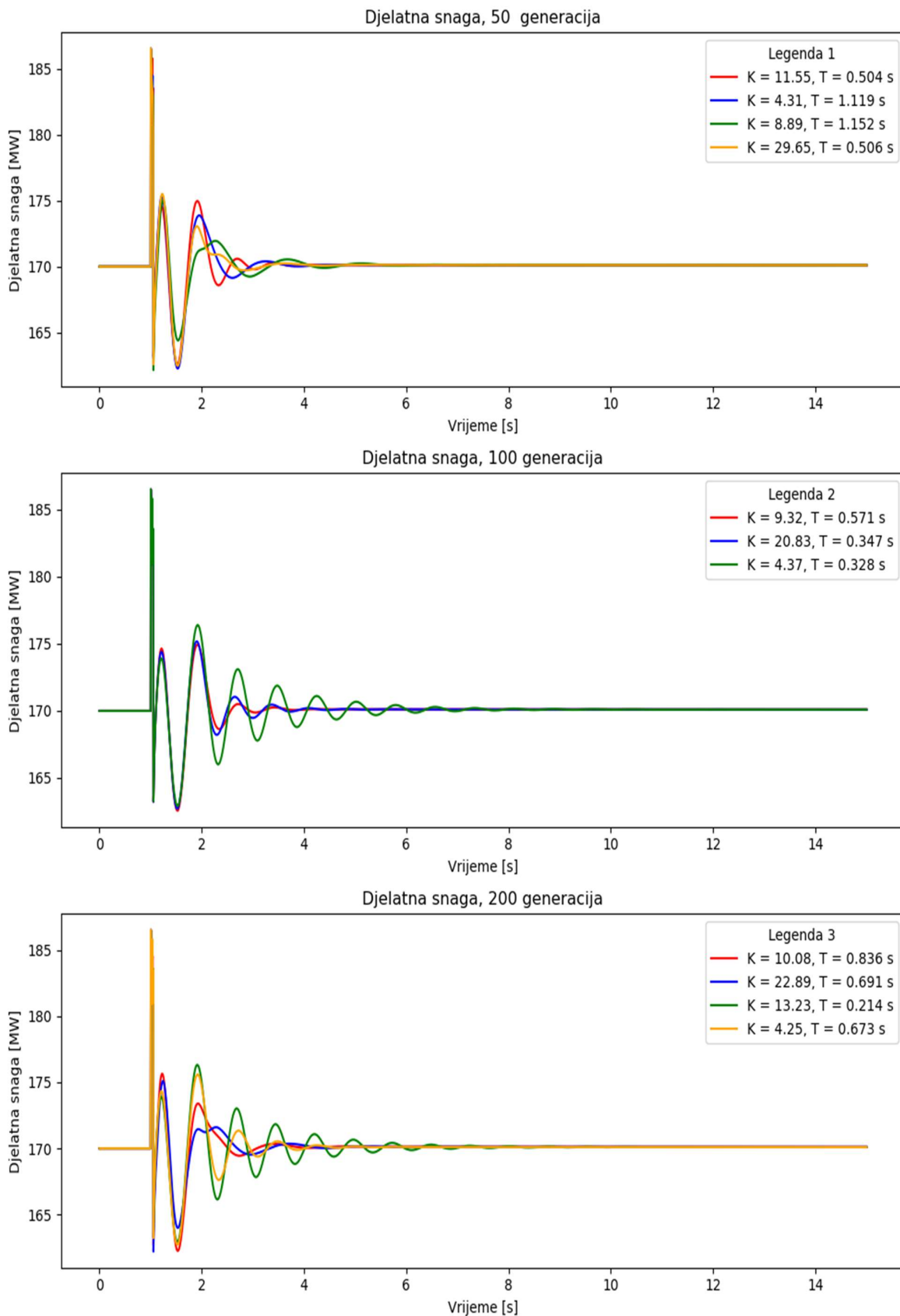
Postoje tri oscilatorna moda koji su u rasponu razmatranih frekvencija. Nijedan od razmatranih rezultata nije u desnoj polovici kompleksne ravnine te se stoga može prijeći na daljnju analizu u

vremenskoj domeni. Slikom 4.186 prikazana je djelatna snaga za sve razmatrane rezultate. Uočava se da manje vrijednosti vremenskih konstanti mogu produljiti vrijeme oporavka veličine nakon poremećaja ( primjer pojačanje  $K = 13.23$  i  $T = 0.214$  sekundi), kao i mala vrijednost pojačanja (primjer pojačanje  $K = 4.37$  i  $T = 0.328$  sekundi). Slikom 4.187 prikazan je kut rotora gdje se uočavaju iste zakonitosti, kao za djelatnu snagu, ali i brzinu generatora (slika 4.188). Iz navedenih oscilograma se vidi da su svi odzivi dobri, ali se iz serije dobivenih se treba odrediti najbolji. Kriterij je kao i do sada prema najvećoj vrijednosti funkcije cilja.

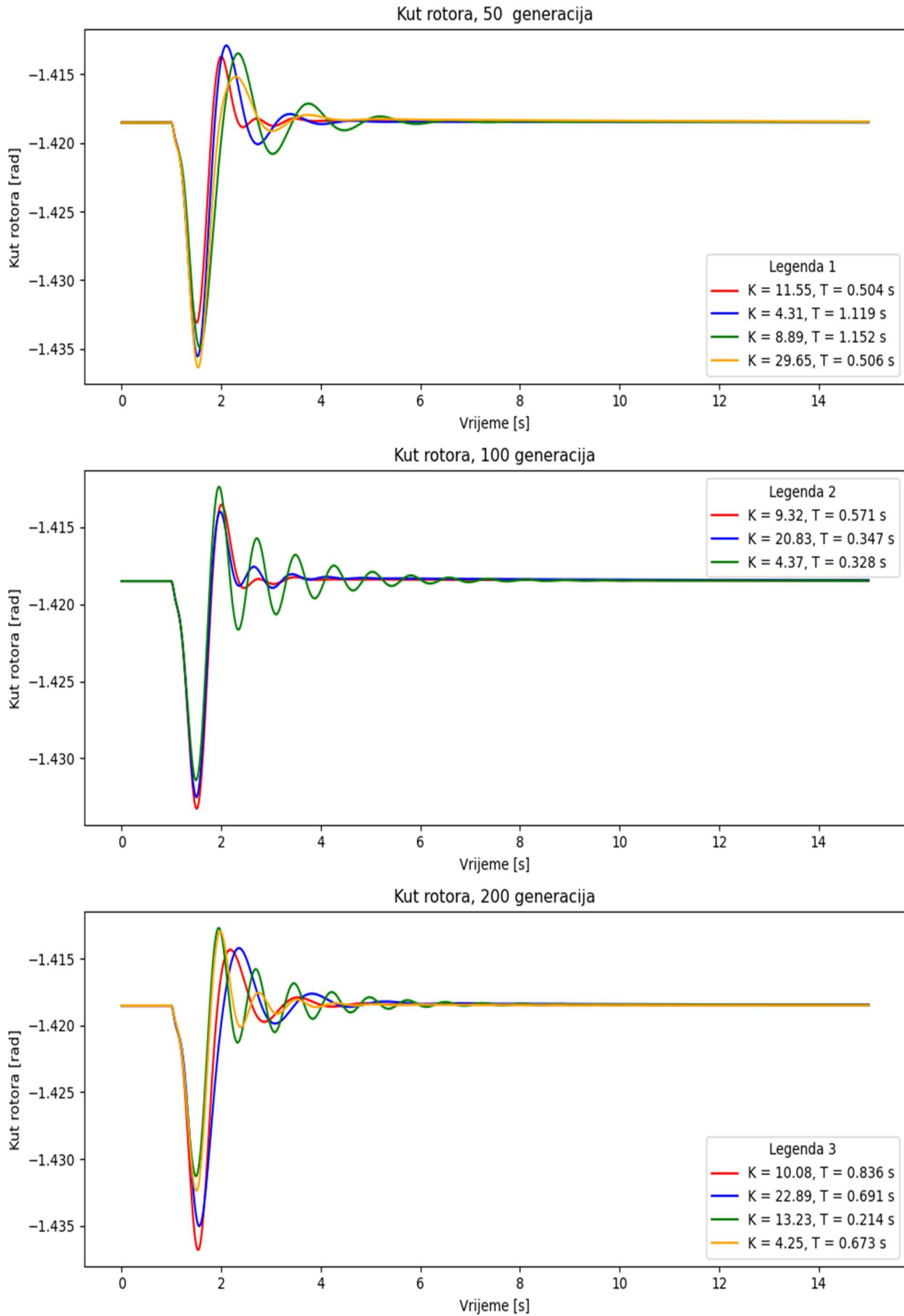
Sve vrijednosti funkcija cilja, prikazane i po pojedinačnim komponentama su prikazane tablicom 4.49. Prema dobivenim vrijednostima se uočava da postoji nekoliko vrijednosti koje su međusobno bliske, ali se ipak kao konačno rješenje odbire rezultat pri kojemu je vrijednost pojačanja  $K = 29.65$  i vremenska konstanta  $T = 0.506$  s.

Tablica 4.49 Vrijednosti funkcije cilja za metodu genetskog algoritma, scenarij 6

Parametri	Koeficijent prigušenja	Djelatna snaga	Kut rotora	Brzina generatora	Ukupno
$K = 11.55, T = 0.504$ s	0.224479	0.889281	0.996554	0.999994	3.110309
$K = 4.31, T = 1.119$ s	0.368009	0.887528	0.994925	0.999994	3.250456
$K = 8.89, T = 1.152$ s	0.229673	0.911968	0.994457	0.999993	3.136091
$K = 29.65, T = 0.506$ s	0.390568	0.897248	0.999999	0.999993	3.287809
$K = 9.32, T = 0.571$ s	0.237270	0.888777	0.996458	0.999994	3.122499
$K = 20.83, T = 0.347$ s	0.182141	0.889409	0.996872	0.999995	3.068417
$K = 4.37, T = 0.328$ s	0.087533	0.859797	0.996956	0.999994	2.944279
$K = 10.08, T = 0.836$ s	0.339035	0.888397	0.994170	0.999993	3.221596
$K = 22.89, T = 0.691$ s	0.295095	0.911601	0.994638	0.999993	3.201327
$K = 13.23, T = 0.214$ s	0.089020	0.863201	0.997083	0.999994	2.949298
$K = 4.25, T = 0.673$ s	0.168532	0.882567	0.996799	0.999994	3.047892

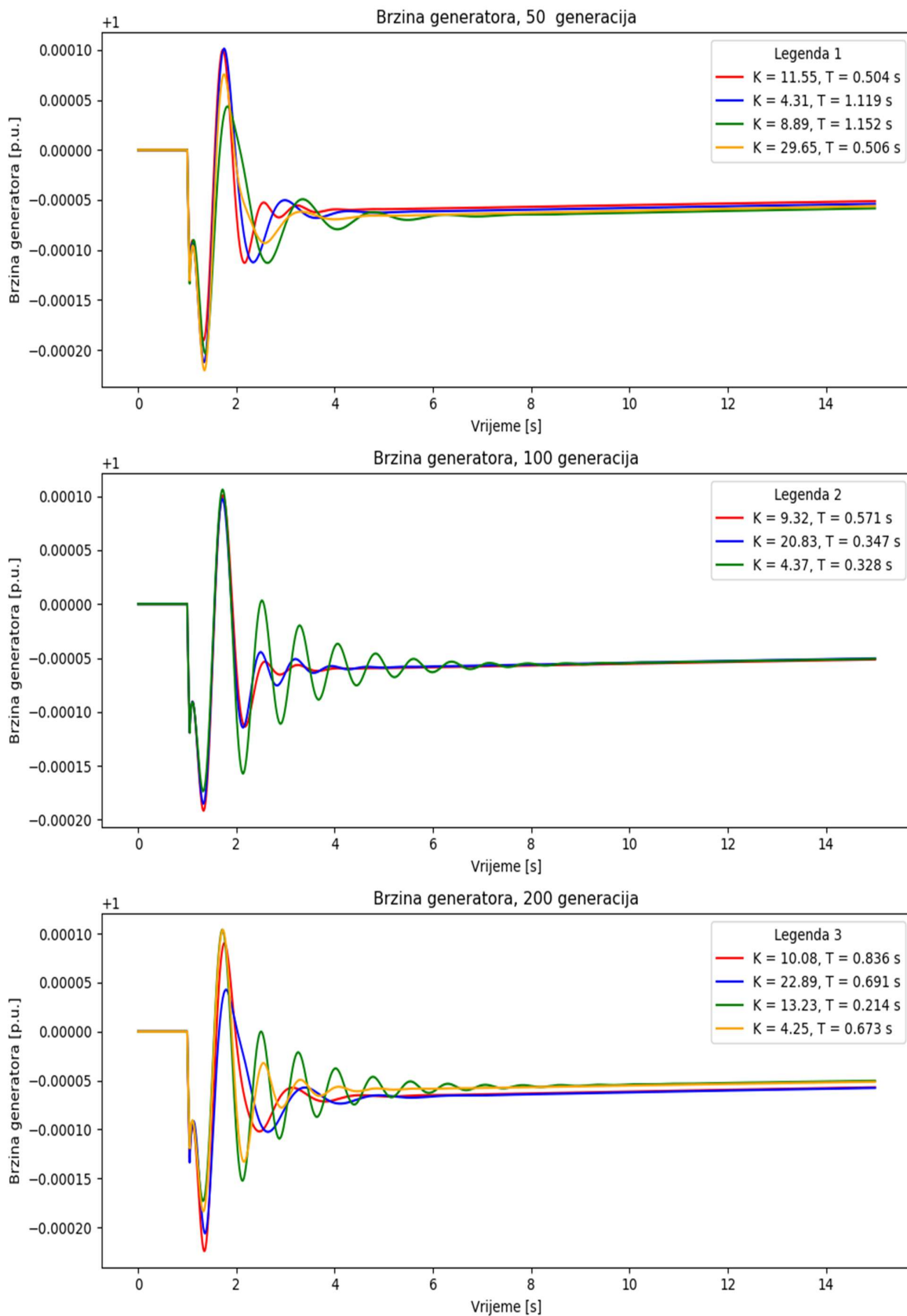


Slika 4.186 Djelatna snaga za metodu genetskog algoritma, scenarij 6



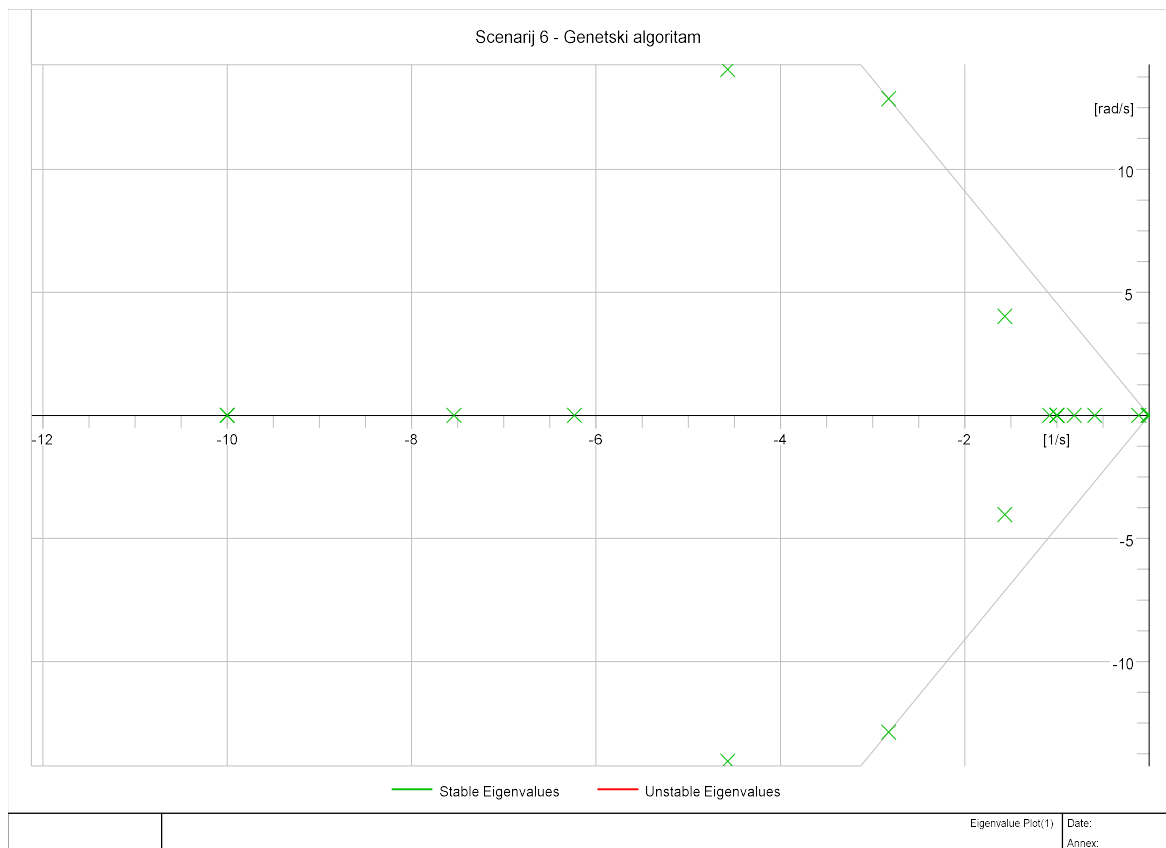
Slika 4.187 Kut rotora za metodu genetskog algoritma, scenarij 6





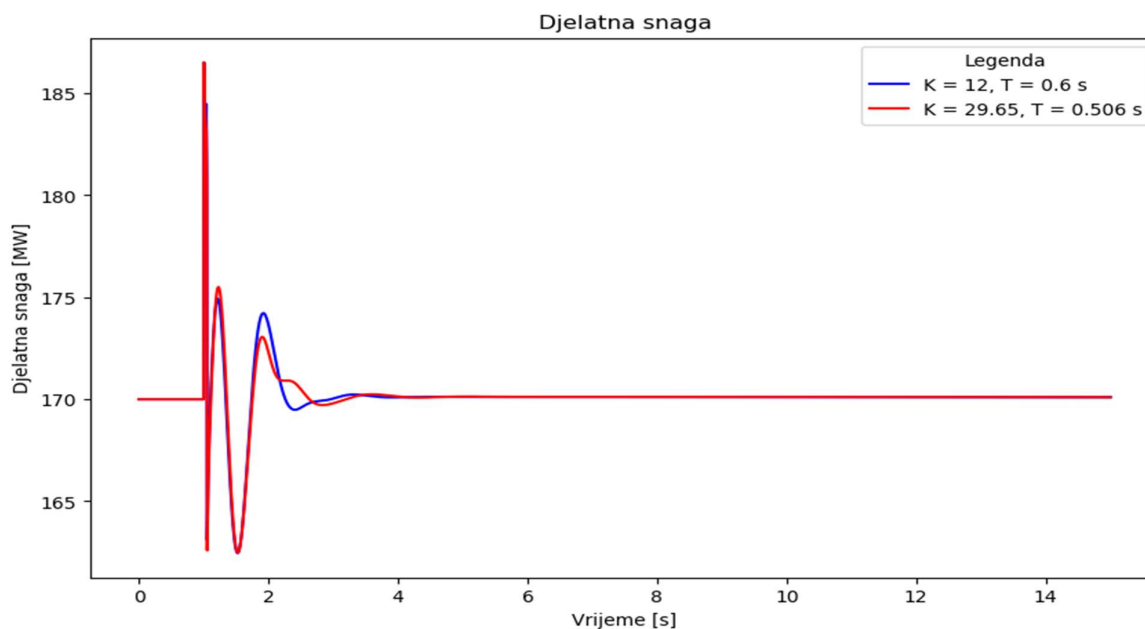
Slika 4.188 Brzina generatora za metodu genetskog algoritma, scenarij 6

Vrijednost težinske funkcije za optimalnu vrijednost iznosi oko 3.288 te se time postigao najveći kompromis između poboljšanja oscilatorne i tranzijentne stabilnosti. Od svih predloženih kombinacija pojačanja i vremenske konstante, za ovu vrijednost se postiže najveće prigušenje dominantnog moda, a iz rezultata modalne analize se na krivulji mjesta korijena (slika 4.189) vidi da su svi polovi u lijevoj polovici kompleksne ravnine te stabilni.



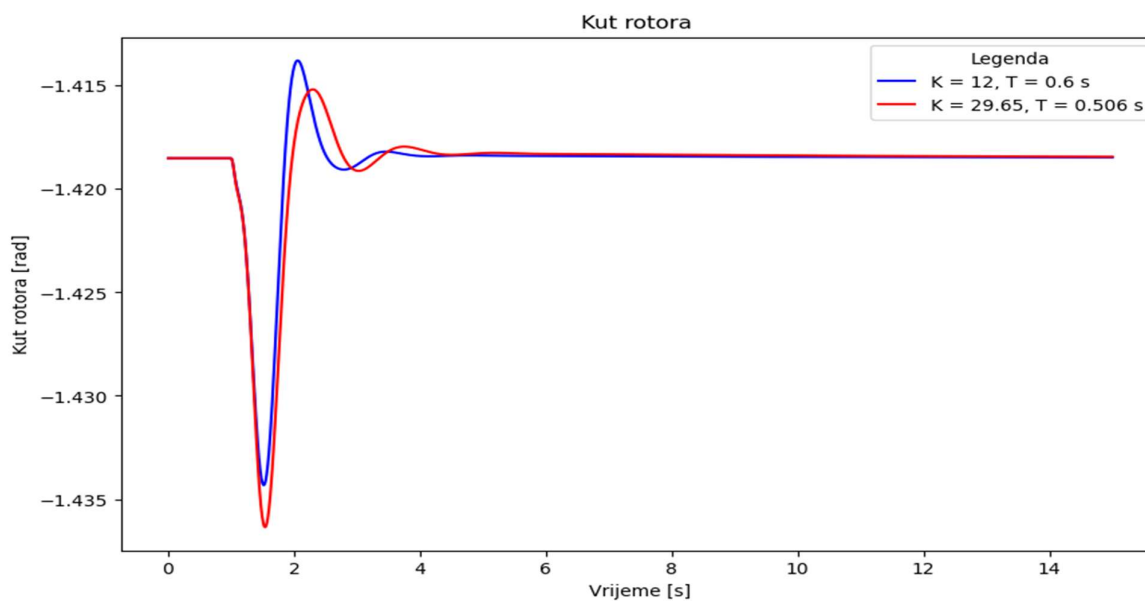
Slika 4.189 Krivulja mjesta korijena za metodu genetskog algoritma, scenarij 6

Slika 4.190 prikazuje usporedbu odziva djelatne snage nakon poremećaja za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom genetskog algoritma. Može se zaključiti da je skokovita promjena nakon poremećaja veće amplitude kod primjene stabilizatora čiji su parametri odabrani metodom genetskog algoritma. Preostali pokazatelji su vrlo slični, uključujući i vrijeme oporavka nakon poremećaja.



Slika 4.190 Usporedba djelatne snage za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom genetskog algoritma, scenarij 6

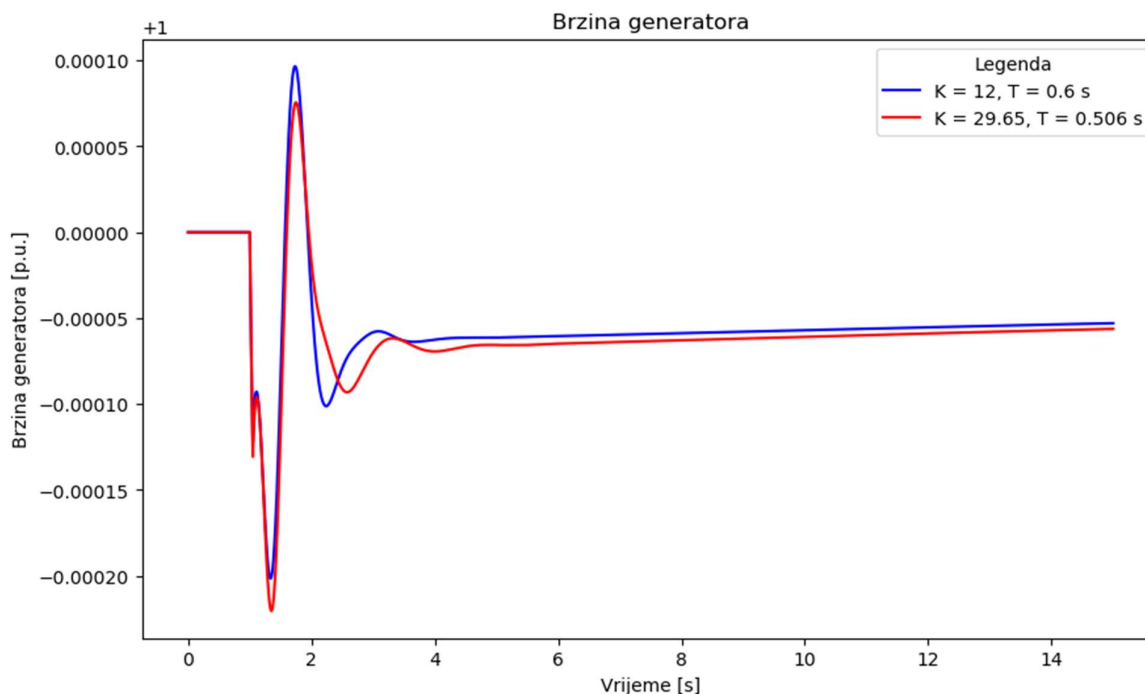
Odzivi kuta rotora za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom genetskog algoritma ima slične odzive, a prikazani su slikom 4.191. U prvom nadvišenju amplituda kuta uz stabilizator parametriran genetskim algoritmom je veća, ali u nastavku se smanjuje značajnije nego za stabilizator parametriran analitičkom metodom.



Slika 4.191 Usporedba kuta rotora za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom genetskog algoritma, scenarij 6

Za brzinu rotora se mogu uočiti iste pravilnosti odziva kao i za djelatnu snagu i kut rotora, a usporedba je prikazana slikom 4.192. Kao i za prethodne analize i kod metode genetskog algoritma se

vidi da u konačnici brzina generatora ima nižu vrijednost nego prije poremećaja s tendencijom porasta.



Slika 4.192 Usporedba brzine generatora za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom genetskog algoritma, scenarij 6

Metoda genetskog algoritma, od svih predloženih metodologija, pokazuje najširi opseg mogućih rješenja. Za male promjene broja generacija ili početnog broja jedinki se dobiju značajno različiti rezultati. Većina odziva povoljno utječe na oscilatornu i tranzijentnu stabilnost iako postoji određeni broj rješenja koja neće donijeti željeno poboljšanje i čak naprotiv, dovesti će do značajnog narušavanja oba vida stabilnosti. Stoga se kao zajednički zaključak za metodu genetskog algoritma i za sve moguće varijacije vremena trajanja poremećaja i konfiguracije mreže može naglasiti potreba za adekvatnim postavljanjem početnih uvjeta i ograničenja te po potrebi prilagodba ograničenja za razmatranu problematiku.

#### 4.9.3 Metoda simuliranog kaljenja

Kao i za prethodne optimizacijske metode, i metoda simuliranog kaljenja se provodi pod ranije definiranim početnim uvjetima i s istim ograničenjima. Analiza se provodi za početne temperature 500, 1000, 1500 i 2000 te za 1500 iteracija, a rezultati su prikazani tablicom 4.50. Odmah se može uočiti vrijednost dobivena pri pojačanju  $K = 47$  i s pripadnom vremenskom konstantom  $T = 0.627$  sekundi za koju se može zaključiti kako nije pogodna jer veliko pojačanje s umjereno velikom vremenskom konstantom izaziva nestabilnost te se navedena vrijednost isključuje iz analize.

Tablica 4.50 Rezultati simuliranog kaljenja, scenarij 6

Početna temperatura	Broj iteracija	$K$	$T$ [s]	Vrijeme [s]
500	1500	3	0.732	0.044
1000	1500	47	0.627	0.046
1500	1500	10	0.480	0.046
2000	1500	23	0.623	0.0312

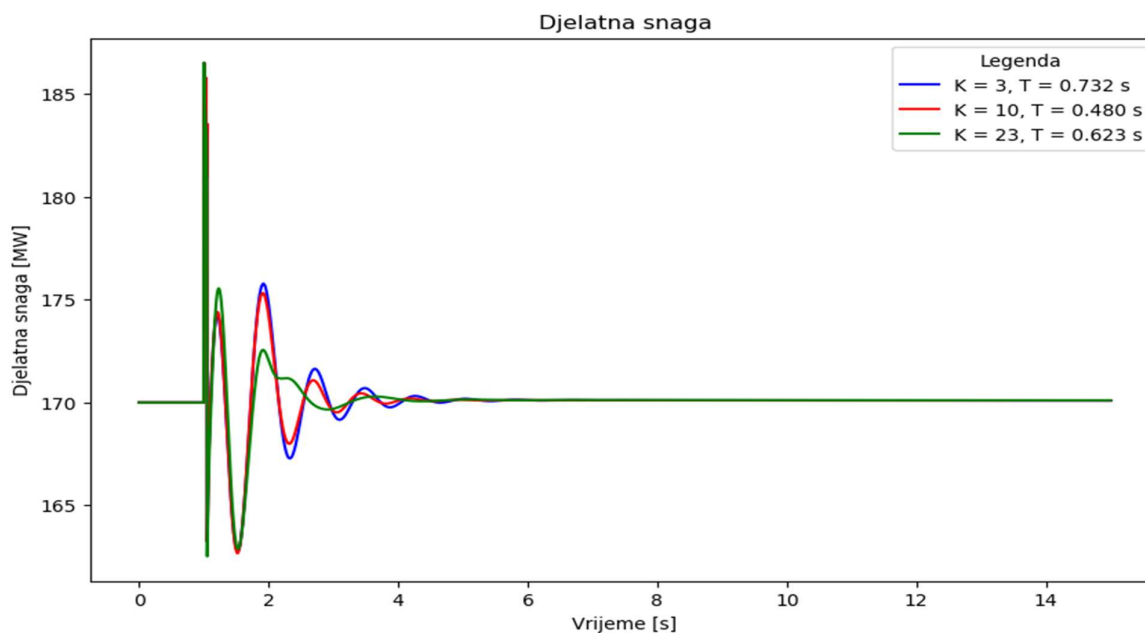
Za preostale tri vrijednosti provodi se detaljna analiza, modalna za ispitivanje oscilatorne stabilnosti i vremenske simulacije za tri veličine koje se promatraju u smislu tranzijentne stabilnosti. Rezultati modalne analize i pripadni oscilatorni modovi prikazani su tablicom 4.51.

Iz rezultata se zaključuje da povećanje pojačanja pomjera dominantni pol u lijevu stranu dok istovremeno ostale polove može pomjerati prema ishodištu te na taj način narušiti oscilatornu stabilnost. Međusobnom usporedbom dominantnih polova za tri kombinacije uočava se da će treći mod imati frekvenciju koja izlazi iz raspona lokanih modova, što je pokazatelj da je oscilatorna stabilnost poboljšana.

Tablica 4.51 Oscilatorni modovi za stabilizator parametriran metodom simuliranog kaljenja, scenarij 6

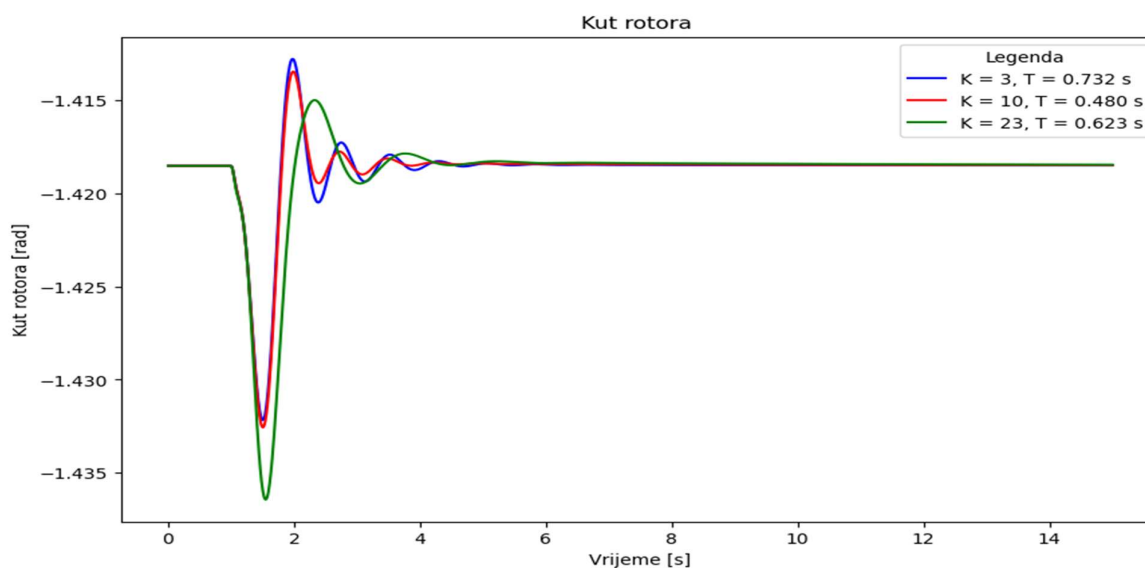
	$K = 3,$ $T = 0.732$ s	$K = 10,$ $T = 0.480$ s	$K = 23,$ $T = 0.623$ s
1	-1.219351698 $\pm 8.039648953$	-1.558956678 $\pm 8.270083154$	-1.58010331 $\pm 4.417524871$
2	-3.025857502 $\pm 4.125598447$	-2.851436725 $\pm 4.161290157$	-3.072183449 $\pm 12.38937739$
3	-3.054107976 $\pm 12.3901178$	-3.054173066 $\pm 12.39086975$	-5.186495528 $\pm 12.14215593$

Analiza u vremenskoj domeni je prikazana slikama 4.193 do 4.195. Slikom 4.193 prikazana je djelatna snaga, a uočava se da je najkraće vrijeme, otprilike četiri sekunde, otklanjanja posljedica poremećaja pri pojačanju  $K = 23$  i vremenskoj konstanti  $T = 0.623$  sekunde. Nedostatak u odnosu na ostale razmatrane vrijednosti je veća vrijednost tik nakon poremećaja u vidu skokovite promjene. Ostale vrijednosti imaju nešto nižu vrijednost, ali također imaju i veće amplitude oscilacija prije postizanja ustaljene vrijednosti, za što je potrebno oko pet sekundi.



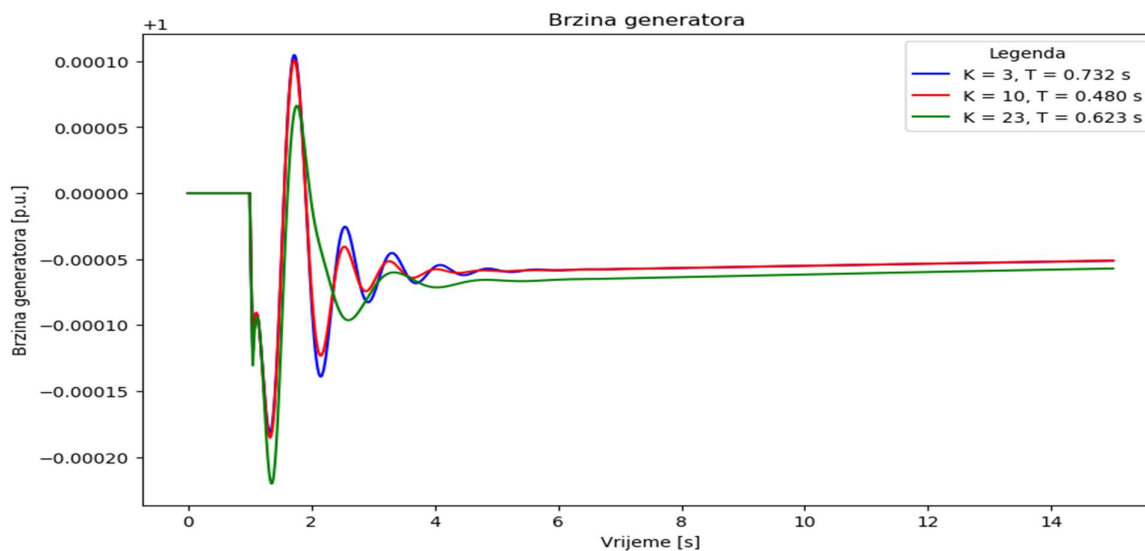
Slika 4.193 Djelatna snaga za metodu simuliranog kaljenja, scenarij 6

Slika 4.194 prikazuje odzive kuta rotora za različite vrijednosti parametara stabilizatora elektromehaničkih oscilacija. Najveća amplituda prvog nadvišenja je za pojačanje  $K = 23$ , a smirivanje oscilacija traje otprilike kao i za sve ostale stabilizatore.



Slika 4.194 Kut rotora za metodu simuliranog kaljenja, scenarij 6

Brzina generatora je prikazana slikom 4.195. Odzivi stabilizatora parametriranih s pojačanjima  $K = 3$  i  $K = 10$  daju slične odzive. Najmanje amplitude oscilacija su pri pojačanju  $K = 10$ , a konačne vrijednosti brzine su približno jednake za te dvije vrijednosti. Stabilizator parametriran s pojačanjem  $K = 23$  daje odziv koji ima velike oscilacije i nešto nižu vrijednost brzine nakon prigušenja oscilacija.



Slika 4.195 Brzina generatora za metodu simuliranog kaljenja, scenarij 6

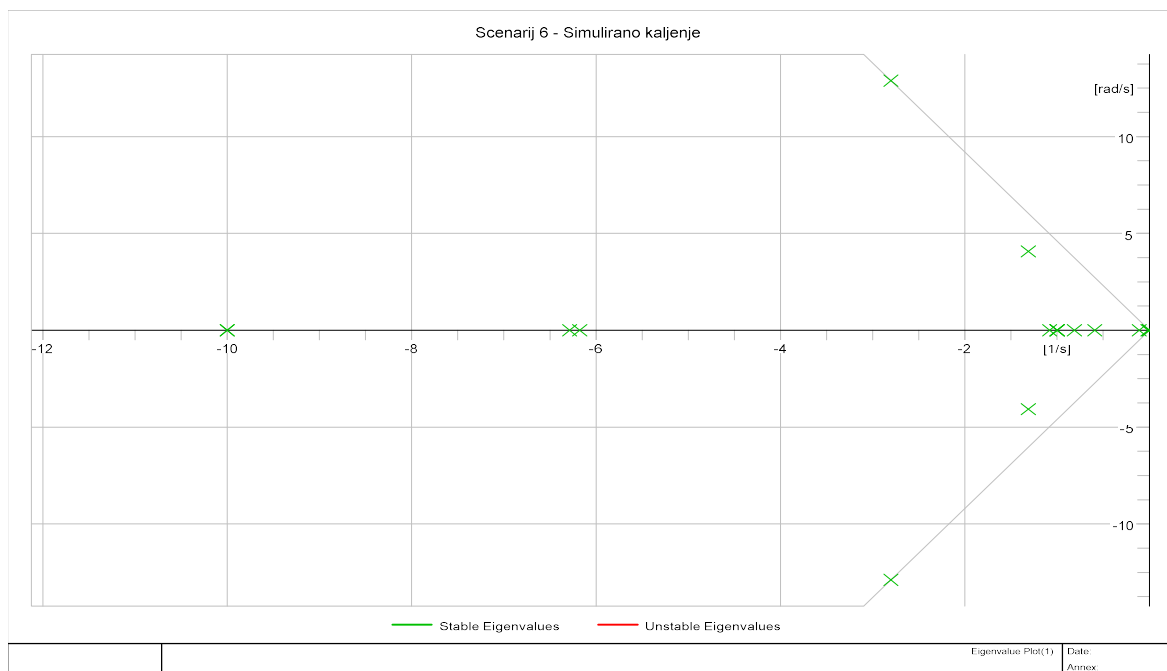
Sve tri razmatrane veličine ukazuju na to da dobivene i analizirane vrijednosti pojačanja i vremenske konstante dovode do poboljšanja oscilatorne i tranzijentne stabilnosti i bilo koja od tih vrijednosti će ih poboljšati. Za kraj, kako bi se među tim vrijednostima odabrala optimalna, uspoređuju se vrijednosti funkcije cilja, tablica 4.52.

Tablica 4.52 Vrijednosti funkcije cilja za stabilizatore parametrirane metodom simuliranog kaljenja,  $t = 250$  ms

Parametri	Koeficijent prigušenja	Djelatna snaga	Kut rotora	Brzina generatora	Ukupno
$K = 3,$ $T = 0.732$ s	0.149952	0.879599	0.996861	0.999994	3.026407
$K = 10,$ $T = 0.480$ s	0.185243	0.886473	0.996791	0.999994	3.068502
$K = 23,$ $T = 0.623$ s	0.336793	0.901309	0.994196	0.999993	3.232292

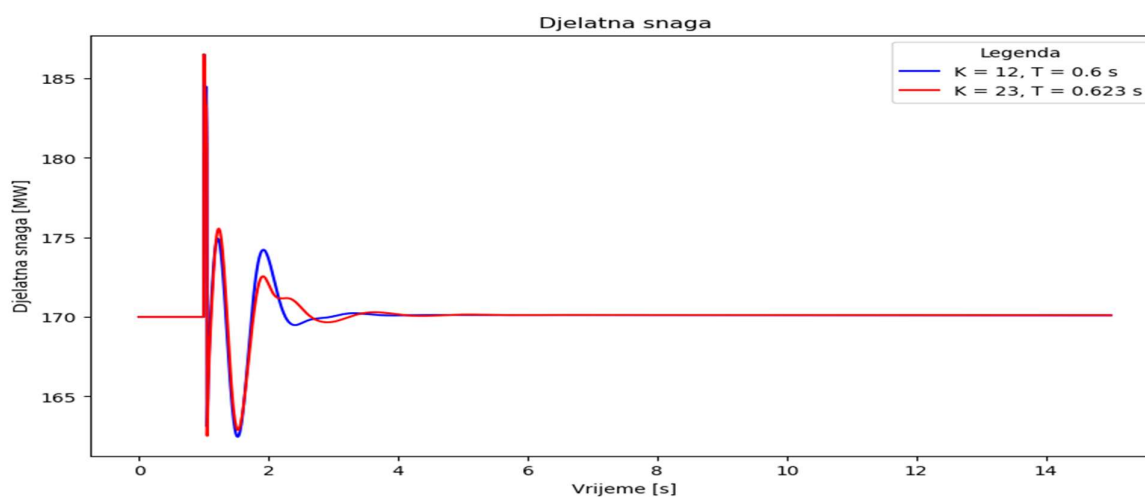
Iz tablice 4.52 se očitava najveća vrijednost funkcije cilja, koja iznosi 3.2323 i dobije se za parametre pojačanje  $K = 23$  i vremensku konstantu  $T = 0.623$  sekunde. Za navedenu vrijednost je najveći koeficijent prigušenja, odnosno najveće je poboljšanje oscilatorne stabilnosti u odnosu na tri razmatrane kombinacije. Također, odziv u vremenskoj domeni za djelatnu snagu ukazuje na najmanje odstupanje u odnosu na vrijednost djelatne snage prije poremećaja, a koji je i najrelevantniji budući da se radi o najvećim odstupanjima veličine. Krivulja mjesta korijena, kao rezultat i pokazatelj iz kompleksne frekvencijske domene je prikazan slikom 4.196. Sustav je stabilan, dominantni mod je u lijevoj polovici i sa frekvencijom od oko 4 rad/s na granici lokalnog moda. Daljnje

povećanje prigušenja ili povećanje vremenske konstante bi moglo dovesti do njegovog približavanja kompleksnoj osi i pogoršanja pokazatelja oscilatorne stabilnosti.



Slika 4.196 Krivulja mjesta korijena za metodu simuliranog kaljenja, scenarij 6

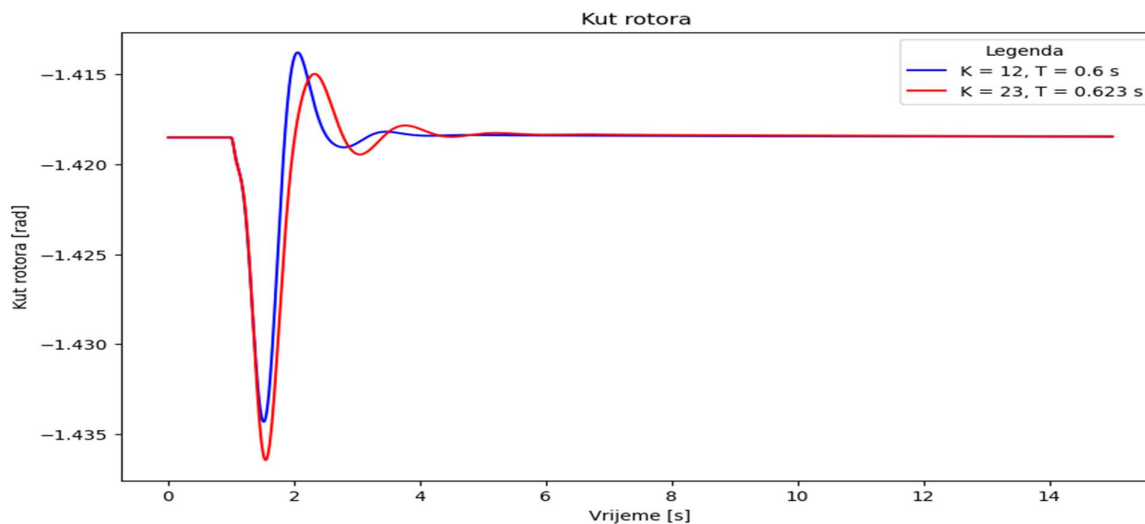
Usporedba djelatne snage za stabilizator parametriran analitičkom i metodom simuliranog kaljenja prikazana je slikom 4.197. Osim veće vrijednosti pri skokovitoj promjeni nakon poremećaja, ne postoji značajnija razlika u amplitudi oscilacija djelatne snage ili vremenu prigušenja oscilacija čime se može zaključiti da se analitičkom metodom kao i metodom simuliranog kaljenja dobije poboljšanje tranzijentne stabilnosti.



Slika 4.197 Usporedba djelatne snage pri primjeni stabilizatora parametriranog analitičkom metodom i metodom simuliranog kaljenja, scenarij 6

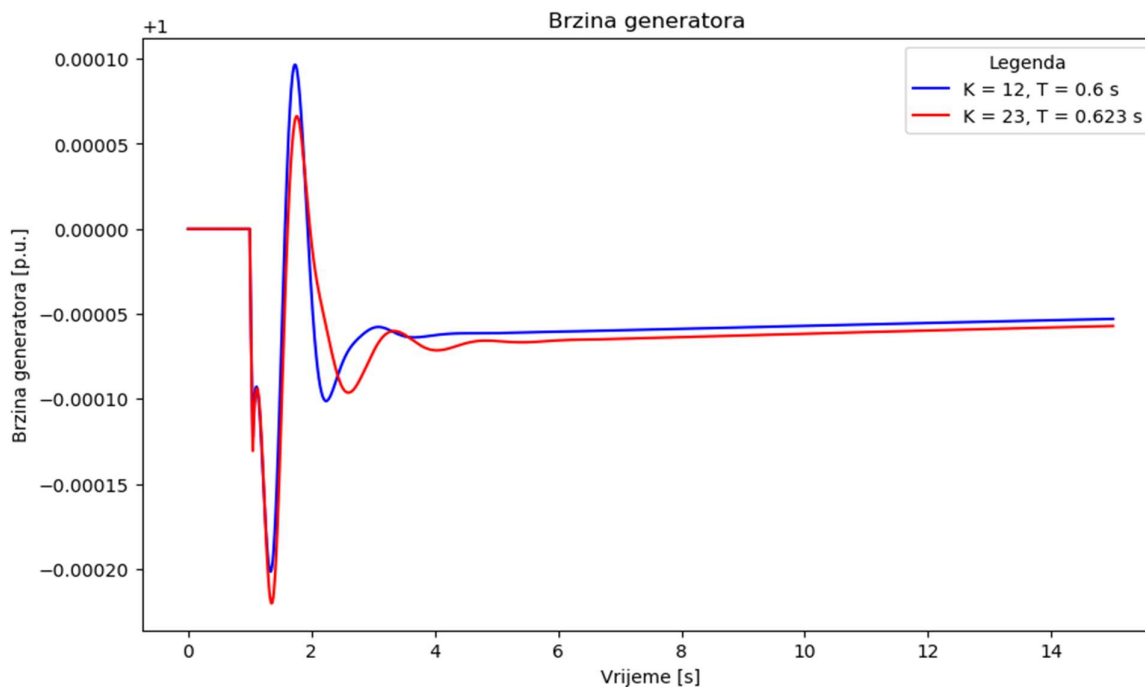


Slika 4.198 prikazuje usporedbu odziva kuta rotora za stabilizator parametriran analitičkom metodom sa odzivom dobivenim primjenom stabilizatora parametriranog metodom simuliranog kaljenja. Stabilizator parametriran analitičkom metodom ima kraće vrijeme ustaljivanja što se može uzeti kao prednost metode.



Slika 4.198 Usporedba kuta rotora pri primjeni stabilizatora parametriranog analitičkom metodom i metodom simuliranog kaljenja, scenarij 6

Brzina generatora se u oba slučaja ne vraća na vrijednost koja je vladala prije poremećaja. Slika 4.199 pokazuje usporedbu brzine za oba stabilizatora, a iako je amplituda nadvišenja niža za stabilizator parametriran metodom simuliranog kaljenja, brzina nakon poremećaja je nešto niža.



Slika 4.199 Usporedba brzine generatora pri primjeni stabilizatora parametriranog analitičkom metodom i metodom simuliranog kaljenja, scenarij 6

Metoda simuliranog kaljenja ima značajnu prednost u odnosu na ostale metode koja se ogleda u znatno kraćem vremenu trajanja optimizacijskog procesa. Vrijednosti koje se dobiju su bliske vrijednosti dobivenoj analitičkom metodom. Također, značajna prednost je što su vrijednosti dobivenih vremenskih konstanti jako bliske međusobno, kao i vrijednosti dobivenoj analitičkom metodom što ukazuje da se dobivena vrijednost može sa velikom sigurnošću uzeti kao optimum.

#### 4.9.4 Tabu pretraživanje

Posljednja optimizacijska metoda koja se analizira je metoda tabu pretraživanja. Postavke i početni uvjeti su isti kao i za prethodne scenarije se te opet analiziraju četiri slučaja, za 500, 1000, 1500 i 2000 iteracija. Rezultati su prikazani tablicom 4.53 i dobivene su četiri vrijednosti od kojih se jedna (pojačanje  $K = 31$ , vremenska konstanta  $T = 1.468$  s) može odbaciti jer rezultira nestabilnošću.

Tablica 4.53 Rezultati metode tabu pretraživanja, scenarij 6

Broj iteracija	Pojačanje, $K$	Vremenska konstanta, $T$ [s]
500	10	1.098
1000	31	1.468
1500	11	0.566
2000	17	1.121

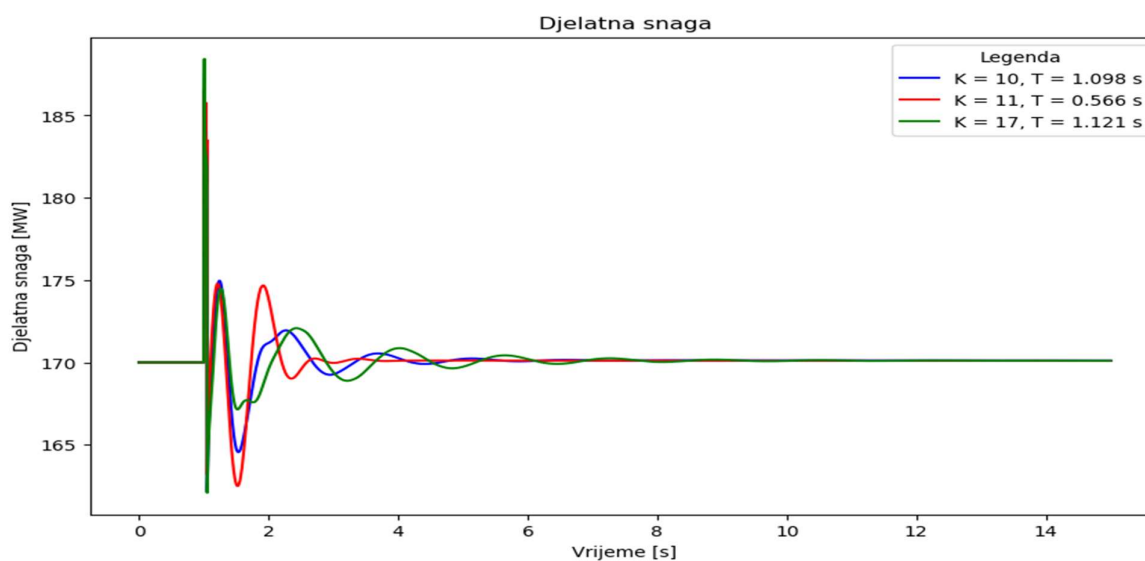
Provedbom modalne analize dobiju se oscilatorni modovi koji se, kao i u prethodnim slučajevima nalaze u rasponu frekvencija od 3.9 do 18.7 rad/s. Rezultati su prikazani tablicom 4.54, a jasno se uočava da veća vrijednost pojačanja s velikom vremenskom konstantom pogoršava pokazatelje oscilatorne stabilnosti dok se dominantni mod približava nestabilnom području.

Tablica 4.54 Oscilatorni modovi za stabilizator parametriran metodom tabu pretraživanja, scenarij 6

	$K = 10,$ $T = 1.098$ s	$K = 11,$ $T = 0.566$ s	$K = 17,$ $T = 1.121$ s
1	-1.061024193 $\pm 4.471369311$	-2.338803102 $\pm 8.356562273$	-0.63955325 $\pm 3.995006239$
2	-3.064410573 $\pm 12.37991755$	-2.677942365 $\pm 4.443283819$	-3.057202155 $\pm 12.37959852$
3	-5.532620126 $\pm 14.76030685$	-3.055131823 $\pm 12.39227644$	-3.686736017 $\pm 18.67954523$

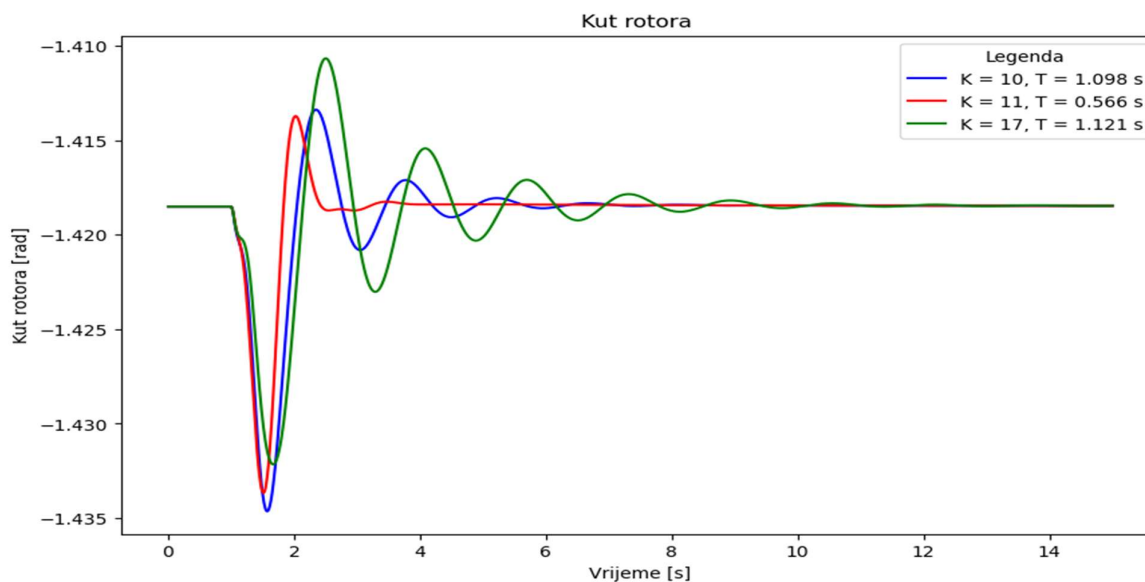
Usporedba djelatne snage za dobivene rezultate prikazana je slikom 4.200. Za tri promatrane veličine se može uočiti da se najmanje oscilacije amplitude, najmanje izobličenje i najbrže

postizanje ustaljenog stanja postižu ako se stabilizator parametira s pojačanjem  $K = 11$  i vremenskom konstantom  $T = 0.566$  sekundi. Što je vremenska konstanta veća, oscilacije snage duže traju i veća je vrijednost snage tik nakon poremećaja, koja se i u ovom slučaju ponaša kao skokovita promjena vrijednosti. Najlošiji odziv je za kombinaciju pojačanja  $K = 17$  i vremenske konstante  $T = 1.121$  sekundu kod kojeg se oscilacije smiruu nakon osam sekundi što je najsporije prigušenje u odnosu na razmatrane vrijednosti.



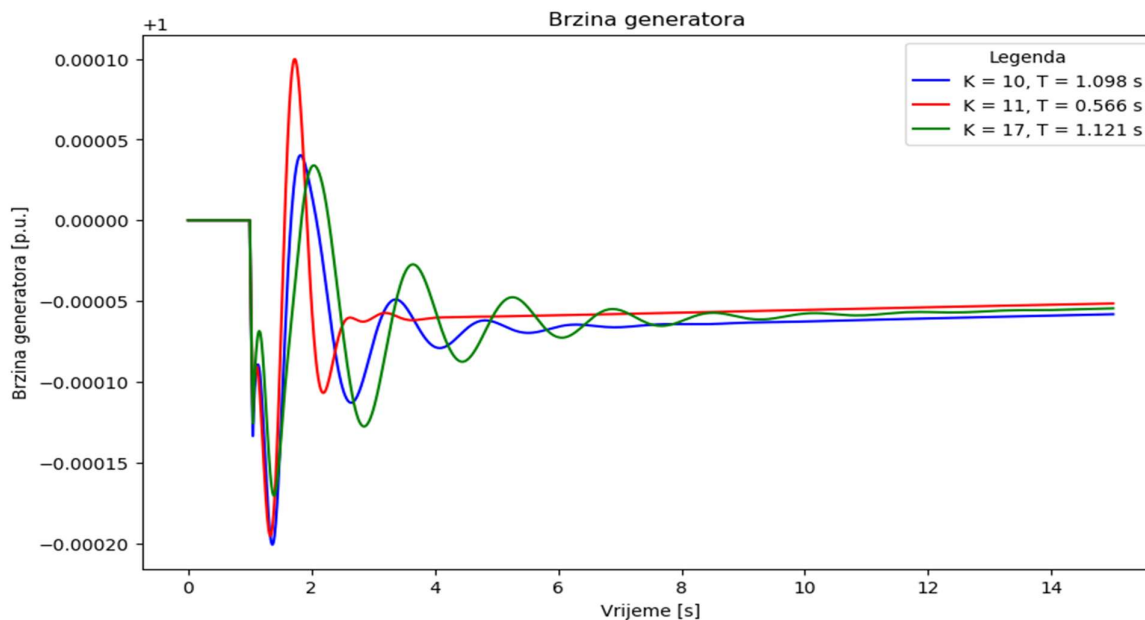
Slika 4.200 Djelatna snaga za tabu pretraživanje, scenarij 6

Odziv kuta rotora je prikazan slikom 4.201 i sa slike se još jednom potvrđuje da manja vremenska konstanta i manje pojačanje prije otklanjaju poremećaj uz manje amplitude nadvišenja. Ponovno je najlošiji odziv za stabilizator čije je pojačanje  $K = 17$ .



Slika 4.201 Kut rotora za tabu pretraživanje, scenarij 6

Brzina generatora (slika 4.202) ima najveću početnu amplitudu oscilacija za pojačanje  $K = 11$  i vremensku konstantu  $T = 0.566$  s. Međutim, veća amplituda u ovom slučaju ne znači i lošije dinamičko vladanje budući da se oscilacije smiruju već nakon otprilike 3 sekunde te je konačna vrijednost viša od preostale dvije. Najduže vrijeme prigušenja oscilacija su ponovno pri primjeni stabilizatora parametara  $K = 17$  i  $T = 1.121$  s.



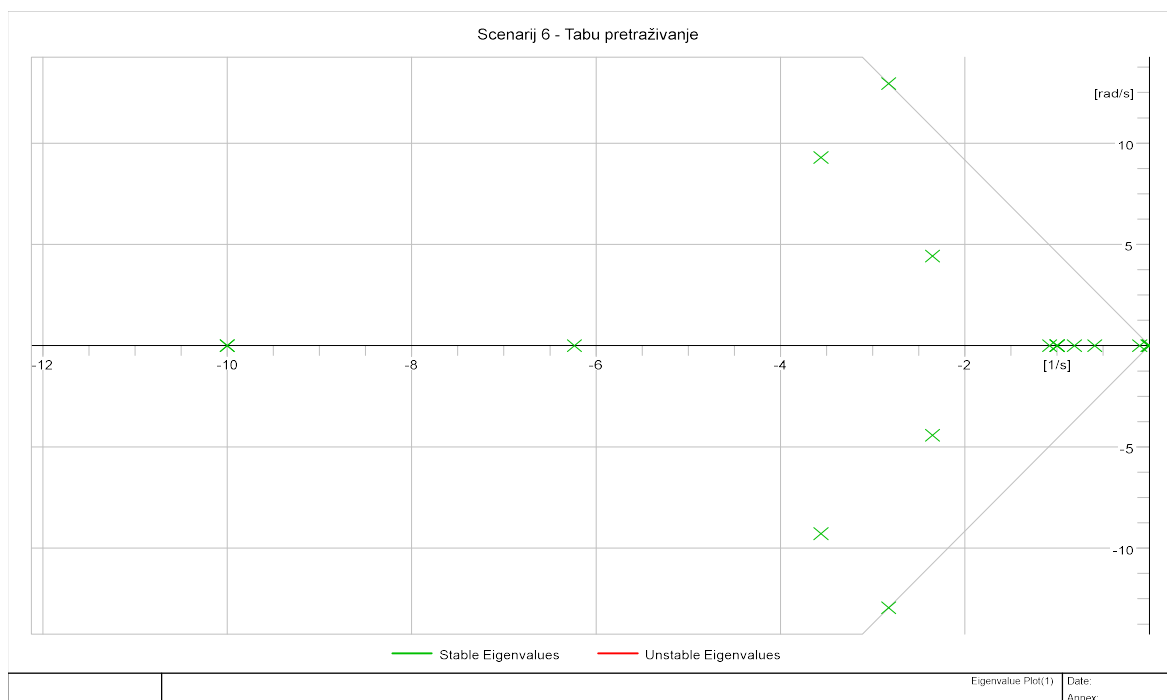
Slika 4.202 Brzina generatora za tabu pretraživanje, scenarij 6

Prema prikazanim slikama se već uočava da najmanja odstupanja veličina nastaju kada se stabilizator parametrira parametrima  $K = 11$  i  $T = 0.566$  s. Ova pretpostavka potvrđuje se i usporedbom vrijednosti funkcije cilja, tablica 4.49. Za navedenu vrijednost pokazatelj kompleksne frekvencijske domene, koeficijent prigušenja, ima najveću vrijednost. U vremenskoj domeni je najmanje odstupanje trenutne vrijednosti promatrane veličine u odnosu na njezinu početnu vrijednost čime se ovim parametrima postiže najveće poboljšanje stabilnosti u obje domene.

Tablica 4.55 Vrijednosti funkcije cilja za metodu genetskog algoritma, scenarij 6

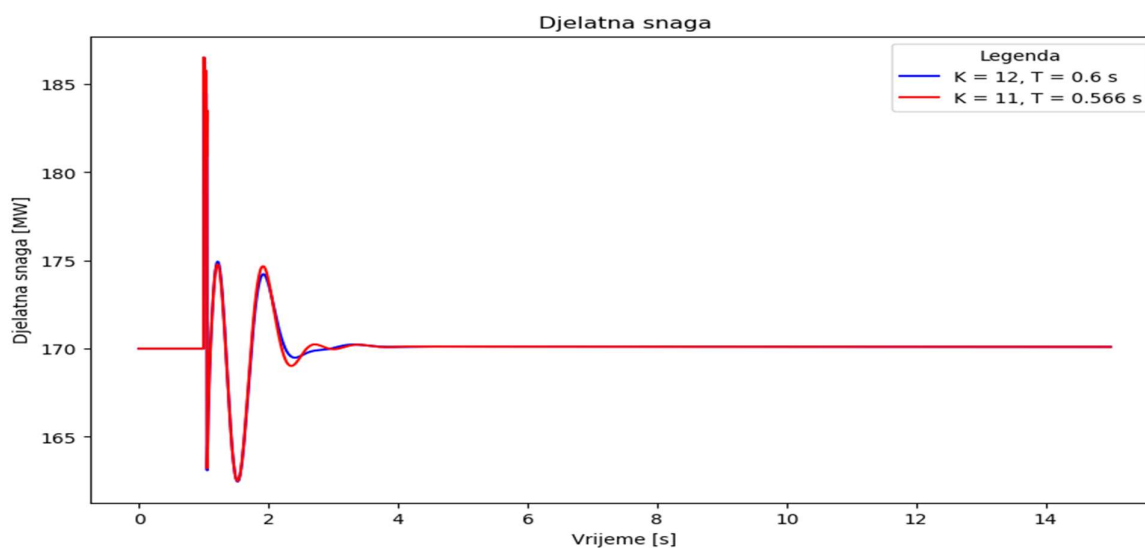
Parametri	Koeficijent prigušenja	Djelatna snaga	Kut rotora	Brzina generatora	Ukupno
$K = 10,$ $T = 1.098$ s	0.230882	0.913511	0.994551	0.999993	3.138936
$K = 11,$ $T = 0.566$ s	0.269519	0.889818	0.996244	0.999994	3.155576
$K = 17,$ $T = 1.121$ s	0.158075	0.922804	0.993909	0.999994	3.074783

Krivulja mjesta korijena za optimalnu vrijednost dobivenu tabu pretraživanjem prikazana je slikom 4.203. Sustav je stabilan i ističu se tri oscilatorna moda koji mogu utjecati na oscilatornu stabilnost, a koji su dobro prigušeni.



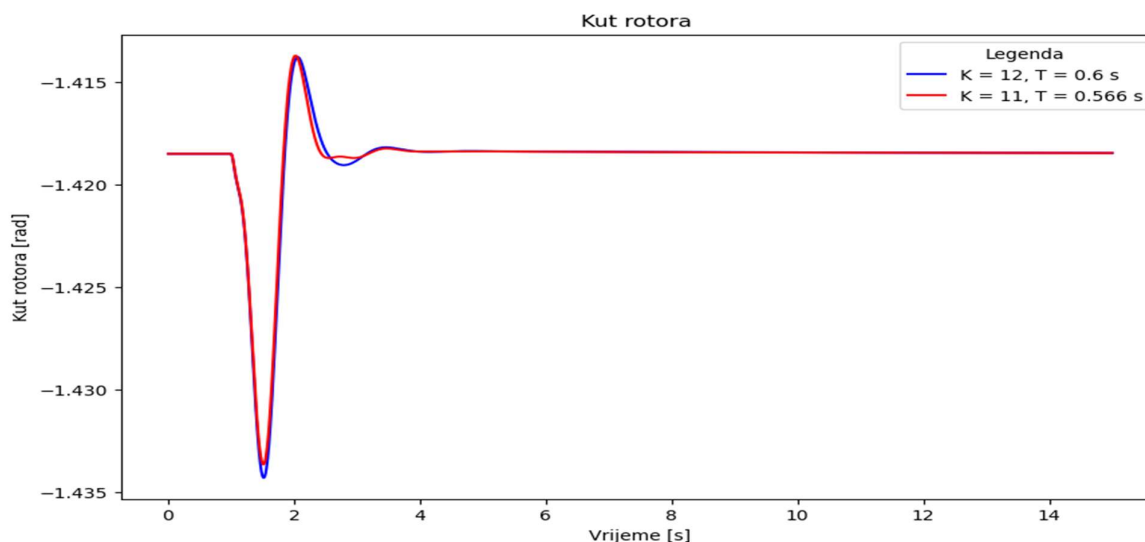
Slika 4.203 Krivulja mjesta korijena za metodu tabu pretraživanja, scenarij 6

Usporedba djelatne snage za stabilizator čiji su parametri odabrani analitičkom metodom i stabilizatora parametriranog metodom tabu pretraživanja je prikazana slikom 4.204. Oba stabilizatora imaju brzo otklanjanje oscilacija uz nešto manje oscilacije za stabilizator s parametrima  $K = 12$  i  $T = 0.6$  sekundi.



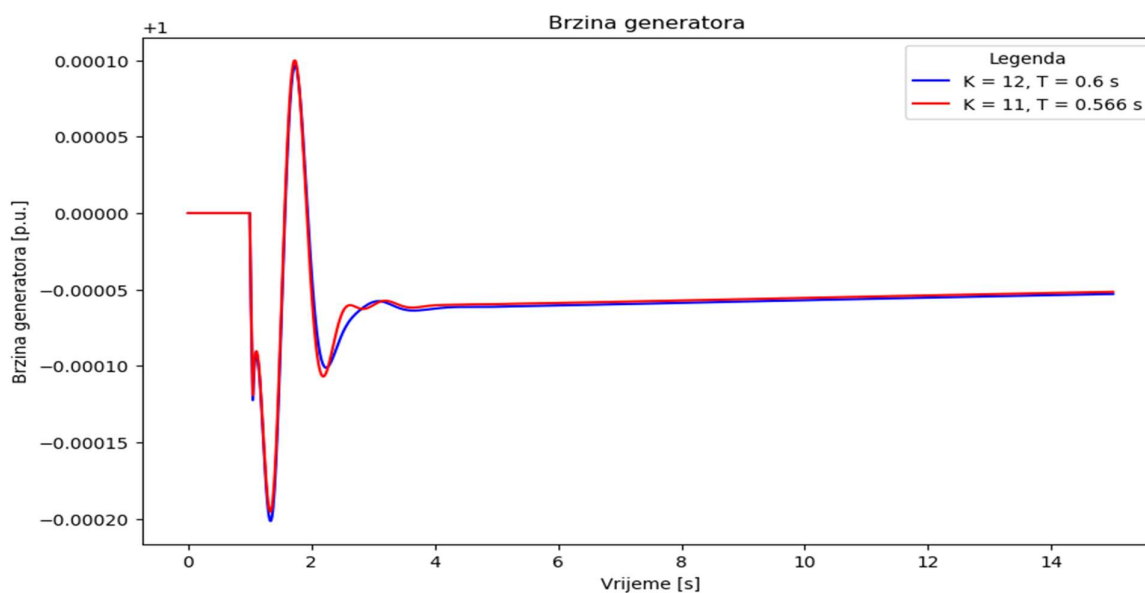
Slika 4.204 Usporedba djelatne snage za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom tabu pretraživanja, scenarij 6

Usporedbom kuta rotora (slika 4.205) pokazuje se da primjena stabilizatora parametriranog metodom tabu pretraživanja rezultira boljim odzivom - amplituda oscilacija je manja, a ustaljeno stanje se postigne brže nego stabilizatorom čiji su parametri odabrani analitičkom metodom.



Slika 4.205 Usporedba kuta rotora za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom tabu pretraživanja, scenarij 6

Zadnja veličina koja se uspoređuje je brzina generatora, a prikazana je slikom 4.206. Stabilizator parametriran metodom tabu pretraživanja će se brže vratiti do vrijednosti koja je blizu početnoj. Razlike su gotovo zanemarive stoga se može reći da je metoda tabu pretraživanja potvrdila izbor parametara dobivenih analitičkom metodom kao optimalnih.



Slika 4.206 Usporedba brzine generatora za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom tabu pretraživanja, scenarij 6

Usporedbom rezultata dobivenih metodom tabu pretraživanja ponovno se uočava da za dobro parametriranje treba pravilno odabrati broj iteracija. Također, metoda može dovesti do konvergencije unutar područja lokalnog optimuma koji pak nije pogodan kao rezultat za parametriranje stabilizatora čime se može narušiti stabilnost sustava. Dobivena vrijednost je približno jednaka vrijednosti dobivenoj analitičkom metodom, a analizom vrijednosti funkcije cilja pokazuje se da odabrani parametri dovode do poboljšanja oscilatorne stabilnosti sustava, kao i poboljšanjem tranzijentne stabilnosti sustava.

## 5 Zaključak

Niskofrekvencijske oscilacije su uobičajena pojava u elektroenergetskim sustavima i nastaju na opterećenim prijenosnim vodovima. Manifestiraju se kao oscilacije djelatne snage s frekvencijom raspona 1-2 Hz, odnosno 6-12 rad/s, a nastaju kao prirodni odgovor elektroenergetskog sustava na male poremećaje i kao posljedica neravnoteže prigušnog i sinkronizirajućeg momenta u sustavu. Otklanjanje oscilacija se postiže povećanjem prigušenja u sustavu, primjerice ugradnjom stabilizatora elektromehaničkih oscilacija u uzbudni krug generatora. Stabilizator elektromehaničkih oscilacija prije svega djeluje na oscilatornu stabilnost i prigušenje oscilatornih modova, koji se manifestiraju kao oscilacije niske frekvencije, pomjerajući ih u lijevu stranu kompleksne ravnine dalje od granice stabilnosti. Kako bi djelovanje regulatora zbilja imalo učinka, parametri se moraju odabrati tako da ne izazovu suprotan učinak. Odabir lokacije ugradnje se vrši na temelju rezultata modalne analize kojom se utvrđuje postoji li potreba za stabilizatorom i određuje se dominantni mod (oscilatorni mod najbliži ishodištu). Za oscilatorni mod se zatim provodi participacijska analiza i određuje se mjesto ugradnje stabilizatora. Odabrana je osnovna struktura stabilizatora s jednim ulazom, PSS1A te se postavljaju parametri pojačanje i vremenska konstanta.

Ulazna veličina u stabilizator se uzima na stezaljkama ili osovini generatora te se metodom fazne kompenzacije postavljaju parametri kako bi se kompenziralo kašnjenje signala. Uobičajena metoda uključuje parametriranje po pokazatelju kompleksne frekvencijske domene (prigušenje ili koeficijent prigušenja). Međutim, takav način odabira indikatora se djeluje samo na oscilatornu stabilnost, odnosno može doći do narušavanja tranzijentne stabilnosti tokom i nakon pojave poremećaja. Da bi se problem nadišao, predložena je metoda kojom se pri odabiru parametara uzimaju u obzir i pokazatelji vremenske domene, pokazatelji temeljeni na vrijednostima djelatne snage, kuta rotora i brzine generatora čime se postiže kompromis pri parametriranju te djeluje na poboljšanje u obje domene.

Promatrajući samo pokazatelj iz kompleksne frekvencijske domene može se utjecati i na vremensku domenu, smanjiti oscilacije veličina i ubrzati vrijeme otklanjanja oscilacija, ali se daleko bolji odzivi dobiju korištenjem obje vrste pokazatelja. Prednost korištenja signala vremenske domene se posebno uočava pri duljem vremenu trajanja poremećaja kada veću težinu u odabiru parametra donosi pokazatelj vremenske domene, pri čemu najveći utjecaj ima pokazatelj vezan uz djelatnu snagu. Odabir djelatne snage kao pokazatelja je najprimjereniji budući da se upravo te oscilacije žele spriječiti - veliki iznosi djelatne snage mogu uzrokovati prorađivanje zaštite i isključenje dijela elektroenergetskog sustava.



Odabir početnih vrijednosti parametara je proveden u skladu s iskustvenim metodama i referentnoj literaturi dok su varijacije i konačna vrijednost dobivene prema stvarnom stanju sustava. Na taj način se postiže prilagodljivost i robusnost stabilizatora koji se može primijeniti na bilo kojem višestrojnom sustavu. Analitička metoda je ispitana za poremećaje različitog vremena trajanja te u mreži s visokom integracijom obnovljivih izvora energije gdje se također potvrdila njegova primjenjivost. U mreži s visokom integracijom se pokazalo da je oscilatorna stabilnost poboljšana do mjere da su pojedini oscilatorni modovi u potpunosti prigušeni i iščezli. Također, u vremenskoj domeni se uočava poboljšanje budući da su oscilacije veličina znatno manje i proces prigušenja oscilacija znatno kraće traje.

Analitička metoda se provodi u okolini početnih vrijednosti definiranih konstrukcijom generatora, prvenstveno njegovom inercijskom konstantom  $H$ . Naime, kako rezultati pokazuju, poboljšanje oba vida stabilnosti je najučinkovitije ako se prigušenje nalazi u vrijednosti bliskoj početnoj vrijednosti definiranoj inercijskom konstantom i prigušenjem dominantnog moda generatora na koji se ugrađuje stabilizator. Budući da se rješenje traži u uskom rasponu vrijednosti, potrebni su manji računalni resursi za pohranu i obradu podataka.

Analitička metoda je uspoređena s optimizacijskim metodama. Primijenjene su metoda roja čestica, genetski algoritam, simulirano kaljenje i tabu pretraživanje. Za sve scenarije (kraće vrijeme trajanja poremećaja, duže vrijeme trajanja poremećaja i visoka integracija obnovljivih izvora energije) je provedena optimizacija za različite početne uvjete (broj iteracija, početna populacija/početna temperatura). Metodom roja čestica i genetskim algoritmom se za određene početne populacije, odnosno za određeni skup rješenja, dobiju vrijednosti pojačanja koje se ne mogu primijeniti na stabilizator budući da izazivaju nestabilnost. U tim slučajevima, koji su najčešće kombinacija visokog pojačanja i velike vremenske konstante, oscilatorni modovi se nalaze u desnoj strani kompleksne ravnine, a u vremenskoj domeni se pojavljuju neprigušene oscilacije. Ova problematika je izražena za sva tri razmatrana slučaja. Metoda simuliranog kaljenja pokazuje najdosljednije rezultate ovisno o početnim uvjetima, koji su ujedno bliski i rezultatima koji se dobiju analitičkom metodom. Metoda tabu pretraživanja je najbrža, ali je kao i metoda roja čestica i genetski algoritam jako ovisna o predloženim početnim uvjetima. U slučaju kada je integriran velik udio obnovljivih izvora su se također dobili rezultati koji se mogu postaviti stabilizatoru čime se i optimizacijska metoda pokazala primjenjivom za višestrojni sustav. Sa druge strane, za provedbu optimizacijske metode su potrebni značajno veći računalni resursi u odnosu na analitičku metodu budući da se pretražuje veće područje mogućih rješenja te se obrađuje veći broj podataka, a spremaju se rezultati četiri razmatrane veličine - koeficijenta prigušenja, djelatne snage, kuta rotora i brzine

generatora. Ukoliko početni uvjeti i broj razmatranih rješenja nisu dobro definirani može doći do konvergencije prema rješenju koje nije nužno najbolje za razmatranu problematiku. Usporedba rezultata analitičke i optimizacijske metode jasno se daje prednost analitičkoj metodi zbog veće preciznosti rezultata, neovisnosti rezultata o odabiru početnih uvjeta i potrebnim resursima za provođenje. Također, analitička metoda se može provesti na znatno jednostavniji način bez primjene kosimulacijskih alata.

## Bibliografija

- [1] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, New York: McGraw- Hill, 1994.
- [2] P. Kundur i a. et, »Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions,« svez. 3, pp. 1387-1401, August 2004.
- [3] L. L. Grigsby, *Power System Stability and Control*, Third Edition, Boca Raton : CRC Press Inc, 2012.
- [4] H. Golpîra, A. Román-Messina i H. Bevrani, *Renewable Integrated Power System Stability and Control*, Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2021.
- [5] M. Gibbard, P. Pourbeik i D. Vowles, *Small-signal stability, control and dynamic performance of power systems*, Adelaide: University of Adelaide Press, 2015.
- [6] B. Pal i B. Chaudhuri, *Robust Control in Power Systems*, New York: Springer Inc. , 2005.
- [7] J. Machowski, J. Bialek i J. Bumby, *Power System Dynamics: Stability and Control*, 2nd Edition, Wiley, 2008.
- [8] K. Prasertwong, N. Mithulananthan i D. Thakur, »Understanding low-frequency oscillation in power systems,« *International Journal of Electrical Engineering & Education*, svez. 3, br. 47, pp. 248-262, 2012.
- [9] A. Pathak i R. Gupta, »Low-Frequency Oscillation in Power System,« *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, svez. 3S2, br. 9, pp. 5-9, 2020.
- [10] V. Jerković, K. Miklošević i Š. Željko, »Excitation System Models of Synchronous Generator,« u *SiP 2010 28th International Conference Science in Practice*, Subotica, Srbija, 2010.
- [11] K. Hong-Hai, W. Zheng-Qiu, L. Sheng-Qing i H. Xiao-Ning, »Stability Improvement of Wind Power Integrated System Using PSS and SVC,« u *2013 Third International Conference on Intelligent System Design and Engineering Applications*, Hong Kong, China, 2013.
- [12] P. He, T. Ma, Z. Li, J. Chen i Q. Fang, »Small-Signal Stability Analysis of Wind Power Integrated System with Different PSS Models,« u *2020 5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)*, Chengdu, China, 2020.
- [13] M. A. Hassouneh, H.-C. Lee i E. H. Abed, »Washout filters in feedback control: benefits, limitations and extensions,« u *Proceedings of the 2004 American Control Conference*, Boston, MA, USA, 2004.

- [14] Z. Rafique, H. M. Khalid, S. Muyeen i I. Kamwa, »Bibliographic review on power system oscillations damping: An era of conventional grids and renewable energy integration,« *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, br. 136, 2022.
- [15] S. Lu, W. Zhang, T. Wang, T. Cai, X. Sui, H. Li, T. Zhu, Y. Gang i Y. Yu, »Parameter Tuning and Simulation Analysis of PSS Function in Excitation System with Suppression of Low Frequency Oscillation,« u *IEEE 8th International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP)*, Xi'an, China, 2019.
- [16] R. Dorf i R. Bishop, *Modern Control Systems*, 13th Edition, Boston: Pearson, 2016.
- [17] P. B. d. Araujo i L. Zanetta, »Pole placement method using the system matrix transfer function and sparsity,« *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, svez. 3, br. 23, pp. 173-178, 2001.
- [18] Y. Yalan, H. H. Rui, B. Yue, F. Biao i G. G. Feng, »Coordinated Low Frequency Oscillation Damping Method for Hydropower System with Photovoltaic Units and Static Var Generators,« u *2022 5th International Conference on Power and Energy Applications (ICPEA)*, Guangzhou, China, 2022.
- [19] M. Benasla, T. Allaoui, M. Brahami i B. Hadji, »Frequency response analysis to select the best PSS locations in power systems,« u *Proceedings of the 2016 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC)*, Algiers, Algeria, 2016.
- [20] S. Ghosh, »PSS Tuning of a Radially Connected Hydro Power Plant of Eastern India Using SMIB Model and Phase Compensation Technique,« u *2021 9th IEEE International Conference on Power Systems (ICPS)*, Kharagpur, India, 2021.
- [21] S. Satapathy i N. Nahak, »A real time integrated modelling and control of modified pumped storage governor-PSS damping action for random renewable penetration,« *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, br. 7, 2024.
- [22] S. Kellermüller, M. Ramirez-Gonzalez, A. Obushevs i P. Korba, »Laboratory Implementation of a Wide-area Damping Controller using a Dynamic Hardware Emulator,« *IFAC-PapersOnLine*, svez. 2, br. 56, pp. 2287-2292, 2023.
- [23] S. Gomes, C. H. C. Guimarães, N. Martins i G. N. Taranto, »Damped Nyquist Plot for a pole placement design of power system stabilizers,« *Electric Power Systems Research*, pp. 158-169, 2018.
- [24] F. De Marco i P. Rullo, »Damped Nyquist Plot for the Phase and Gain Optimization of Power System Stabilizers,« *Electric Power Systems Research*, br. 205, 2022.
- [25] W. Pande, S. Chakrabarti i S. Srivastava, »Online Updating of Synchronous Generator Linearised Model Parameters and PSS Tuning,« u *Proceedings of the National Power Systems Conference (NPSC)*, Tiruchirappalli, India, 2018.

- [26] M. Jokarzadeh, M. Abedini i A. Seifi, »Improving power system damping using a combination of optimal control theory and differential evolution algorithm,« *ISA Transactions*, br. 90, pp. 169-177, 2019.
- [27] M. Ayman i M. Soliman, »Robust multi-objective PSSs design via complex Kharitonov's theorem,« *European Journal of Control*, br. 58, pp. 131-142, 2021.
- [28] M. Almas Prakasa, I. Robandi, R. R. i M. Ruswandi Djalal, »A New Scheme of Harris Hawk Optimizer With Memory Saving Strategy (HHO-MSS) for Controlling Parameters of Power System Stabilizer and Virtual Inertia in Renewable Microgrid Power System,« *IEEE Access*, br. 12, pp. 73849-73878, 2024.
- [29] D. Sambariya i R. Gupta, »Effective PID-PSS design using Bat algorithm for SMIB power system,« u 2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS), New Delhi, India, 2016.
- [30] J. G. S. Machado, S. Gomes, T. M. L. Assis i T. J. M. A. Parreiras, »Small-signal stability assessment of power systems with multiple transport delays based on s-domain modelling,« *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, br. 131, 2021.
- [31] M. Djalal, A. Imran i I. Robandi, »Optimal placement and tuning power system stabilizer using participation factor and,« u *Proceedings of the International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*, Surabaya, Indonesia, 2015.
- [32] E. Eslami, H. H. Shareef i A. Mohamed, »Power system stabilizer design based on optimization techniques,« u 2011 Fourth International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization, Kuala Lumpur, Malaysia, 2011.
- [33] L. H. Hassan, M. Moghavvemi i H. A. F. Mohamed, »Power system stabilization based on artificial intelligent techniques; A review,« u 2009 International Conference for Technical Postgraduates (TECHPOS), Kuala Lumpur, Malaysia, 2009.
- [34] D. Chitara, P. Singhal, S. Surana, G. Sharma i R. Bansal, »Robust multi-machine power system stabilizer design using bio-inspired optimization techniques and their comparison,« *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, br. 155, 2024.
- [35] D. Chitara, K. R. Niazi, A. Swarnkar i N. Gupta, »Cuckoo Search Optimization Algorithm for Designing of a Multimachine Power System Stabilizer,« *IEEE Transactions on Industry Applications*, svez. 4, pp. 3056-3065, 2018.
- [36] B. Bishal, B. P. Soni, A. Saxena i V. Gupta, »Design of damping controller for multimachine power system by using simplified swarm optimization,« u 2014 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research, Coimbatore, India, 2014.

- [37] S. Satapathy, N. Nahak, A. Patra, R. Agrawal i A. Mishra, »Fractional PSS For Low Frequency Oscillation Damping of Variable Solar Penetrated Power System,« u 2021 International Conference in Advances in Power, Signal, and Information Technology (APSIT), Bhubaneswar, India, 2021.
- [38] A. Falehi, M. Rostami i H. Mehrjadi, »Transient Stability Analysis of Power System by Coordinated PSS-AVR Design Based on PSO Technique,« Engineering, svez. 5, br. 3, pp. 478-484, 2011.
- [39] A. -R. S. A. Ali i K. R. Daud, »Mitigation of SMIB Oscillations Using PSS Based on Particle Swarm Optimization Algorithm,« u 2019 International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCCEEE), Khartoum, Sudan, 2019.
- [40] A. Sharma i R. Kumar, »Optimum location of PSS and its parameters by using particle swarm optimization,« International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET), svez. 2, br. 10, pp. 571-584, 2019.
- [41] D. K. Karmakar, P. Anil i N. Raju, »Tuning of Power System Stabilizers by using Pole Placement & Particle Swarm Optimization Techniques,« TTJPRC: International Journal of Power Systems & Microelectronics, svez. 1, br. 2, pp. 21-38, 2016.
- [42] B. Dasu, M. S. Kumar i R. S. Rao, »Design of robust modified power system stabilizer for dynamic stability improvement using Particle Swarm Optimization technique,« Ain Shams Engineering Journal, svez. 10, pp. 769-783, 2019.
- [43] J. Bhukya i V. Mahajan, »Optimization of controllers parameters for damping local area oscillation to enhance the stability of an interconnected system with wind farm,« International Journal of Electrical Power & Energy Systems, br. 119, 2020.
- [44] M. Saini, M. R. Djalal i A. M. S. Yunus, »Optimal Coordination PID-PSS Control Based on Craziness Particle Swarm Optimization In Sulselrabar System,« u 2022 5th International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI), Yogyakarta, Indonesia , 2022.
- [45] M. C. Pandya i J. G. Jamnani, »Coordinated control of SVC and PSS in multimachine power system employing particle swarm optimization,« u 2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Trivandrum, India, 2016.
- [46] Y. Liu, J. He, P. Pang i H. Zhao, »Particle Swarm Optimization for PSS Parameters and Application to DIgSILENT PowerFactory,« u 2023 6th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE), Guangzhou, China, 2023.
- [47] A. Khormizi i A. Nia, »Damping of power system oscillations in multi-machine power systems using coordinate design of PSS and TCSC,« u Proceedings of the 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Rim, Italija, 2011.

- [48] T. Guesmi, A. Farah, H. Hadj Abdallah i A. Ouali, »Robust design of multimachine power system stabilizers based on improved non-dominated sorting genetic algorithms,« *Electrical Engineering*, svez. 3, br. 100, pp. 1351-1363, 2017.
- [49] A. Sheykhsarraf, M. Abedini i M. Davarpanah, »A novel method for optimal placement and tuning of the power system stabilizer in the multi-machine system,« *Electric Power Systems Research*, 2023.
- [50] M. Shafiullah, M. J. Rana, M. S. Alam i M. Abido, »Online tuning of power system stabilizer employing genetic programming for stability enhancement,« *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, svez. 3, br. 5, pp. 287-299, 2018.
- [51] B. Nadia, Z. Nora i B. S. Ali Nadia, »Comparison Between GA and PSO Optimized PID and PSS for SMIB System,« u 2023 International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET), Istanbul, Turkiye, 2023.
- [52] M. A. Honarvar, G. Shahgholian, H. Mahmoodian, S. Yaghoubi, A. Mosavi i A. Fathollahi, »Reviewing Power System Stabilizer (PSS) Parameters Optimization Using Evolutionary Meta-Heuristic Algorithms for Power System Stability,« u 2023 IEEE 21st Jubilee International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY) , Pula, Croatia, 2023.
- [53] A. L. B. Do Bomfim, G. N. Taranto i D. M. Falcao, »Simultaneous tuning of power system damping controllers using genetic algorithms,« *IEEE Transactions on Power Systems*, svez. 1, pp. 163-169, 2000.
- [54] M. Abido, »Pole placement technique for PSS and TCSC-based stabilizer design using simulated annealing,« *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, svez. 8, br. 22, pp. 543-554, 2000.
- [55] M. Abido, »Simulated annealing based approach to PSS and FACTS based stabilizer tuning,« *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, svez. 4, br. 22, pp. 247-258, 2000.
- [56] L. Shi, J. Zhou, L. Zhang i K. Y. Lee, »Optimal Coordination of Multiple ESS-based Stabilizers and PSS in Multi-machine Power System for Damping Improvement,« svez. 3, br. 47, pp. 7284-7289, 2014.
- [57] E. de Vargas Fortes, P. B. de Araujo, L. H. Macedo, B. R. Gamino i L. F. B. Martins, »Analysis of the influence of PSS and IPFC-POD controllers in small-signal stability using a Simulated Annealing algorithm,« 2016 12th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON), pp. 1-8, 2016.
- [58] S. A. Raza i S. A. R. Naqvi, »Design of a power system stabilizer for a synchronous generator using hybrid intelligent controller,« u 2013 7th IEEE GCC Conference and Exhibition (GCC), Doha, Qatar, 2013.
- [59] N. J. Castrillón, H. M. Sánchez i J. A. J. A. Pérez, »A tool for optimal PSS tuning for the Colombian power system,« u 2014 IEEE PES T&D Conference and Exposition, Chicago, IL, USA, 2014.

- [60] R. M. A. Velásquez, T. T. P. Ezcurra i L. F. V. L. F. V. Aldon, »Power System Stabilizer Design with meta-heuristic methods in a Peruvian case study,« u 2022 IEEE XXIX International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON), Lima, Peru, 2022.
- [61] S. Dechanupaprittha i I. I. Ngamroo, »Design of robust power system stabilizers in a multimachine power system using tabu search algorithm,« u 2002 IEEE International Conference on Industrial Technology, 2002. IEEE ICIT '02., Bangkok, Thailand, 2002.
- [62] M. A. Abido i Y. L. Abdel-Magid, »Robust design of electrical power-based stabilizers using tabu search,« u 2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37262), Vancouver, BC, Canada., 2001.
- [63] S. Dechanupaprittha, I. Ngamroo, K. Pasupa, J. Tippayachai, K. Hongesombut i Y. Y. Mitani, »New heuristic-based design of robust power system stabilizers,« u 2004 International Conference on Power System Technology, 2004. PowerCon 2004, Singapore, 2004.
- [64] L. Zhijian, S. Hongchun i Y. Y. Jilai, »Coordination control between PSS and SVC based on improved genetic - tabu hybrid algorithm,« u 2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, Nanjing, China, 2009, 2009.
- [65] K. E. Bollinger i A. F. Mistr, »PSS tuning at the Virginia Electric and Power Co. Bath County pumped storage plant,« IEEE Transactions on Power Systems, svez. 2, br. 4, pp. 566-574, 1989.
- [66] K. E. B. a. M. V. Chapin, »Stability tests and tuning the PSS at Battle River Plant of Alberta Power Ltd.,« IEEE Transactions on Power Systems, svez. 3, br. 3, pp. 956-962, 1988.
- [67] R. G. Farmer i B. L. Agrawal, »State-of-the-Art Technique for Power System Stabilizer Tuning,« IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, svez. 3, br. PAS-102, pp. 699-709, 1983.
- [68] A. Mendonca i J. A. P. Lopes, »Simultaneous Tuning of Power System Stabilizers Installed in DFIG-Based Wind Generation,« u 2007 IEEE Lausanne Power Tech, Lausanne, Switzerland, 2007.
- [69] S. R. Kabat, S. Pahadsingh i K. K. Jena, »Improvement of LVRT Capability Using PSS for Grid Connected DFIG Based Wind Energy Conversion System,« u 2022 1st IEEE International Conference on Industrial Electronics: Developments & Applications (ICIDeA), Bhubaneswar, India, 2022.
- [70] P. He, S. A. Arefifar, C. Li, Y. Tao i Q. Zhongjie, »Small-Signal Stability Improvement of a DFIG Integrated Power System Using PSS and SVC,« u 2018 IEEE International Conference on Electro/Information Technology (EIT), Rochester, MI, USA, 2018.
- [71] T. Surinkaew i I. Ngamroo, »Coordinated Robust Control of DFIG Wind Turbine and PSS for Stabilization of Power Oscillations Considering System Uncertainties,« IEEE Transactions on Sustainable Energy, svez. 3, pp. 823-833, 2014.



- [72] M. Basu, W. Yan, V. Gevorgian i E. Muljadi, »Inter-area Oscillation Damping with Type-5 Wind Power Plant,« u 2023 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech),, Denver, CO, USA, 2023.
- [73] H. A. Abumeteir i A. M. Vural, »Impact of High Penetration Renewable Energy Systems on Low-Frequency Oscillations,« u 2021 International Conference on Electric Power Engineering – Palestine (ICEPE- P), Gaza, Palestine, 2021.
- [74] M. Saadatmand, G. B. Gharehpetian, A. Moghassemi, J. M. Guerrero, .. Siano i H. H. Alhelou, »Damping of Low-Frequency Oscillations in Power Systems by Large-Scale PV Farms: A Comprehensive Review of Control Methods,« IEEE Access, pp. 72183-72206, 2021.
- [75] M. Rathore i M. Zuhaib, »Stability Analysis of Low Inertia Power System due to Increasing Penetration of Solar PV Systems,« u 2023 3rd International Conference on Emerging Frontiers in Electrical and Electronic Technologies (ICEFEET), Patna, India, 2023.
- [76] W. Peres, F. C. R. Coelho i J. N. N. Costa, »A pole placement approach for multi-band power system stabilizer tuning,« International Transactions on Electrical Energy Systems, 2020.
- [77] G. J. W. Dudgeon, W. E. Leithead, A. Dysko, J. O'Reilly i J. R. McDonald, »The Effective Role of AVR and PSS in Power Systems: Frequency Response Analysis,« IEEE Transactions on Power Systems, svez. 22, pp. 1986-1994, 2007.
- [78] A. Dysko, W. E. Leithead i J. O'Reilly, »Enhanced Power System Stability by Coordinated PSS Design,« IEEE Transactions on Power Systems, svez. 1, br. 25, pp. 413-422, 2010.
- [79] S. K. M. Kodsı i C. A. Canizares, »Application of a Stability-Constrained Optimal Power Flow to Tuning of Oscillation Controls in Competitive Electricity Markets,« IEEE Transactions on Power Systems, svez. 22, pp. 1944-1954, November 2007.
- [80] E. R. Samani, H. Seifi i M. Sheikh-El-Eslami, »A framework for PSS pricing as an ancillary service in a competitive electricity market,« International Journal of Electrical Power & Energy Systems, svez. 46, pp. 221-227, 2013.
- [81] H. Golpıra, M. K. Sheikh-El-Eslami i H. Seifi, »Power System Stabilizer Services Pricing in an Electricity Market,« Electric Power Components and Systems, svez. 43, p. 2050–2058, 2015.
- [82] A. Aghazade, A. Kazemi i M. M. Alamuti, »Coordination among facts POD and PSS controllers for damping of power system oscillations in large power systems using genetic algorithm,« u 45th International Universities Power Engineering Conference UPEC2010, Cardiff, UK, 2010.
- [83] Z. S. Hasa i M. N. Hawas, »Robust and Effective Tuning of FACTS-PODs of Interconnected Systems Using Harmony Search Algorithm,« u 2019 4th Scientific International Conference Najaf (SICN), Al-Najef, Iraq, 2019.

- [84] V. K. Chandrakar, S. N. Dhurvey i S. C. Suke, »Performance Comparison of SVC with POD and PSS for Damping of Power System Oscillations,« u 2010 3rd International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology, Goa, India, 2010.
- [85] K. Kumar, S. K. Parida i P. K. Biswas, »Comparative Analysis of PSS and IPFC based Damping Controller for SMIB System,« u 2019 8th International Conference on Power Systems (ICPS), Jaipur, India, 2019.
- [86] G. Yu, J. Z. T. Lin, Y. Tian i X. Yang, »Coordination of PSS and FACTS damping controllers to improve small signal stability of large-scale power systems,« CSEE Journal of Power and Energy Systems, svez. 4, pp. 507-514, 2019.
- [87] C. V. Rohit, K. Yadav i P. B. Darji, »Optimal Placement of SVC using Residue Technique and Coordination with PSS for Damping Inter-Area Oscillations,« u 2021 31st Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Perth, Australia, 2021.
- [88] R. Visakhan, R. Rahul, K. R. Hridya i A. A. Kurian, »Analysis of power oscillation damping capability of STATCOM-POD and optimal placement of PMUs in IEEE-14 bus system,« u 2015 International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing (PICC), Thrissur, India, 2015.
- [89] V. Tashchilin, P. Chusovitin, G. Shabalin i A. Pazderin, »PSS tuning method based on power system model identification using PMU,« u IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, Europe, Istanbul, Turkey, 2014.
- [90] I. Yadykin, N. Tomin, A. Iskakov i I. Galyaev, »Optimal adaptive control of electromechanical oscillations modes in power systems,« IFAC-PapersOnLine, svez. 9, br. 55, pp. 134-139, 2022.
- [91] H. Flores, J. C. Cepeda i C. F. Gallardo, »Optimum location and tuning of PSS devices considering multi-machine criteria and a heuristic optimization algorithm,« u IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America), Quito, Ecuador, 2017.
- [92] A. Aman, A. Bektimirov, N. Dyussebekova, A. Ilyasov, A. Saukhimov i A. Gunin, »Small signal stability research on integrating Wind Power Plant – An Almaty Region Example,« u 2022 57th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Istanbul, Turkey, 2022.
- [93] J. Wu, D. Jia, Z. -W. Yuan i D. G. Xu, »Tunning of PSS4B Using Improved SimuAPSO Algorithm,« u 2021 IEEE 4th International Conference on Renewable Energy and Power Engineering (REPE), Beijing, China, 2021.
- [94] F. Pagola, I. J. Perez-Arriaga i G. C. Verghese, »On sensitivities, residues and participations: applications to oscillatory stability analysis and control,« IEEE Transactions on Power Systems, svez. 1, br. 4, pp. 278-285, 1989.

- [95] N. Perić, Automatsko upravljanje, Zagreb: Skriptarnica FER, 1998..
- [96] J. Calderón-Guizar, M. Ramírez-González i R. Castellanos-Bustamante, »Identification of low frequency oscillation modes in large transmission systems,« Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, br. 82, pp. 31-39, 2017.
- [97] IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, : IEEE Std 421.5-2016 (Revision of IEEE Std 421.5-2005), 2016..
- [98] T. Košorog, M. Mehmedović, P. Marić i R. Kljajić, »Comparative Study of Single-Input and Dual-Input PSS in Multi-machine System,« u 32nd International Conference on Organization and Technology of Maintenance (OTO 2023), Osijek, 2023.
- [99] P. Kundur, M. Klein, G. J. Rogers i M. S. Zywno, »Application of power system stabilizers for enhancement of overall system stability,« IEEE Transactions on Power Systems, svez. 2, pp. 614-626, May 1989.
- [100] F. Demello i C. Concordia, »Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control,« IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, svez. 4, pp. 316-329, 1969.
- [101] E. V. Larsen i D. A. Swann, »Applying Power System Stabilizers. Part I: General Concepts,« IEEE Power Engineering Review, svez. 6, pp. 62-63, 1981.
- [102] E. V. Larsen i D. A. Swann, »Applying Power System Stabilizers Part II: Performance Objectives and Tuning Concepts,« IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, svez. 6, pp. 3025-3033, 1981.
- [103] E. V. Larsen i D. A. Swann, »Applying Power System Stabilizers Part III: Practical Considerations,« IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, svez. 6, 1981.
- [104] P. W. Sauer i M. A. Pai, Power System Dynamics and Stability, Upper On River City, NJ: Prentice Hall, 2006.
- [105] Z. Liu, W. Yao i J. Wen, » Enhancement of Power System Stability Using a Novel Power System Stabilizer with Large Critical Gain. Energies 2017, 10, 449,« Energies, svez. 4, 2017.
- [106] P. Marić, R. Kljajić, H. Chamorro i H. Glavaš, »Power System Stabilizer Tuning Algorithm in a Multimachine System Based on S-Domain and Time Domain System Performance Measures,« Energies, 2021.
- [107] S. A.-H. Soliman i A.-A. H. Mantawy, Modern Optimization Techniques with Applications in Electric Power Systems, New York: Springer New York, 2011.
- [108] J. Kennedy i R. Eberhart, »Particle swarm optimization,« u Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks, Perth, 1995.

- [109] Y. Shi i R. Eberhart, »A modified particle swarm optimizer,« u 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings, IEEE World Congress on Computational Intelligence (Cat. No.98TH8360), Anchorage.
- [110] J.-P. Zyl i A. Engelbrecht, »Set-Based Particle Swarm Optimisation: A Review,« Mathematics, svez. 11, 2023.
- [111] A. Gad, »Particle Swarm Optimization Algorithm and Its Applications: A Systematic Review,« Archives of Computational Methods in Engineering, br. 29, p. 2531–2561, 2022.
- [112] J. H. Holland, Adaptation in Natural and Artificial Systems, Ann Arbor, Michigan: University of Michigan Press, 1975.
- [113] V. Mihelj i A. Stojanović, »Osnovni principi genetskih algoritama,« Politehnika I Dizajn, svez. 4, 2022.
- [114] A. Konak, D. W. Coit i A. E. Smith, »Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial,« Reliability Engineering & System Safety, pp. 992-1007, September 2006 2006.
- [115] S. D. Immanuel i U. K. Chakraborty, »Genetic Algorithm: An Approach on Optimization,« u "Genetic Algorithm: An Approach on Optimization, 2019 International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES), Coimbatore, India, 2019.
- [116] S. Katoch, S. Chauhan i V. Kumar, »A review on genetic algorithm: past, present, and future,« Multimedia Tools and Applications, p. 8091–8126, 2021.
- [117] T. Guilmeau, E. Chouzenoux i V. Elvira, »,Simulated Annealing: a Review and a New Scheme,« u 2021 IEEE Statistical Signal Processing Workshop (SSP), Rio de Janeiro, Brazil, 2021.
- [118] D. Henderson, S. Jacobson i A. Johnson, »The Theory and Practice of Simulated Annealing,« u Handbook of Metaheuristics. International Series in Operations Research & Management Science, svez. 57, Boston, Springer, 2003, p. 287–319.
- [119] K. Amine, »Multiobjective Simulated Annealing: Principles and Algorithm Variants,« Hindawi Advances in Operations Research, 2019.
- [120] L. R. Rere, M. I. Fanany i A. M. Arymurthy, »Simulated Annealing Algorithm for Deep Learning,« u Procedia Computer Science, 3rd Information Systems International Conference, Shenzhen, Kina, 2015.
- [121] H. Youssef, S. M. Sait i H. Adiche, »Evolutionary algorithms, simulated annealing and tabu search: a comparative study,« Engineering Applications of Artificial Intelligence, pp. 167-181, 2001.

- [122] A.-H. Zhou, L.-P. Zhu, B. Hu, S. Deng, Y. Song, H. Qiu i S. Pan, »Traveling-Salesman-Problem Algorithm Based on Simulated Annealing and Gene-Expression Programming,« *Information* , svez. 7, 2019.
- [123] M. A. Noman, M. Alatefi, A. M. Al-Ahmari i T. Ali, »Tabu Search Algorithm Based on Lower Bound and Exact Algorithm Solutions for Minimizing the Makespan in Non-Identical Parallel Machines Scheduling,« *Mathematical Problems in Engineering*, 2021.
- [124] A. Amuthan i K. D. Thilak, »Survey on Tabu Search meta-heuristic optimization,« u *International Conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPE)2016*, Paralakhemundi, India, 2016.
- [125] G. Shi, W. Cheng, X. Gao, F. Wei, H. Zhang i Q. Wang, » Enhancing Security in Visible Light Communication: A Tabu-Search-Based Method for Transmitter Selection,« *Sensors* , svez. 6, 2024.
- [126] X. Lai, D. Yue, J.-K. Hao i F. Glover, »Solution-based Tabu Search for the Maximum Min-sum Dispersion Problem,« *Information Sciences*, pp. 79-94.
- [127] X. Lai i J.-K. Hao, »A tabu search based memetic algorithm for the max-mean dispersion,« *Computers and Operations Research*, pp. 118-127, 2016.

## Popis slika

<i>Slika 2.1 Klasifikacija stabilnosti</i> .....	4
<i>Slika 2.2 Podjela kutne stabilnosti</i> .....	6
<i>Slika 2.3 Ponašanje sustava pri različitim odnosima sinkronizirajućeg i prigušnog momenta</i> .....	8
<i>Slika 2.4 Jednostrojni sustav</i> .....	9
<i>Slika 2.5 Krivulja djelatna snaga – kut</i> .....	10
<i>Slika 2.6 Uzbudni krug generatora</i> .....	12
<i>Slika 3.1 Tijek parametriranja stabilizatora elektromehaničkih oscilacija</i> .....	22
<i>Slika 3.2 Krivulja mjesta korijena za stabilan sustav</i> .....	27
<i>Slika 3.3 Krivulja mjesta korijena za nestabilan sustav</i> .....	28
<i>Slika 3.4 Struktura stabilizatora elektromehaničkih oscilacija s jednim ulazom</i> .....	30
<i>Slika 3.5 Struktura stabilizatora sa dva ulazna signala</i> .....	31
<i>Slika 3.6 Algoritam parametriranja stabilizatora elektromehaničkih oscilacija[106]</i> .....	37
<i>Slika 3.7 Optimizacija metodom roja čestica</i> .....	42
<i>Slika 3.8 Koraci provođenja genetskog algoritma</i> .....	44
<i>Slika 3.9 Algoritam simuliranog kaljenja</i> .....	46
<i>Slika 3.10 Dijagram toka tabu pretraživanja</i> .....	50
<i>Slika 4.1 Standardni IEEE 14 bus system u Power Factory sučelju</i> .....	53
<i>Slika 4.2 Krivulja mjesta korijena za sustav bez stabilizatora elektromehaničkih oscilacija</i> .....	60
<i>Slika 4.3 Oscilatorni modovi sustava sa 14 sabirnica bez stabilizatora elektromehaničkih oscilacija</i> .....	61
<i>Slika 4.4 Participacijska analiza dominantnog moda</i> .....	62
<i>Slika 4.5 Brzina generatora nakon poremećaja u trajanju 50 ms bez stabilizatora elektromehaničkih oscilacija, scenarij 1</i> .....	63
<i>Slika 4.6 Kut rotora generatora nakon poremećaja u trajanju 50 ms bez stabilizatora elektromehaničkih oscilacija, scenarij 1</i> .....	63
<i>Slika 4.7 Djelatna snaga generatora nakon poremećaja u trajanju 50 ms bez stabilizatora elektromehaničkih oscilacija, scenarij 1</i> .....	64
<i>Slika 4.8 Položaj polova u kompleksnoj ravnini pri promjeni vremenske konstante stabilizatora, scenarij 1</i> .....	65
<i>Slika 4.9 Kut rotora za različite vrijednosti vremenske konstante, scenarij 1</i> .....	66
<i>Slika 4.10 Djelatna snaga za različite vrijednosti vremenske konstante, scenarij 1</i> .....	67
<i>Slika 4.11 Brzina generatora za promjenu vremenske konstante, scenarij 1</i> .....	67
<i>Slika 4.12 Težinska funkcija prigušenja za različite vrijednosti vremenske konstante, scenarij 168</i>	
<i>Slika 4.13 Težinska funkcija kuta rotora za različite vrijednosti vremenske konstante, scenarij 1</i> .....	69
<i>Slika 4.14 Težinska funkcija djelatne snage za različite vrijednosti vremenske konstante, scenarij 1</i> .....	69
<i>Slika 4.15 Težinska funkcija brzine generatora za različite vrijednosti vremenske konstante, scenarij 1</i> .....	70
<i>Slika 4.16 Ukupna težinska funkcija za različite vrijednosti vremenske konstante, scenarij 1</i> .....	70
<i>Slika 4.17 Utjecaj povećanja pojačanja na oscilatorne modove, scenarij 1</i> .....	71
<i>Slika 4.18 Kut rotora za različite vrijednosti pojačanja u donjem skupu vrijednosti, scenarij 1</i> .....	72

<i>Slika 4.19 Kut rotora za različite vrijednosti pojačanja u gornjem skupu vrijednosti, scenarij 1</i>	72
<i>Slika 4.20 Djelatna snaga za različite vrijednosti pojačanja u donjem skup vrijednosti, scenarij 1</i>	73
<i>Slika 4.21 Djelatna snaga za različite vrijednosti pojačanja u gornjem skupu vrijednosti, scenarij 1</i>	73
<i>Slika 4.22 Brzina generatora za različite vrijednosti pojačanja u donjem skupu vrijednosti, scenarij 1</i>	74
<i>Slika 4.23 Brzina generatora za različite vrijednosti pojačanja u gornjem skupu vrijednosti, scenarij 1</i>	74
<i>Slika 4.24 Težinska funkcija prigušenja za različite vrijednosti pojačanja u donjem skupu vrijednosti, scenarij 1</i>	75
<i>Slika 4.25 Težinska funkcija kuta rotora za različite vrijednosti pojačanja u donjem skupu vrijednosti, scenarij 1</i>	75
<i>Slika 4.26 Težinska funkcija djelatne snage za različite vrijednosti pojačanja u donjem skupu vrijednosti, scenarij 1</i>	76
<i>Slika 4.27 Težinska funkcija brzine generatora za različite vrijednosti pojačanja u donjem skupu vrijednosti, scenarij 1</i>	76
<i>Slika 4.28 Ukupna težinska funkcija za različite vrijednosti pojačanja u donjem skupu vrijednosti, scenarij 1</i>	77
<i>Slika 4.29 Težinska funkcija koeficijenta prigušenja za različite vrijednosti pojačanja u gornjem skupu vrijednosti, scenarij 1</i>	78
<i>Slika 4.30 Težinska funkcija kuta rotora za različite vrijednosti pojačanja u gornjem skupu vrijednosti, scenarij 1</i>	78
<i>Slika 4.31 Težinska funkcija djelatne snage za različite vrijednosti pojačanja u gornjem skupu vrijednosti, scenarij 1</i>	79
<i>Slika 4.32 Ukupna težinska funkcija za različite vrijednosti pojačanja u gornjem skup vrijednosti, scenarij 1</i>	79
<i>Slika 4.33 Ukupna težinska funkcija za različite vrijednosti pojačanja u gornjem skupu vrijednosti, scenarij 1</i>	80
<i>Slika 4.34 Krivulja mjesta korijena nakon parametriranja stabilizatora elektromehaničkih oscilacija</i>	81
<i>Slika 4.35 Usporedba brzine generatora sa i bez stabilizatora elektromehaničkih oscilacija za <math>t = 50</math> ms, scenarij 1</i>	82
<i>Slika 4.36 Kut rotora sa i bez stabilizatora elektromehaničkih oscilacija za <math>t = 50</math> ms, scenarij 1</i>	82
<i>Slika 4.37 Usporedba djelatne snage generatora sa i bez stabilizatora elektromehaničkih oscilacija za <math>t = 50</math> ms, scenarij 1</i>	83
<i>Slika 4.38 Participacijska analiza dominantnog moda nakon ugradnje stabilizatora elektromehaničkih oscilacija, scenarij 1</i>	83
<i>Slika 4.39 Djelatna snaga generatora za rezultate dobivene metodom roja čestica, scenarij 2</i>	86
<i>Slika 4.40 Brzina generatora za rezultate dobivene metodom roja čestica, scenarij 2</i>	86
<i>Slika 4.41 Kut rotora za stabilizator parametriran pomoću metode roja čestica, scenarij 2</i>	87
<i>Slika 4.42 Krivulja mjesta korijena, stabilizator elektromehaničkih oscilacija parametriran metodom roja čestica, scenarij 2</i>	88
<i>Slika 4.43 Usporedba analitičke i metode roja čestica za djelatnu snagu, scenarij 2</i>	89
<i>Slika 4.44 Usporedba analitičke i optimizacijske metode za brzinu generatora, scenarij 2</i>	89

<i>Slika 4.45 Usporedba analitičke i optimizacijske metode za kut rotora, scenarij 2</i> .....	90
<i>Slika 4.46 Djelatna snaga generatora za stabilizator parametriran genetskim algoritmom, scenarij 2</i> .....	92
<i>Slika 4.47 Kut rotora za stabilizator parametriran genetskim algoritmom, scenarij 2</i> .....	92
<i>Slika 4.48 Brzina generatora za stabilizator parametriran genetskim algoritmom, scenarij 2</i> .....	93
<i>Slika 4.49 Krivulja mjesta korijena, stabilizator elektromehaničkih oscilacija parametriran genetskim algoritmom, scenarij 2</i> .....	94
<i>Slika 4.50 Usporedba odziva brzine za analitičku metodu i genetski algoritam, scenarij 2</i> .....	95
<i>Slika 4.51 Usporedba odziva djelatne snage za analitičku metodu i genetski algoritam</i> .....	95
<i>Slika 4.52 Usporedba odziva kuta rotora za analitičku metodu i genetski algoritam</i> .....	96
<i>Slika 4.53 Djelatna snaga generatora za stabilizator parametriran metodom simuliranog kaljenja, scenarij 2</i> .....	98
<i>Slika 4.54 Kut rotora generatora za stabilizator parametriran metodom simuliranog kaljenja, scenarij 2</i> .....	99
<i>Slika 4.55 Brzina generatora za stabilizator parametriran metodom simuliranog kaljenja, scenarij 2</i> .....	99
<i>Slika 4.56 Krivulja mjesta korijena, stabilizator elektromehaničkih oscilacija parametriran metodom simuliranog kaljenja, scenarij 2</i> .....	100
<i>Slika 4.57 Usporedba odziva brzine generatora za analitičku metodu i simulirano kaljenje, scenarij 2</i> .....	101
<i>Slika 4.58 Usporedba odziva djelatne snage za analitičku metodu i simulirano kaljenje, scenarij 2</i> .....	102
<i>Slika 4.59 Usporedba odziva kuta rotora za analitičku metodu i simulirano kaljenje</i> .....	102
<i>Slika 4.60 Djelatna snaga generatora za stabilizator parametriran metodom tabu pretraživanja, scenarij 2</i> .....	104
<i>Slika 4.61 Kut rotora generatora za stabilizator parametriran metodom tabu pretraživanja, scenarij 2</i> .....	104
<i>Slika 4.62 Brzina generatora za stabilizator parametriran metodom tabu pretraživanja, scenarij 2</i> .....	105
<i>Slika 4.63 Krivulja mjesta korijena, stabilizator elektromehaničkih oscilacija parametriran metodom tabu pretraživanja, scenarij 2</i> .....	106
<i>Slika 4.64 Brzina generatora, stabilizator elektromehaničkih oscilacija parametriran metodom tabu pretraživanja, scenarij 2</i> .....	107
<i>Slika 4.65 Brzina generatora, stabilizator elektromehaničkih oscilacija parametriran metodom tabu pretraživanja, scenarij 2</i> .....	107
<i>Slika 4.66 Kut rotora, stabilizator elektromehaničkih oscilacija parametriran metodom simuliranog kaljenja, scenarij 2</i> .....	108
<i>Slika 4.67 Kut rotora za varijacije vremenske konstante za <math>t = 250</math> ms, scenarij 3</i> .....	110
<i>Slika 4.68 Djelatna snaga za varijacije vremenske konstante za <math>t = 250</math> ms, scenarij 3</i> .....	110
<i>Slika 4.69 Brzina generatora za varijacije vremenske konstante za <math>t = 250</math> ms, scenarij 3</i> .....	111
<i>Slika 4.70 Težinska funkcija koeficijenta prigušenja za varijaciju vremenske konstante prvog skupa za <math>t = 250</math> ms, scenarij 3</i> .....	112
<i>Slika 4.71 Težinska funkcija kuta rotora za varijaciju vremenske konstante prvog skupa za <math>t = 250</math> ms, scenarij 3</i> .....	112
<i>Slika 4.72 Težinska funkcija djelatne snage za varijaciju vremenske konstante prvog skupa za <math>t = 250</math> ms, scenarij 3</i> .....	113



Slika 4.73 Težinska funkcija brzine generatora za varijaciju vremenske konstante prvog skupa za $t = 250$ ms, scenarij 3.....	113
Slika 4.74 Ukupna težinska funkcija za varijaciju vremenske konstante prvog skupa za $t = 250$ m, scenarij 3.....	114
Slika 4.75 Kut rotora za varijacije vremenske konstante drugog skupa vrijednosti za $t = 250$ ms, scenarij 3.....	114
Slika 4.76 Djelatna snaga za varijacije vremenske konstante drugog skupa vrijednost za $t = 250$ ms, scenarij 3.....	115
Slika 4.77 Brzina generatora za varijacije vremenske konstante drugog skupa vrijednosti za $t = 250$ ms, scenarij 3.....	115
Slika 4.78 Težinska funkcija koeficijenta prigušenja za varijaciju vremenske konstante drugog skupa za $t = 250$ ms, scenarij 3.....	116
Slika 4.79 Težinska funkcija kuta rotora za varijaciju vremenske konstante drugog skup za $t = 250$ ms, scenarij 3.....	117
Slika 4.80 Težinska funkcija djelatne snage za varijaciju vremenske konstante drugog skupa za $t = 250$ ms, scenarij 3.....	117
Slika 4.81 Težinska funkcija djelatne snage za varijaciju vremenske konstante drugog skupa za $t = 250$ ms, scenarij 3.....	118
Slika 4.82 Ukupna težinska funkcija za varijaciju vremenske konstante drugog skupa za $t = 250$ ms, scenarij 3.....	118
Slika 4.83 Dominantni polovi u kompleksnoj ravnini za različite vrijednosti vremenske konstante za $t = 250$ ms, scenarij 3.....	119
Slika 4.84 Kut rotora za varijacije pojačanja donjeg skupa vrijednosti za $t = 250$ ms, scenarij 3.....	120
Slika 4.85 Djelatna snaga za varijacije pojačanja donjeg skupa vrijednosti za $t = 250$ ms, scenarij 3.....	120
Slika 4.86 Brzina generatora za varijacije pojačanja donjeg skupa vrijednosti za $t = 250$ ms, scenarij 3.....	121
Slika 4.87 Težinska funkcija koeficijenta prigušenja za varijaciju pojačanja donjeg skupa vrijednosti za $t = 250$ ms, scenarij 3.....	121
Slika 4.88 Težinska funkcija kuta rotora za varijaciju pojačanja donjeg skupa vrijednosti za $t = 250$ ms, scenarij 3.....	122
Slika 4.89 Težinska funkcija djelatne snage za varijaciju pojačanja donjeg skupa vrijednosti za $t = 250$ ms, scenarij 3.....	122
Slika 4.90 Težinska funkcija koeficijenta prigušenja za varijaciju pojačanja donjeg skupa vrijednosti za $t = 250$ ms, scenarij 3.....	123
Slika 4.91 Težinska funkcija koeficijenta prigušenja za varijaciju pojačanja donjeg skupa vrijednosti za $t = 250$ ms, scenarij 3.....	123
Slika 4.92 Kut rotora za varijacije pojačanja gornjeg skupa vrijednost za, $t = 250$ ms, scenarij 3.....	125
Slika 4.93 Djelatna snaga za varijacije pojačanja gornjeg skupa vrijednosti za $t = 250$ ms, scenarij 3.....	125
Slika 4.94 Brzina generatora za varijacije pojačanja gornjeg skupa vrijednosti za $t = 250$ ms, scenarij 3.....	126
Slika 4.95 Težinska funkcija koeficijenta prigušenja za varijaciju pojačanja gornjeg skupa vrijednosti za $t = 250$ ms, scenarij 3.....	126

Slika 4.96 Težinska funkcija kuta rotora za varijaciju pojačanja gornjeg skupa vrijednosti za $t = 250$ ms, scenarij 3.....	127
Slika 4.97 Težinska funkcija djelatne snage za varijaciju pojačanja gornjeg skupa vrijednosti za $t = 250$ ms, scenarij 3.....	127
Slika 4.98 Težinska funkcija brzine generatora za varijaciju pojačanja gornjeg skupa vrijednosti za $t = 250$ ms, scenarij 3.....	128
Slika 4.99 Ukupna težinska funkcija za varijaciju pojačanja gornjeg skupa vrijednost za $t = 250$ ms, scenarij 3.....	128
Slika 4.100 Položaj dominantnog pola pri povećanju pojačanja za $t = 250$ ms, scenarij 3.....	130
Slika 4.101 Krivulja mjesta korijena za $t = 250$ ms, scenarij 3.....	131
Slika 4.102 Djelatna snaga, stabilizator elektromehaničkih oscilacija analitičkom metodom pri $t = 250$ ms, scenarij 3.....	131
Slika 4.103 Kut rotora, stabilizator elektromehaničkih oscilacija analitičkom metodom pri $t = 250$ ms, scenarij 3.....	132
Slika 4.104 Brzina generatora, stabilizator elektromehaničkih oscilacija analitičkom metodom pri $t = 250$ ms, scenarij 3.....	132
Slika 4.105 Djelatna snaga za stabilizatore parametrirane metodom roja čestica za $t = 250$ ms, scenarij 4.....	134
Slika 4.106 Kut rotora za stabilizatore parametrirane metodom roja čestica za $t = 250$ ms, scenarij 4.....	135
Slika 4.107 Brzina generatora za stabilizatore parametrirane metodom roja čestica za $t = 250$ ms, scenarij 4.....	135
Slika 4.108 Krivulja mjesta korijena za stabilizator parametriran metodom roja čestica za $t = 250$ ms, scenarij 4.....	136
Slika 4.109 Usporedba brzine generatora za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom roja čestica za, $t = 250$ ms, scenarij 4.....	137
Slika 4.110 Usporedba djelatne snage za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom roja čestica za $t = 250$ ms, scenarij 4.....	137
Slika 4.111 Usporedba kuta rotora za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom roja čestica za $t = 250$ ms, scenarij 4.....	138
Slika 4.112 Djelatna snaga za metodu genetskog algoritma za $t = 250$ ms, scenarij 4.....	140
Slika 4.113 Kut rotora za metodu genetskog algoritma za $t = 250$ ms, scenarij 4.....	141
Slika 4.114 Brzina generatora za metodu genetskog algoritma za $t = 250$ ms, scenarij 4.....	142
Slika 4.115 Krivulja mjesta korijena za genetski algoritam za, $t = 250$ ms, scenarij 4.....	143
Slika 4.116 Usporedba djelatne snage za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom genetskog algoritma za $t = 250$ ms, scenarij 4.....	144
Slika 4.117 Usporedba kuta rotora za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom genetskog algoritma za $t = 250$ ms, scenarij 4.....	144
Slika 4.118 Usporedba brzine generatora za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom genetskog algoritma za $t = 250$ ms, scenarij 4.....	145
Slika 4.119 Djelatna snaga za stabilizatore parametrirane metodom simuliranog kaljenja za $t = 250$ ms, scenarij 4.....	146
Slika 4.120 Kut rotora za stabilizatore parametrirane metodom simuliranog kaljenja za $t = 250$ ms, scenarij 4.....	147
Slika 4.121 Brzina generatora za stabilizatore parametrirane metodom simuliranog kaljenja za $t = 250$ ms, scenarij 4.....	148
Slika 4.122 Krivulja mjesta korijena metode simuliranog kaljenja za $t = 250$ ms, scenarij 4.....	149

<i>Slika 4.123 Usporedba djelatne snage za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom simuliranog kaljenja za <math>t = 250</math> ms, scenarij 4</i>	149
<i>Slika 4.124 Usporedba kuta rotora za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom simuliranog kaljenja za <math>t = 250</math> ms, scenarij 4</i>	150
<i>Slika 4.125 Usporedba brzine generatora za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom simuliranog kaljenja za <math>t = 250</math> ms, scenarij 4</i>	150
<i>Slika 4.126 Djelatna snaga za stabilizatore parametrirane metodom tabu pretraživanja za <math>t = 250</math> ms, scenarij 4</i>	152
<i>Slika 4.127 Kut rotora za stabilizatore parametrirane metodom tabu pretraživanja za <math>t = 250</math> ms, scenarij 4</i>	152
<i>Slika 4.128 Brzina generatora za stabilizatore parametrirane metodom tabu pretraživanja za <math>t = 250</math> ms, scenarij 4</i>	153
<i>Slika 4.129 Krivulja mjesta korijena za tabu pretraživanje za <math>t = 250</math> ms, scenarij 4</i>	154
<i>Slika 4.130 Usporedba djelatne snage za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom tabu pretraživanja za <math>t = 250</math> ms, scenarij 4</i>	154
<i>Slika 4.131 Usporedba kuta rotora za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom tabu pretraživanja za <math>t = 250</math> ms, scenarij 4</i>	155
<i>Slika 4.132 Usporedba brzine generatora za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom tabu pretraživanja za <math>t = 250</math> ms, scenarij 4</i>	155
<i>Slika 4.133 Krivulja mjesta korijena za sustav bez stabilizatora elektromehaničkih oscilacija u mreži s visokim udjelom obnovljivih izvora energije, scenarij 5</i>	156
<i>Slika 4.134 Oscilatorni modovi višestrojnog sustava s visokim udjelom obnovljivih izvora energije, scenarij 5</i>	158
<i>Slika 4.135 Participacijska analiza dominantnog moda u sustavu s visokim udjelom obnovljivih izvora energije, scenarij 5</i>	159
<i>Slika 4.136 Djelatna snaga u sustavu s visokim udjelom obnovljivih izvora energije, scenarij 5</i>	160
<i>Slika 4.137 Kut rotora u sustavu s visokim udjelom obnovljivih izvora energije, scenarij 5</i>	160
<i>Slika 4.138 Brzina generatora u sustavu s visokim udjelom obnovljivih izvora energije, scenarij 5</i>	161
<i>Slika 4.139 Krivulja mjesta korijena, scenarij 5</i>	162
<i>Slika 4.140 Djelatna snaga za varijacije vremenske konstante u prvom skupu vrijednosti, scenarij 5</i>	163
<i>Slika 4.141 Kut rotora za varijacije vremenske konstante u prvom skupu vrijednosti, scenarij 5</i>	163
<i>Slika 4.142 Brzina generatora za varijacije vremenske konstante u prvom skupu vrijednosti, scenarij 5</i>	164
<i>Slika 4.143 Težinska funkcija koeficijenta prigušenja za prvi skup varijacije vremenske konstante, scenarij 5</i>	165
<i>Slika 4.144 Težinska funkcija kuta rotora za prvi skup varijacije vremenske konstante, scenarij 5</i>	165
<i>Slika 4.145 Težinska funkcija kuta rotora za prvi skup varijacije vremenske konstante, scenarij 5</i>	166
<i>Slika 4.146 Težinska funkcija brzine generatora za prvi skup varijacije vremenske konstante, scenarij 5</i>	166
<i>Slika 4.147 Ukupna težinska funkcija za prvi skup varijacije vremenske konstante, scenarij 5</i>	167

<i>Slika 4.148 Položaj dominantnog pola pri varijaciji vremenske konstante za drugi skup vrijednosti, scenarij 5</i> .....	167
<i>Slika 4.149 Djelatna snaga za varijacije vremenske konstante u drugom skupu vrijednosti, scenarij 5</i> .....	168
<i>Slika 4.150 Kut rotora za varijacije vremenske konstante u drugom skupu vrijednosti, scenarij 5</i> .....	168
<i>Slika 4.151 Brzina generatora za varijacije vremenske konstante u drugom skupu vrijednosti, scenarij 5</i> .....	169
<i>Slika 4.152 Težinska funkcija koeficijenta prigušenja za drugi skup vrijednosti, scenarij 5</i> .....	170
<i>Slika 4.153 Težinska funkcija kuta rotora za drugi skup vrijednosti, scenarij 5</i> .....	170
<i>Slika 4.154 Težinska funkcija djelatne snage za drugi skup vrijednosti, scenarij 5</i> .....	171
<i>Slika 4.155 Težinska funkcija brzine generatora za drugi skup vrijednosti, scenarij 5</i> .....	171
<i>Slika 4.156 Ukupna težinska funkcija za drugi skup vrijednosti, scenarij 5</i> .....	172
<i>Slika 4.157 Djelatna snaga za varijacije pojačanja za donji skup vrijednosti, scenarij 5</i> .....	172
<i>Slika 4.158 Kut rotora za varijacije pojačanja za donji skup vrijednosti, scenarij 5</i> .....	173
<i>Slika 4.159 Brzina generatora za varijacije pojačanja za donji skup vrijednosti, scenarij 5</i> ....	173
<i>Slika 4.160 Težinska funkcija prigušenja za donji skup vrijednosti, scenarij 5</i> .....	174
<i>Slika 4.161 Težinska funkcija kuta rotora za donji skup vrijednosti, scenarij 5</i> .....	175
<i>Slika 4.162 Težinska funkcija djelatne snage za donji skup vrijednosti, scenarij 5</i> .....	175
<i>Slika 4.163 Težinska funkcija brzine generatora za donji skup vrijednosti, scenarij 5</i> .....	176
<i>Slika 4.164 Ukupna težinska funkcija za donji skup vrijednosti, scenarij 5</i> .....	176
<i>Slika 4.165 Djelatna snaga za varijacije pojačanja za gornji skup vrijednosti, scenarij 5</i> .....	177
<i>Slika 4.166 Kut rotora za varijacije pojačanja za gornji skup vrijednosti, scenarij 5</i> .....	177
<i>Slika 4.167 Brzina generatora za varijacije pojačanja za gornji skup vrijednosti, scenarij 5</i> ... 178	
<i>Slika 4.168 Težinska funkcija prigušenja za gornji skup vrijednosti, scenarij 5</i> .....	179
<i>Slika 4.169 Težinska funkcija kuta rotora za gornji skup vrijednosti, scenarij 5</i> .....	179
<i>Slika 4.170 Težinska funkcija djelatne snage za gornji skup vrijednosti, scenarij 5</i> .....	180
<i>Slika 4.171 Težinska funkcija brzine generatora za gornji skup vrijednosti, scenarij 5</i> .....	180
<i>Slika 4.172 Ukupna težinska funkcija pri varijaciji pojačanja za gornji skup vrijednosti, scenarij 5</i> .....	181
<i>Slika 4.173 Položaj dominantnog pola pri povećanju pojačanja u mreži s visokim udjelom obnovljivih izvora energije, scenarij 5</i> .....	181
<i>Slika 4.174 Krivulja mjesta korijena za sustav sa stabilizatorom elektromehaničkih oscilacija, scenarij 5</i> .....	182
<i>Slika 4.175 Usporedba odziva djelatne snage sa i bez stabilizatora elektromehaničkih oscilacija, scenarij 5</i> .....	183
<i>Slika 4.176 Usporedba odziva kuta rotora sa i bez stabilizatora elektromehaničkih oscilacija, scenarij 5</i> .....	183
<i>Slika 4.177 Usporedba odziva brzine generatora sa i bez stabilizatora elektromehaničkih oscilacija</i> .....	184
<i>Slika 4.178 Participacijska analiza dominantnog moda, scenarij 5</i> .....	185
<i>Slika 4.179 Djelatna snaga za metodu roja čestica, scenarij 6</i> .....	187
<i>Slika 4.180 Kut rotora za metodu roja čestica, scenarij 6</i> .....	187
<i>Slika 4.181 Brzina generatora za metodu roja čestica, scenarij 6</i> .....	188
<i>Slika 4.182 Krivulja mjesta korijena za metodu roja čestica, scenarij 6</i> .....	189
<i>Slika 4.183 Usporedba djelatne snage za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom roja čestica, scenarij 6</i> .....	189

<i>Slika 4.184 Usporedba kuta rotora za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom roja čestica, scenarij 6 .....</i>	<i>190</i>
<i>Slika 4.185 Usporedba brzine generatora za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom roja čestica, scenarij 6.....</i>	<i>190</i>
<i>Slika 4.186 Djelatna snaga za metodu genetskog algoritma, scenarij 6 .....</i>	<i>194</i>
<i>Slika 4.187 Kut rotora za metodu genetskog algoritma, scenarij 6.....</i>	<i>195</i>
<i>Slika 4.188 Brzina generatora za metodu genetskog algoritma, scenarij 6 .....</i>	<i>196</i>
<i>Slika 4.189 Krivulja mjesta korijena za metodu genetskog algoritma, scenarij 6.....</i>	<i>197</i>
<i>Slika 4.190 Usporedba djelatne snage za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom genetskog algoritma, scenarij 6.....</i>	<i>198</i>
<i>Slika 4.191 Usporedba kuta rotora za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom genetskog algoritma, scenarij 6 .....</i>	<i>198</i>
<i>Slika 4.192 Usporedba brzine generatora za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom genetskog algoritma, scenarij 6.....</i>	<i>199</i>
<i>Slika 4.193 Djelatna snaga za metodu simuliranog kaljenja, scenarij 6.....</i>	<i>201</i>
<i>Slika 4.194 Kut rotora za metodu simuliranog kaljenja, scenarij 6 .....</i>	<i>201</i>
<i>Slika 4.195 Brzina generatora za metodu simuliranog kaljenja, scenarij 6 .....</i>	<i>202</i>
<i>Slika 4.196 Krivulja mjesta korijena za metodu simuliranog kaljenja, scenarij 6 .....</i>	<i>203</i>
<i>Slika 4.197 Usporedba djelatne snage pri primjeni stabilizatora parametriranog analitičkom metodom i metodom simuliranog kaljenja, scenarij 6 .....</i>	<i>203</i>
<i>Slika 4.198 Usporedba kuta rotora pri primjeni stabilizatora parametriranog analitičkom metodom i metodom simuliranog kaljenja, scenarij 6 .....</i>	<i>204</i>
<i>Slika 4.199 Usporedba brzine generatora pri primjeni stabilizatora parametriranog analitičkom metodom i metodom simuliranog kaljenja, scenarij 6 .....</i>	<i>204</i>
<i>Slika 4.200 Djelatna snaga za tabu pretraživanje, scenarij 6 .....</i>	<i>206</i>
<i>Slika 4.201 Kut rotora za tabu pretraživanje, scenarij 6 .....</i>	<i>206</i>
<i>Slika 4.202 Brzina generatora za tabu pretraživanje, scenarij 6.....</i>	<i>207</i>
<i>Slika 4.203 Krivulja mjesta korijena za metodu tabu pretraživanja, scenarij 6.....</i>	<i>208</i>
<i>Slika 4.204 Usporedba djelatne snage za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom tabu pretraživanja, scenarij 6.....</i>	<i>208</i>
<i>Slika 4.205 Usporedba kuta rotora za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom tabu pretraživanja, scenarij 6 .....</i>	<i>209</i>
<i>Slika 4.206 Usporedba brzine generatora za stabilizator parametriran analitičkom metodom i metodom tabu pretraživanja, scenarij 6.....</i>	<i>209</i>

**Popis tablica**

<i>Tablica 4.1 Podaci statičkih kompenzatora</i> .....	52
<i>Tablica 4.2 Podaci generatora</i> .....	54
<i>Tablica 4.3 Podaci automatskih regulatora napona</i> .....	55
<i>Tablica 4.4 Podaci transformatora</i> .....	55
<i>Tablica 4.5 Podaci o vodovima i kabelima</i> .....	56
<i>Tablica 4.6 Snaga potrošača</i> .....	56
<i>Tablica 4.7 Svojstvene vrijednosti IEEE sustava sa 14 sabirnica bez stabilizatora elektromehaničkih oscilacija</i> .....	58
<i>Tablica 4.8 Svojstvene vrijednosti lokalnih modova - bez stabilizatora elektromehaničkih oscilacija</i> .....	61
<i>Tablica 4.9 Težinske funkcije za varijacije vremenske konstante za <math>t = 50</math> ms, scenarij 1</i> .....	68
<i>Tablica 4.10 Težinske funkcije za varijacije pojačanja za <math>t = 50</math> ms, scenarij 1</i> .....	80
<i>Tablica 4.11 Rezultati metode optimizacije roja čestica, scenarij 2</i> .....	84
<i>Tablica 4.12 Oscilatorni modovi za parametre određene metodom roja čestica, scenarij 2</i> .....	85
<i>Tablica 4.13 Usporedba težinskih funkcija za različite parametre stabilizatora za metodu roja čestica, scenarij 2</i> .....	88
<i>Tablica 4.14 Rezultati genetskog algoritma za početna ograničenja, scenarij 2</i> .....	90
<i>Tablica 4.15 Oscilatorni modovi za parametre određene genetskim algoritmom, scenarij 2</i> .....	91
<i>Tablica 4.16 Usporedba težinskih funkcija za različite parametre stabilizatora za metodu genetskog algoritma, scenarij 2</i> .....	94
<i>Tablica 4.17 Rezultati optimizacije metodom simuliranog kaljenja, scenarij 2</i> .....	97
<i>Tablica 4.18 Oscilatorni modovi za stabilizator parametriran metodom simuliranog kaljenja, scenarij 2</i> .....	97
<i>Tablica 4.19 Usporedba težinskih funkcija za različite parametre stabilizatora, metoda simuliranog kaljenja, scenarij 2</i> .....	100
<i>Tablica 4.20 Rezultati optimizacije metodom tabu pretraživanja, scenarij 2</i> .....	103
<i>Tablica 4.21 Oscilatorni modovi za stabilizator parametriran metodom tabu pretraživanja, scenarij 2</i> .....	103
<i>Tablica 4.22 Usporedba vrijednosti funkcije cilja za različite parametre stabilizatora, metoda tabu pretraživanja, scenarij 2</i> .....	106
<i>Tablica 4.23 Težinska funkcije za varijacije vremenske konstante prvog skupa vrijednosti za <math>t = 250</math> ms, scenarij 3</i> .....	111
<i>Tablica 4.24 Težinska funkcije za varijacije vremenske konstante drugog skupa vrijednosti za <math>t = 250</math> ms, scenarij 3</i> .....	116
<i>Tablica 4.25 Vrijednosti težinskih funkcija za varijaciju pojačanja u donjem skupu vrijednosti za <math>t = 250</math> ms, scenarij 3</i> .....	124
<i>Tablica 4.26 Vrijednosti težinskih funkcija za varijaciju pojačanja u gornjem skupu vrijednosti za <math>t = 250</math> ms, scenarij 3</i> .....	129
<i>Tablica 4.27 Rezultati metode roja čestica za <math>t = 250</math> ms, scenarij 4</i> .....	133
<i>Tablica 4.28 Oscilatorni modovi za stabilizator parametriran metodom roja čestica za <math>t = 250</math> ms, scenarij 4</i> .....	134
<i>Tablica 4.29 Težinske funkcije za metodu roja čestica za <math>t = 250</math> ms, scenarij 4</i> .....	136
<i>Tablica 4.30 Rezultati optimizacije primjenom metode genetskog algoritma za <math>t = 250</math> ms, scenarij 4</i> .....	139

<i>Tablica 4.31 Oscilatorni modovi stabilizatora parametriranih genetskim algoritmom za <math>t = 250</math> ms, scenarij 4.....</i>	<i>139</i>
<i>Tablica 4.32 Težinske funkcije za metodu genetskog algoritma za <math>t = 250</math> ms, scenarij 4 .....</i>	<i>143</i>
<i>Tablica 4.33 Rezultati simuliranog kaljenja za <math>t = 250</math> ms, scenarij 4.....</i>	<i>145</i>
<i>Tablica 4.34 Oscilatorni modovi za stabilizator parametriran metodom simuliranog kaljenja za <math>t = 250</math> ms, scenarij 4.....</i>	<i>146</i>
<i>Tablica 4.35 Vrijednosti funkcije cilja za stabilizatore parametrirane metodom simuliranog kaljenja za <math>t = 250</math> ms, scenarij 4 .....</i>	<i>148</i>
<i>Tablica 4.36 Rezultati metode tabu pretraživanja za <math>t = 250</math> ms, scenarij 4.....</i>	<i>151</i>
<i>Tablica 4.37 Oscilatorni modovi za stabilizator parametriran metodom tabu pretraživanja za <math>t=250</math> ms, scenarij 4.....</i>	<i>151</i>
<i>Tablica 4.38 Vrijednosti funkcije cilja za stabilizatore parametrirane metodom tabu pretraživanja za <math>t = 250</math> ms, scenarij 4.....</i>	<i>153</i>
<i>Tablica 4.39 Svojstvene vrijednosti IEEE sustava sa 14 sabirnica bez stabilizatora elektromehaničkih oscilacija uz visoku integraciju obnovljivih izvora energije, scenarij 5 .....</i>	<i>157</i>
<i>Tablica 4.40 Težinske funkcije prvog skupa vremenskih konstanti, Scenarij 5 .....</i>	<i>164</i>
<i>Tablica 4.41 Težinske funkcije za varijacije vremenske konstante za drugi skup vrijednosti, scenarij 5.....</i>	<i>169</i>
<i>Tablica 4.42 Težinske funkcije donjeg skupa vrijednosti u mreži s visokom integracijom obnovljivih izvora energije, scenarij 5.....</i>	<i>174</i>
<i>Tablica 4.43 Težinske funkcije donjeg skupa vrijednosti uz visoku integraciju obnovljivih izvora energije, scenarij 5.....</i>	<i>178</i>
<i>Tablica 4.44 Rezultati metode optimizacije roja čestica, scenarij 6.....</i>	<i>186</i>
<i>Tablica 4.45 Oscilatorni modovi za parametre određene metodom roja čestica, scenarij 6 .....</i>	<i>186</i>
<i>Tablica 4.46 Usporedba težinskih funkcija za različite parametre stabilizatora metode roja čestica, scenarij 6.....</i>	<i>188</i>
<i>Tablica 4.47 Rezultati genetskog algoritma za početna ograničenja, scenarij 6.....</i>	<i>191</i>
<i>Tablica 4.48 Oscilatorni modovi stabilizatora parametriranih genetskim algoritmom, scenarij 6 .....</i>	<i>192</i>
<i>Tablica 4.49 Vrijednosti funkcije cilja za metodu genetskog algoritma, scenarij 6.....</i>	<i>193</i>
<i>Tablica 4.50 Rezultati simuliranog kaljenja, scenarij 6 .....</i>	<i>200</i>
<i>Tablica 4.51 Oscilatorni modovi za stabilizator parametriran metodom simuliranog kaljenja, scenarij 6.....</i>	<i>200</i>
<i>Tablica 4.52 Vrijednosti funkcije cilja za stabilizatore parametrirane metodom simuliranog kaljenja, <math>t = 250</math> ms.....</i>	<i>202</i>
<i>Tablica 4.53 Rezultati metode tabu pretraživanja, scenarij 6 .....</i>	<i>205</i>
<i>Tablica 4.54 Oscilatorni modovi za stabilizator parametriran metodom tabu pretraživanja, scenarij 6.....</i>	<i>205</i>
<i>Tablica 4.55 Vrijednosti funkcije cilja za metodu genetskog algoritma, scenarij 6.....</i>	<i>207</i>

## Sažetak

### Razvoj i primjena metode za postavljanje i prilagodbu parametara stabilizatora elektromehaničkih oscilacija pomoću pokazatelja kompleksne frekvencijske domene i vremenske domene

Prijenosni vodovi su zbog svoje rasprostranjenosti i rada na granici statičke stabilnosti podložni malim poremećajima koji mogu dovesti do narušavanja tranzijentne stabilnosti. Iz tehničkih i ekonomskih razloga se nastoji povećati snaga prijenosa što za posljedicu ima smanjenje prigušnog momenta u sustavu. Kao posljedica smanjenja prigušenja se pojavljuju niskofrekvencijski oscilatorni modovi frekvencije do 12 rad/s (oko 2 Hz). Oscilacije djelatne snage pri promjenama opterećenja u sustavu mogu dovesti do isključenja voda i prekida opskrbe energije. Kako bi se povećalo prigušenje i smanjile oscilacije u uzbudni krug generatora se implementira stabilizator elektromehaničkih oscilacija (engl. *Power System Stabilizer, PSS*) koji na temelju brzine generatora ili neke druge veličine mjerene na stezaljkama generatora djeluje na prigušni moment generatora. Lokacija ugradnje PSS-a se određuje na temelju participacijske analize sustava i parametrira metodom fazne kompenzacije. Uobičajena metoda parametriranja se provodi na temelju pokazatelja iz kompleksne frekvencijske domene - prigušenja i relativnog koeficijenta prigušenja - što dovodi do poboljšanja oscilatorne stabilnosti i pomaka polova u lijevi dio kompleksne ravnine. Parametriranje po tim pokazateljima dovodi do narušavanja pokazatelja tranzijentne stabilnosti. Kako bi se poboljšala oba vida stabilnosti, razvijena je metodologija odabira parametara PSS-a koja uzima u obzir pokazatelje obje domene: koeficijenta pojačanja iz kompleksne frekvencijske domene i pokazatelja djelatne snage, kuta rotora i brzine generatora iz vremenske domene čime se postiže kompromis pri parametriranju. U ovoj disertaciji, razvijena je analitička metoda koja je ispitana na višestrojnom sustavu te su rezultati provjereni u vremenskoj domeni za različite poremećaje kao i različite konfiguracije sustava. Analitička metoda je nakon toga uspoređena sa četiri optimizacijske metode i to metodom roja čestica, genetskim algoritmom, metodom simuliranog kaljenja i tabu pretraživanjem. Za predložene optimizacijske metode su postavljeni različiti početni uvjeti te su rezultati uspoređeni s rezultatima analitičke metode.

**Ključne riječi:** stabilizator elektromehaničkih oscilacija, vremenska domena, kompleksna frekvencijska domena, oscilatorna stabilnost, tranzijentna stabilnost, optimizacijske metode



## Abstract

### Development and Application of a Method for Power System Stabilizer Setting and Tuning Using Complex Frequency Domain and Time Domain Indices

Due to their spatial distribution and operation at the limit of static stability, transmission lines are subjected to small disturbances that can lead to disturbances of transient stability. For technical and economic reasons, an effort is made to increase the transmission power, which results in a reduction of the damping torque in the system. As a consequence of the reduction of damping, low-frequency oscillatory modes of frequency up to 12 rad/s (about 2 Hz) appear. Oscillations of active power during load changes in the system can lead to disconnection of lines and interruption of energy supply. In order to increase damping and reduce oscillations, a power system stabilizer (PSS) is implemented in the excitation circuit of the generator, which increases the damping torque of the generator based on the speed of the generator or some other quantity measured on the generator terminals. The location of the PSS is determined based on the participation analysis of the system and tuned using the pole placement method. The usual tuning method is carried out on the basis of indices from the S-domain - damping and damping ratio - which leads to an improvement in oscillatory stability and a shift of the poles to the left part of the S-plane. Tuning according to these indices leads to violations of time-domain indices. In order to improve both aspects of stability, a PSS tuning methodology was developed that takes into consideration indices from both domains: the damping ratio from the S-domain and the indices of active power, rotor angle, and generator speed from the time domain, which achieves a compromise in tuning. In this dissertation, an analytical method was developed and tested on a multi-machine system, and the results were checked in the time domain for different disturbances and for different system configurations. The analytical method was then compared with four optimization methods, namely the particle swarm optimization method, genetic algorithm, simulated annealing method, and tabu search. Different initial conditions were set for the proposed optimization methods, and the results were compared with the results of the analytical method.

**Keywords:** Power System Stabilizer, Time-domain, S-domain, Small-signal stability, Transient stability, Optimization methods

## Životopis

Ružica Kljajić je rođena 3. travnja 1988. godine u Doboju. 2002. godine upisuje Srednju elektrotehničku školu u KŠC "Don Bosco" Žepče, smjer energetičar. 2006. preddiplomski, a 2009. diplomski studij Elektrotehnike, smjer elektroenergetika na Elektrotehničkom fakultetu Osijek. U srpnju 2011. godine završava fakultetsko obrazovanje s titulom magistra inženjerka elektrotehnike, smjer elektroenergetika. 2019. godine zapošljava se kao asistent na Zavodu za elektroenergetiku, Katedra za elektroenergetske mreže i postrojenja na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek. Tijekom 2010. godine dobiva priznanje Hrvatske elektroprivrede za najboljeg studenta smjera elektroenergetika u ak. 2009./2010. godini.

Uže područje istraživanja su joj prijenos električne energije i stabilnost elektroenergetskog sustava. Objavila je ukupno 16 znanstvenih rada od kojih su 3 objavljena u znanstvenim časopisima, te 13 znanstvenih radova objavljenih na međunarodnim znanstvenim skupovima indeksiranim u IEEE Xplore i Springer bazi. Sudjeluje na više međunarodnih i domaćih projekata i održava nastavu iz pet kolegija na preddiplomskim i diplomskim studijskim programima iz područja osnova elektroenergetskih sustava, prijenosa i distribucije električne energije i stabilnosti elektroenergetskog sustava.