

OPTIMIRANJE PODEŠENJA STABILIZATORA ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA ANALIZOM OSJETLJIVOSTI KARAKTERISTIČNE VRIJEDNOSTI

Mato Mišković, Dubrovnik

UDK 621.311.1:621.313.322
STRUČNI ČLANAK

Analizira se mogućnost optimalnog podešenja parametara stabilizatora elektroenergetskog sustava, s ciljem postizanja maksimalnog prigušenja elektromehaničkih njihanja pogonskih veličina generatora. Razmatra se potpuno numerički postupak za koji je nužan matematički model koji po strukturi i parametrima odgovara stvarnom sustavu, ovim postupkom dobivamo funkcionalnu ovisnost karakterističnih vrijednosti sustava o iznosu podešivih parametara stabilizatora elektroenergetskog sustava, što proračun parametara svodi na određivanje minimuma navedene funkcije.

Ključne riječi: elektroenergetski sustav, sustav regulacije uzbude, stabilizator elektroenergetskog sustava, matematički model, karakteristična vrijednost, stabilnost.

1. UVOD

Poboljšanje dinamičke stabilnosti elektroenergetskog sustava moguće je provesti smanjivanjem reaktancija prijenosnih dalekovoda ili aktivnim djelovanjem na sustav regulacije uzbude elektroagregata. Aktivna stabilizacija realizira se stabilizatorima elektromehaničkih njihanja, ovaj postupak je veoma zahtjevan, posebno u pogledu podešenja regulacijskih parametara. Aktivni postupak pri loše odabranim parametrima može rezultirati suprotnim učinkom.

Ovdje se razmatra jedan potpuno numerički postupak proračuna parametara, kojem je osnovna pretpostavka poznavanje matematičkog modela sinkronog generatora u radu na elektroenergetski sustav. Navedeni postupak iskoristit će se za izračun parametara podešenja stabilizatora dodanog u sustav starije elektrostrojne uzbude nešto složenije strukture.

1. MODEL SINKRONOG GENERATORA U RADU NA ELEKTROENERGETSKI SUSTAV

1.1. Matematički model generatora u radu na elektroenergetski sustav

Za analizu elektromehaničkih njihanja obično se koristi model trećeg reda, u kojem je djelovanje prigušnog namota nadomješteno koeficijentom prigušenja, mehaničkih veličina. Detaljan izvod ovog modela dan je u [1] i [2].

Navedeni model dan je u slijedećem matričnom jednadžbom:

$$\ddot{A}x = A \dot{A}x + B\Delta u \quad 1.01$$

Izlazna varijabla je napon generatora

$$\Delta U_2 = C\Delta x + D\Delta u \quad 1.02$$

Varijable stanja dane su vektorom

$$\Delta x^T = \begin{bmatrix} \dot{A}\delta \\ \dot{A}\ddot{a} \\ \dot{A}\ddot{u} \end{bmatrix} \quad 1.03$$

Matrica sustava je:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_{e'}} & -\frac{x_{ad} U_{m0} \sin \delta_0}{\dot{u}_0 x_{d0}' T_{d0}'} & -\frac{x_{ad} U_{m0} \cos \delta_0}{\dot{u}_0^2 x_{d0}' T_{d0}'} \\ 0 & 0 & \omega_s \\ -\frac{1}{T_m} \left(\frac{\partial m_{el}}{\partial \Psi_f} \right)_0 & -\frac{1}{T_m} \left(\frac{\partial m_{el}}{\partial \delta} \right)_0 & - \left(\frac{1}{T_m} \left(\frac{\partial m_{el}}{\partial \omega} \right)_0 + D \right) \end{bmatrix} \quad 1.04$$

Matrica upravljanja je:

$$B = \begin{bmatrix} \omega_s r_f \\ x_{ad} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad 1.05$$

Izlazna matrica jednaka je

$$C = \begin{bmatrix} \frac{U_{q0}}{U_{20}} \frac{\dot{u}_0 x_m x_{ad}}{x_{d0}' x_f} & \frac{U_{d0}}{U_{20}} \frac{x_q}{x_{qz}} U_{m0} \cos \delta_0 & -\frac{U_{q0}}{U_{20}} \frac{x_d}{x_{dz}} U_{m0} \sin \delta_0 & \frac{U_{q0} x_m x_{ad} \Psi_{f0}}{U_{20} x_{e2} x_f} \end{bmatrix} \quad 1.06$$

Matričnim relacijama od 1.01 do 1.06 u sustavu varijabli stanja opisan je linearizirani matematički model. Nedostak ovakvog modela je valjanost samo za jednu pogonsku radnu točku i male promjene varijabli stanja, prednost je bitno pojednostavljenje i dobar uvid u dinamička svojstva jednostavnim izračunom karakterističnih vrijednosti matrice sustava.

1.2. Matematički model regulatora sustava uzbude

Na slici 1. prikazana je blokovska shema regulatora sustava uzbude, koji se sastoji od magnetskog pojačala koje pojačava signal greške, slijedeće pojačalo u seriji je amplidin, odakle se pojačani signal vodi na istosmjerni generator, koji je na zajedničkoj osovini s glavnim generatorom. Stabilizacija je izvršena negativnim dinamičkim povratnim vezama.

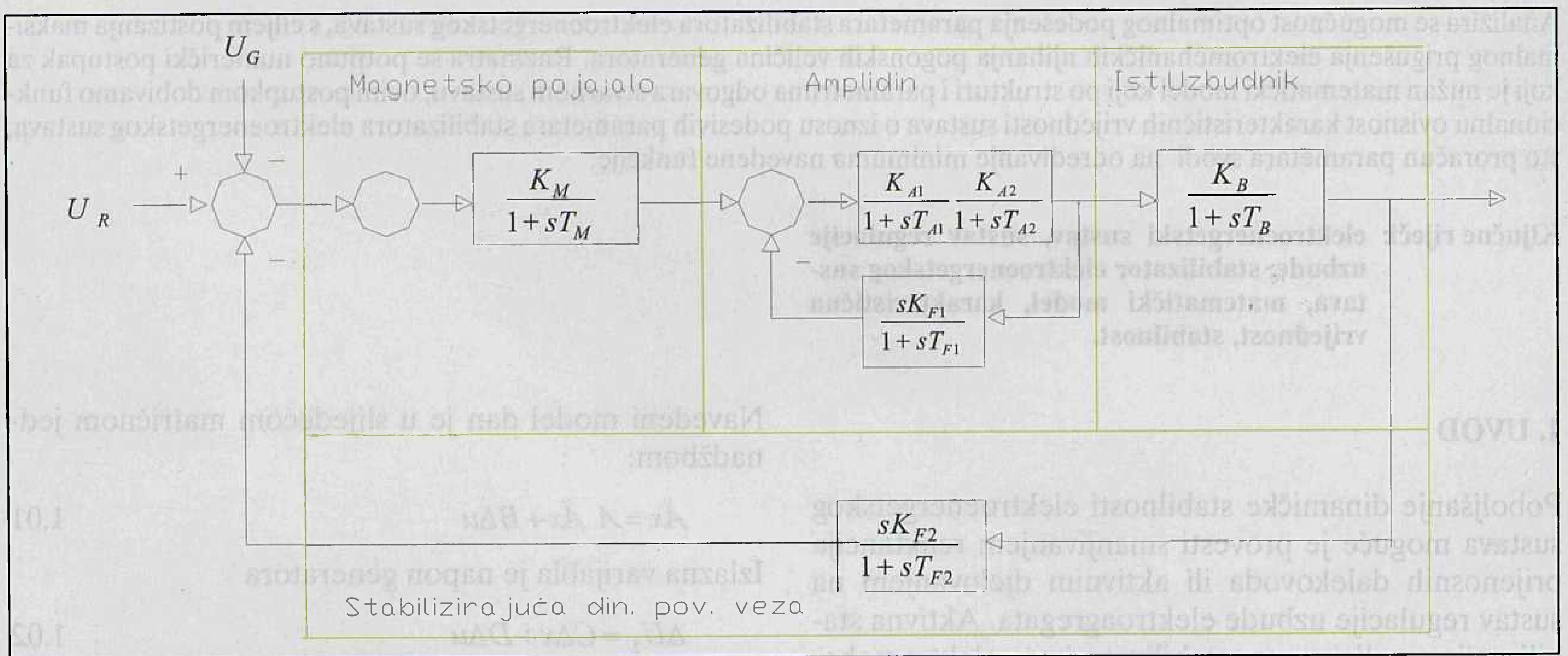
$$A_R = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -0.88 & -16.34 & -14.63 & -14.63 & -4.59 \end{bmatrix} \quad 1.07$$

$$B_R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 1.08$$

$$C_R = \begin{bmatrix} 68.87 & 401.29 & 233.53 & 203.38 & 0 \end{bmatrix} \quad 1.09$$

Tablica 1.

K_M	$T_M(s)$	K_{A1}	$T_{A1}(s)$	K_{A2}	$T_{A2}(s)$	K_{F1}	$T_{F1}(s)$	K_B	T_B	K_{F2}	$T_{F2}(s)$
8.1	0.02	2.4	0.02	1.5	0.07	0.001	1.6	0.9	0.4	0.08	2.6



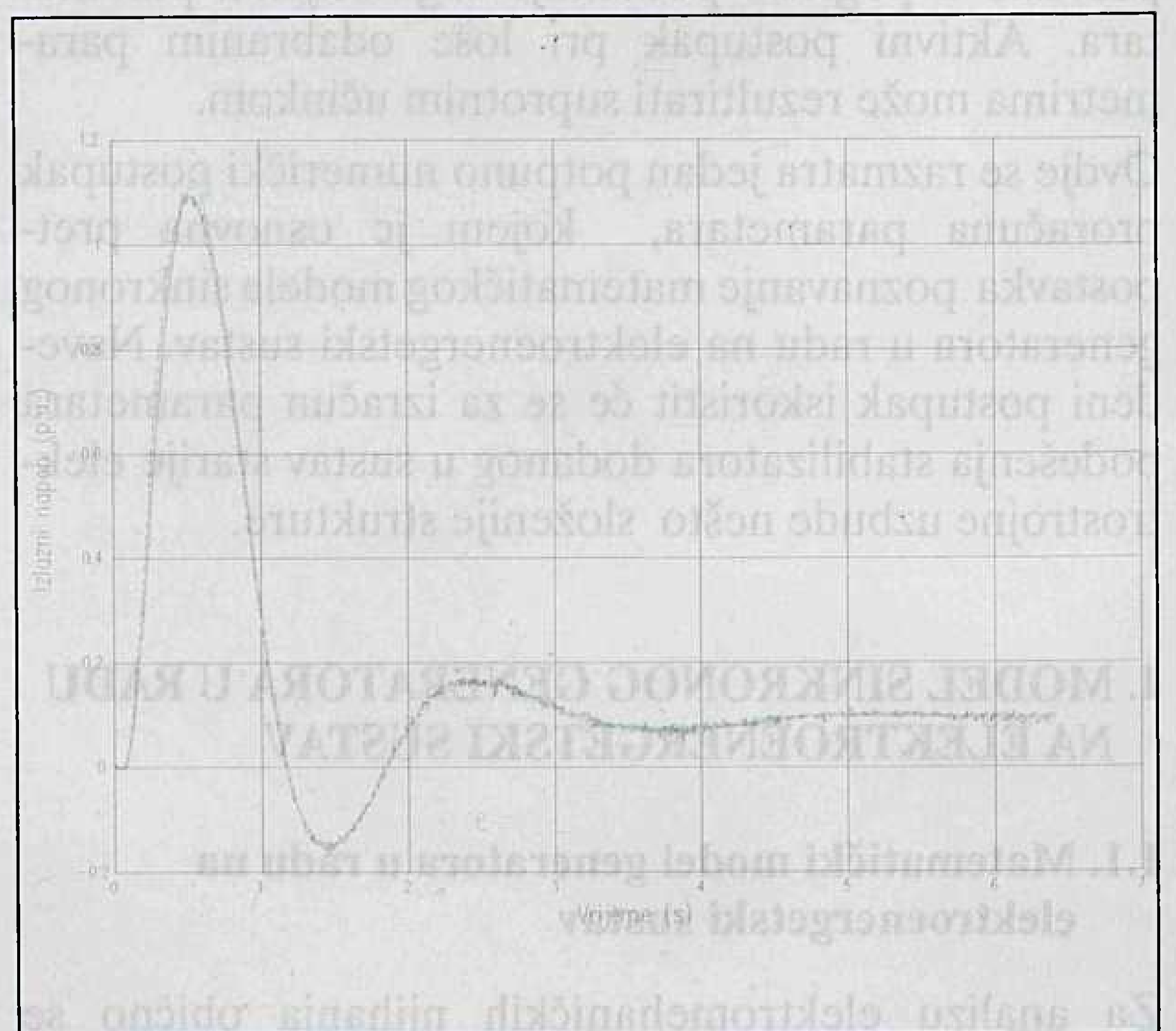
Slika 1. Strukturni blok dijagram regulatora sustava uzbude sinkronog generatora

Identifikacija parametara izvršena je korištenjem izmjerenih odziva na skok ulaznog signala od 0.05 p.u. Identifikacija prijenosne funkcije, provedena je postupkom minimiziranja greške jednadžbe sustava. Identifikacija parametara provedena je metodom osjetljivosti izlazne veličine na promjenu parametra. Detaljniji opis korištenih postupaka identifikacije bitno bi povećao ovaj opis te ga izostavljamo, navedeni postupci su obrađeni u referenci [5].

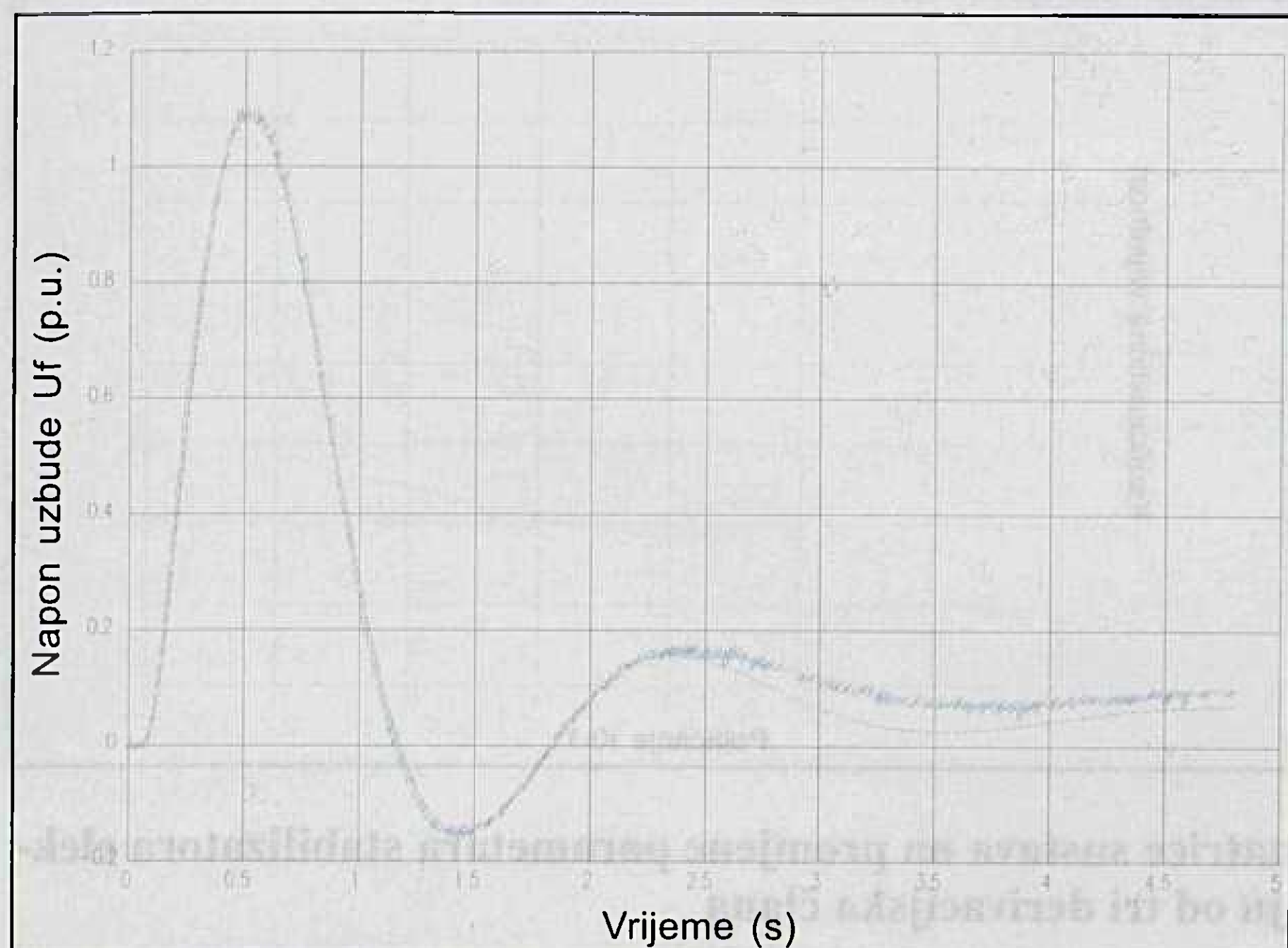
Rezultati identifikacije prijenosne funkcije dani su relacijama 1.07, 1.08 i 1.09.

Dobiveni rezultati uspoređeni su sa izmjerenim i prikazani su na slici 2. Vidljivo je dobro slaganje proračunatih i izmjerenih vrijednosti.

Rezultati parametarske identifikacije dani su u tablici 1. usporedni prikaz odziva dan je na slici 3. Dobiveni rezultati također pokazuju da je dobiven matematički model, koji je veoma vjeran stvarnom sustavu. Rezultati parametarske identifikacije nužni su za analizu utjecaja podešenja samog regulatora na dinamička svojstva sustava.



Slika 2. Usporedni prikaz izmjerenog i proračunatog odziva regulatora na skok ulaznog signala od 0.05 p.u. napona generatora



Slika 3. Usporedni prikaz izmjerenog i proračunatog odziva regulatora na skok ulaznog signala od 5% napona generatora

Opisanim postupkom dobili smo model generatora s automatskim regulatorom sustava uzbude

Korištenjem modela generatora relacije od 1.01 do 1.06 i modela regulatora relacije 1.07, 1.08 i 1.09. možemo postaviti model generatora s automatskim regulatorom sustava uzbude u radu na elektroenergetski sustav. Za parametrisiranje stabilizatora dovoljan nam je matematički model regulatora opisan relacijama 1.07, 1.08 i 1.09. Želimo li analizirati utjecaj podešenja parametara samog regulatora na dinamička svojstva sustava, potreban je model u kojem se regulatorski dio opisuje prema strukturnom blok dijagramu danom na slici 1. a koriste parametri iz tablice 1.

2. PARAMETRIRANJE STABILIZATORA ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA

U literaturi [8] i [9] opisan je niz postupaka parametrisiranja stabilizatora, predlaže se također i veoma veliki broj različito strukturiranih stabilizatora.

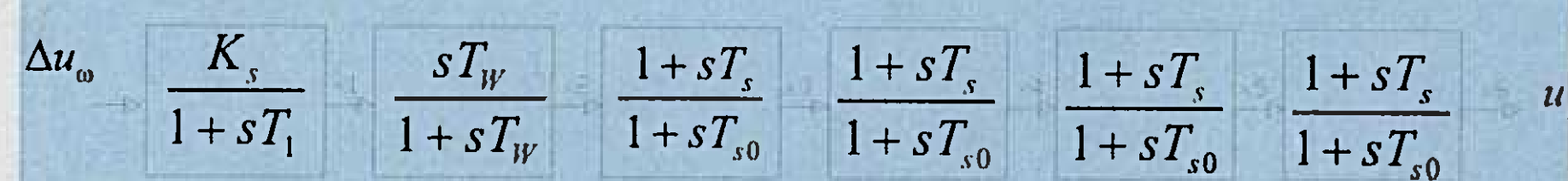
Navedeni postupci u pravilu koriste idealizirani matematički model sinkronog generatora, proračunat na primjer za nominalne pogonske vrijednosti a kao izlaz daju vrijednost podešenja parametara stabilizatora.

Ovdje se problem parametrisiranja pokušao riješiti analizom osjetljivosti karakterističnih vrijednosti matrice sustava na promjenu parametara stabilizatora elektroenergetskog sustava.

Na slici 4. dat je strukturni blok diagram stabilizatora elektroenergetskog sustava.

Ulazni signal je njihanje kutne brzine generatora, na ulazu se filtrira istosmjerna komponenta i signal se vodi preko serije derivacijskih elemenata koji imaju podesive vrijednosti pojačanja K_s i vremenskih konstanti T_s . Izlazni signal se superponira upravljačkom naponu na ulazu u regulator sustava uzbude.

U modelu generatora s automatskim regulatorom sustava uzbude jednostavno možemo uvesti stabilizator



Slika 4. Strukturni blok dijagram stabilizatora elektroenergetskog sustava

elektromehaničkih njihanja prema strukturnom blok dijagramu slika 4.

Ovakav model možemo koristiti za analizu utjecaja pojedinih parametara regulatora ili stabilizatora na dinamička svojstva.

Variranjem vrijednosti željenog parametra u određenom opsegu (od 50% do 150%) dobivamo skup karakterističnih vrijednosti rješavajući jednadžbu.

$$\det|\lambda I - A| = 0 \quad 2.04$$

Sušтина postupka je iz skupa dobivenih rješenja odrediti funkcionalnu ovisnost $\text{Re}(\lambda) = f(K_s)$ i $\text{Re}(\lambda) = f(T_s)$. Broj rješenja određen je redom matrice sustava A i stupnjem diskretizacije. Slaganje rješenja u funkcionalne ovisnosti radimo pomoću kubne interpolacije. Pomoću tri rješenja određujemo četvrto a zatim iz skupa rješenja tražimo ono koje mu je po vrijednosti najbliže. Ovo je nužno jer postupak određivanja karakterističnih vrijednosti ne vrši nikakvo "slaganje" dobivenih rješenja.

Nužnost naknadnog "slaganja" rješenja u funkcionalne ovisnosti nameće i zahtjev na stupanj diskretizacije.

Nakon provedenog postupka utvrđeno je da samo manji broj karakterističnih vrijednosti pokazuje osjetljivost na promjenu parametara podešenja stabilizatora. Ovdje smo izdvojili one koje imaju male apsolutne iznose realne vrijednosti i koje imaju izražene minimume. Simulacijskim proračunom potvrđena je ispravnost postupka.

Rezultati proračuna za generator čiji se podaci nalaze u tablici 2. dani su na slici 5. Proračun je izvršen za niz od tri derivacijska elementa slika 5.

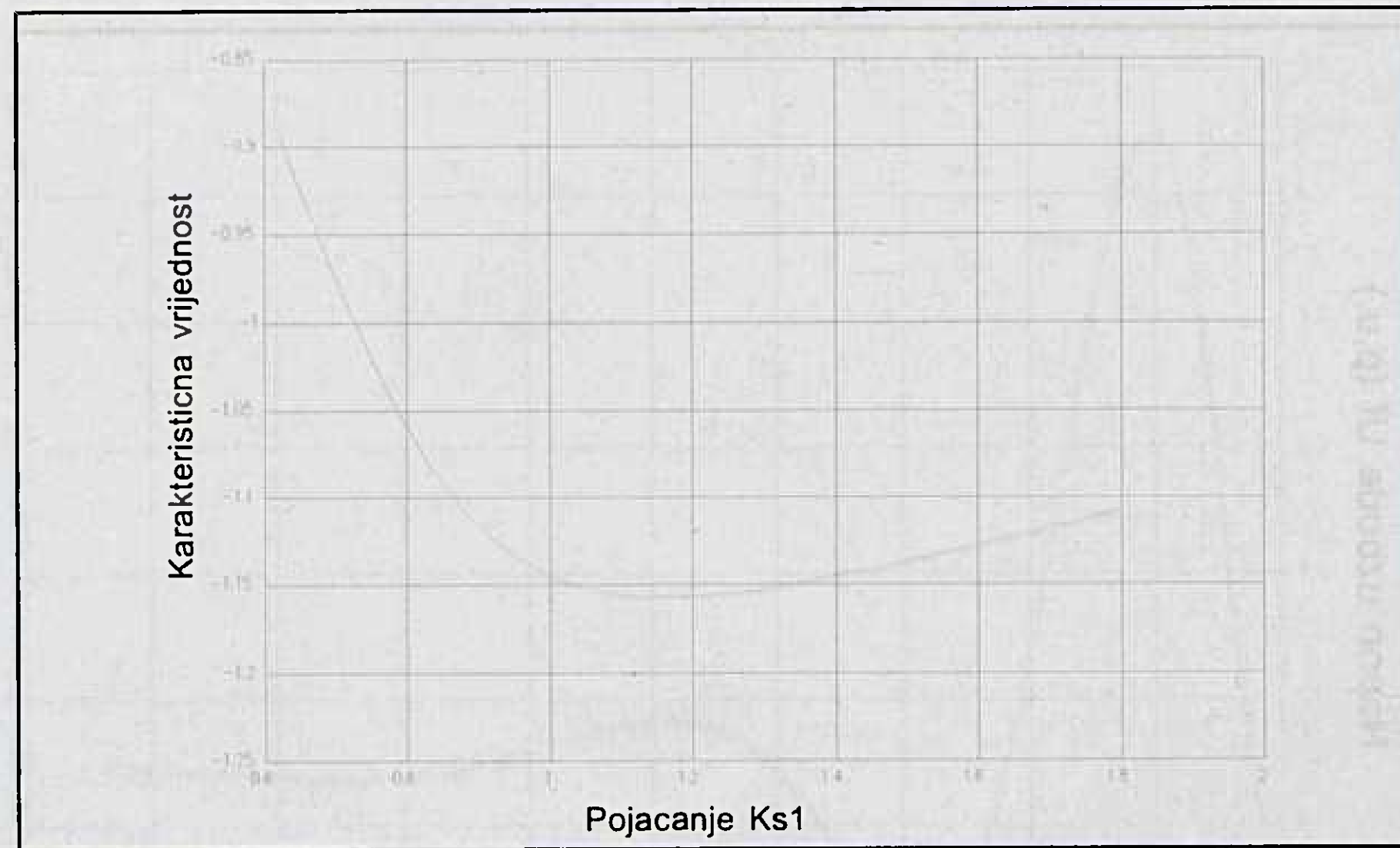
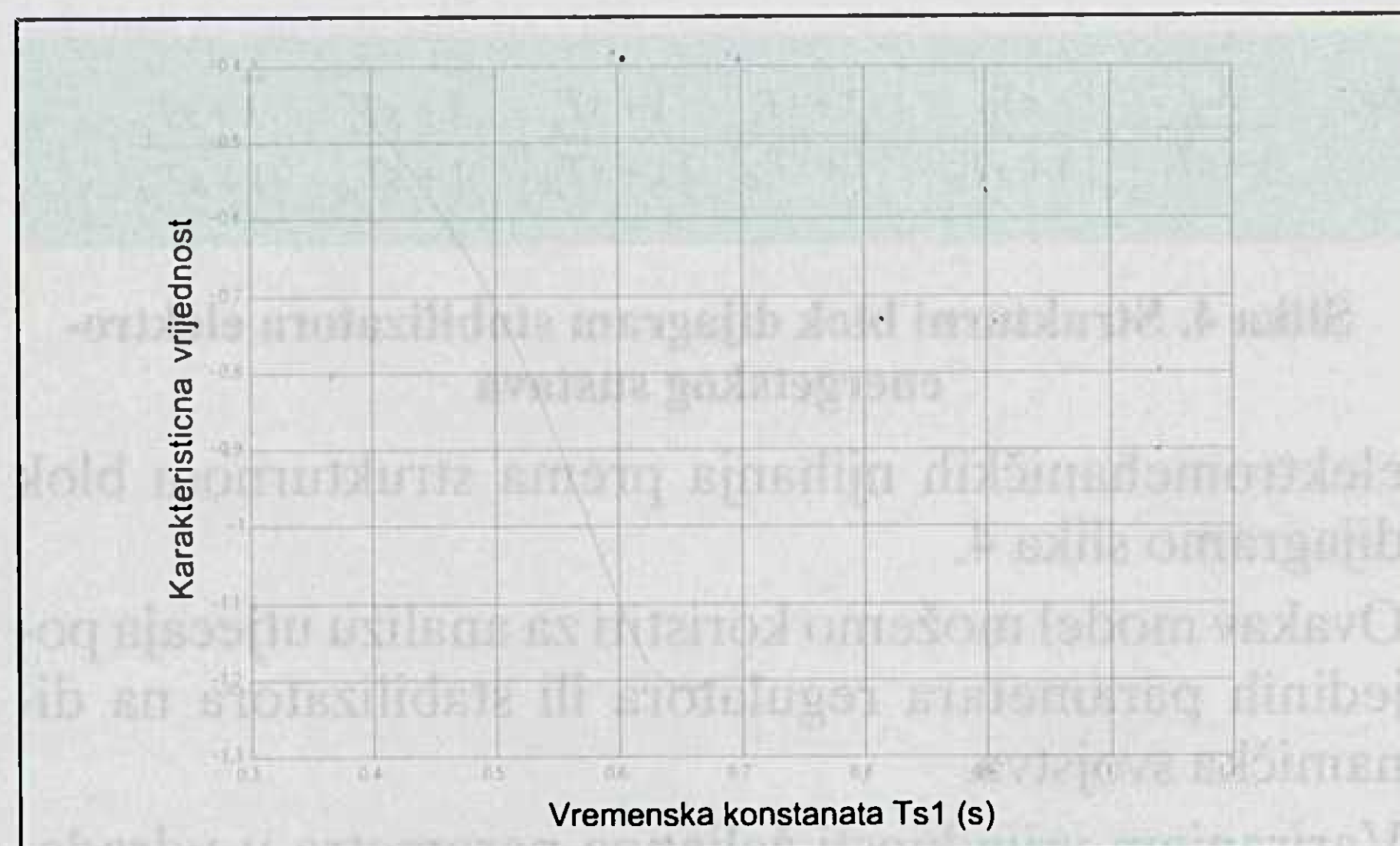
Predloženim postupkom postiže se optimalno podešenje i dovoljna udaljenost od granica stabilnosti. Iznos stabilizirajućeg signala je minimalan što je važno iz najmanje dva razloga, prvi je minimalno opterećenje komponenti sustava uzbude a drugi opseg rada ispod podešenih ograničenja ili prirodnog zasićenja komponenti, dakle u linearnom području za koje je proračun i vršen.

Sa većim iznosom izlaznog signala možemo postići jednaki iznos prigušenja sustava ali to podrazumijeva i promjenu imaginarnog dijela karakterističnih vrijednosti, odnosno promjenu vlastitih frekvencija sustava.

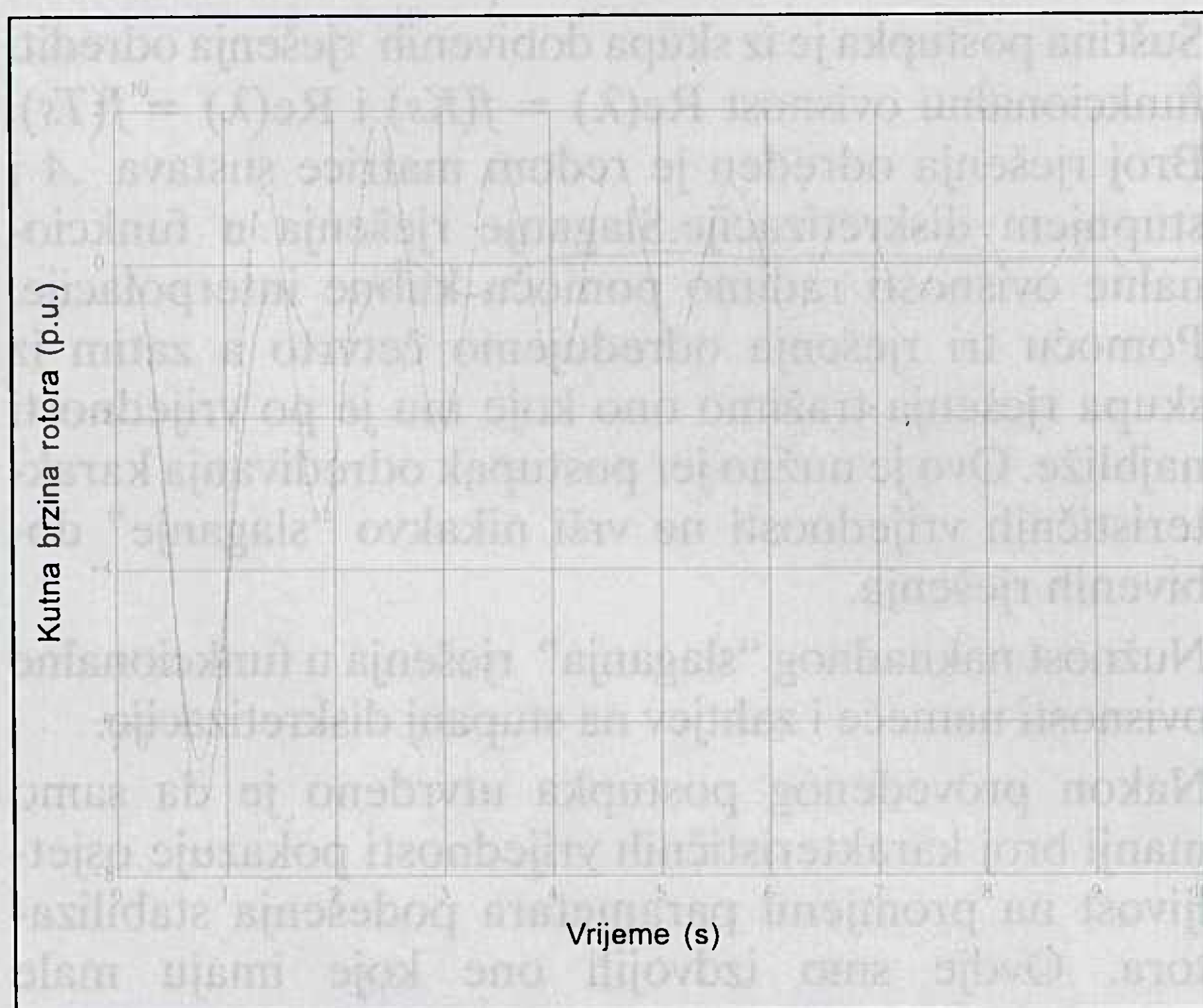
Na slici 6 vidljiva je visoka efikasnost ovako parametrisiranog stabilizatora.

Postavljeni model omogućava i analizu utjecaja podešenja parametara regulatora, Analizom osjetljivosti parametara regulatora mogli bi odrediti optimalno podešenje čitavog sustava.

Zamisliv je i programski dakle neinteraktivni postupak koji bi potpuno automatizirao navedeni proračun.



Slika 5. Osjetljivost realnog dijela karakteristične vrijednosti matrice sustava na promjene parametara stabilizatora elektromehaničkih njihanja za seriju od tri derivacijska člana



Slika 6. Usporedni prikaz kutne brzine generatora na skok referentnog napona od 0.1 (p.u.) za nestabilizirani i stabilizirani regulator

3. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan postupak i dobiveni rezultati proračuna parametara stabilizatora elektroenergetskog sustava. Korišten je numerički postupak koji je proveden na masovno dostupnim računalima. Navedenim postupkom možemo izuzetno složen problem parametriranja svesti na obični tablični postupak. Rezultati osjetljivosti daju i dobar uvid u kritičnost podešenja pojedinih vrijednosti.

Proračuni i simulacije izvedene su koristeći programski paket *Matlab*.

Kvaliteta razmatranog postupaka se može verificirati jedino mjerenjem na realnom sustavu, takva mjerenja omogućila bi i provjeru točnost postavljenog modela. Osim provjere točnosti, ciljana mjerenja stavila bi nam na raspolaganje rezultate pomoću kojih bi mogli dobiti model zadovoljavajuće točnosti za ulaz u proračun.

Tablica 2.

Nazivna prividna snaga	S_n	120 MVA
Nazivni napon	U_n	14400 kV
Nazivna struja	I_n	4811
Nazivni faktor snage	$\cos \varphi$	0.9
Nazivna djelatna snaga	P_n	108 MW
Uzdužna sinkrona reaktancija	X_d	0.860 pu
Uzdužna prijelazna reaktancija	X_d'	0.261 pu
Uzdužna početna reaktancija	X_d''	0.198 pu
Poprečna sinkrona reaktancija	X_q	0.506 pu
Poprečna početna reaktancija	X_q''	0.198 pu
Inverzna reaktancija	X_2	0.1965 pu
Nulta reaktancija	X_0	0.1254 pu
Prijelazna vremenska konstanta -prazni hod	T_d'	10.2 s
Mehanička vremenska konstanta	T_M	4200 tm ²

POPIS OZNAKA

- x_d – Sinhrona reaktancija u uzdužnoj osi
- x_d' – Prolazna reaktancija u uzdužnoj osi
- x_q – Sinhrona reaktancija u poprečnoj osi
- x_f – Reaktancija uzbuđenog namota
- r_f – Otpor uzbuđenog namota
- x_D – Reaktancija prigušenog namota u uzdužnoj osi
- x_Q – Reaktancija prigušenog namota u poprečnoj osi
- r_D – Otpor prigušenog namota u uzdužnoj osi
- r_Q – Otpor prigušenog namota u poprečnoj osi
- ω_s – Sinhrona kutna brzina
- r_a – Otpor statorskog namota
- x_l – Rasipna reaktancija statorskog namota
- x_{ad} – Reaktancija između statorskog i uzbuđenog namota u uzdužnoj osi
- x_{aq} – Reaktancija između statorskog i uzbuđenog namota u poprečnoj osi

x_m – Reaktancija do krute mreže
 $x_{d\Sigma} = x_d + x_m$
 $x_{q\Sigma} = x_q + x_m$
 $x_{q\Sigma'} = x_{q'} + x_m$
 $T_{do'}$ – Vremenska konstanta uzbuđenog namota uz otvoren statorski namot
 T_d' – Vremenska konstanta uzbuđenog namota uz kratkospojeni statorski namot
 P – Radna snaga generatora
 Q – Jalova snaga generatora
 U_2 – Napon generatora
 e – Napon uzbude
 δ – Kut opterećenja
 ω – Kutna brzina
 I_f – Struja uzbude
 I_d – Komponenta struje statora u uzdužnoj osi
 I_q – Komponenta struje statora u poprečnoj osi
 I_D – Komponenta struje prigušenog namota u uzdužnoj osi
 I_Q – Komponenta struje prigušenog namota u poprečnoj osi
 Ψ_d – Komponenta statorskog toka u uzdužnoj osi
 Ψ_q – Komponenta statorskog toka u poprečnoj osi
 Ψ_f – Tok uzbuđenog namota
 Ψ_D – Komponenta toka prigušenog namota u uzdužnoj osi
 Ψ_Q – Komponenta toka prigušenog namota u poprečnoj osi
 m_i – Moment na osovini generatora
 U_m – Napon krute mreže
 U_r – Referentna vrijednost napona generatora
 U_d – Komponenta napona generatora u uzdužnoj osi
 U_q – Komponenta napona generatora u poprečnoj osi
 D – Faktor prigušenja

LITERATURA

- [1] M. JADRIĆ B. FRANČIĆ: "Dinamika električnih strojeva", Sveučilište u Splitu, 1997. godine
- [2] V. A. VENIKOV: "Transient processes in electrical power system", Mir Publisher Moscow, 1977. godina
- [3] V. ČESIĆ i T. CIGIĆ: "Istraživanje i razvoj sistema mikroprocesorskog upravljanja električkim strojevima i srodnim brzim procesima", *Končar*, 1988. godine
- [4] M. STOJSAVLJEVIĆ: "Utjecaj dodatnih regulacijskih signala regulatora napona sinhronih generatora na elektromehanička njihanja", Magistarski rad, Elektrotehnički fakultet, 1982. godine
- [5] M. MEHMEDOVIĆ: "Identifikacija parametara sustava regulacije uzbude sinkronih strojeva", doktorska dizertacija, Zagreb, 1995
- [6] M. STOJSAVLJEVIĆ, M. MEHMEDOVIĆ, D. NEMEC i E. VARGOVIĆ: "Izveštaj o ispitivanju sustava regulacije uzbude i ponašanju agregata", HE Dubrovnik, 1997. godina
- [7] GENERAL ELECTRIC Voltage regulator equipment, Tehnička dokumentacija proizvođača regulatora napona generatora u HE Dubrovnik, 1964
- [8] A. B. R. KUMAR: "An Optimal control law by eigenvalue assignment for improved dynamic stability in power system", IEEE Transactions on power apparatus and system, June 1982
- [9] C. T. Tse and S. K. TSO: "Design optimisation of power system stabilisers based on modal and eigenvalue sensitivity analyses", IEE proceedings, septembar 1988.
- [10] M. MIŠKOVIĆ "Utjecaj vanjske reaktancije na elektromehanička njihanja elektroagregata", magistarska radnja Zagreb, 1999.

OPTIMISATION OF ELECTRIC POWER SYSTEM STABILISER FITTING BY SENSITIVITY ANALYSES OF CHARACTERISTIC VALUES

The paper analyses the possibilities of optimal electric power system's stabiliser parameters fitting in order to obtain maximal smother of electric mechanical swinging of generator operation values. A completely numerical model is analysed that requires a mathematical model, by structure and parameters adequate to a real system. This procedure results in the functional dependence of characteristic system values on the figures of adapted parameters of electric power system's stabiliser, thus turning the parameter calculation into the minimum function determination.

EINSTELLUNGSOPTIMIERUNG DES STABILISATORS IM STROMVERSORGUNGSSYSTEM MITTELS EMPFINDLICHKEITSPRÜFUNG SEINER KENNZEICHNENDEN GRÖSSEN

Im Artikel setzt man sich mit der Möglichkeit der optimalen Einstellung von Parametern des Stabilisators des Stromversorgungssystems, mit dem Zweck grösstmöglicher Dämpfung elektromagnetischer Schwingungen von Betriebsgrößen des Generators, auseinander. Betrachtet wird das rein numerische Verfahren, welches ein mathematisches Modell verlangt, dessen Struktur und Parameter dem eigentlichen System entsprechen. Durch dieses Verfahren kommt man zur Funktion der Abhängigkeit kennzeichnender Werte des Versorgungssystems von den Beträgen einstellbarer Parameter seines Stabilisators, wodurch die Berechnung von Parametern auf die Bestimmung des Minimums der oben erwähnten Funktion zurückgeführt wird.

Naslov pisca:

Mato Mišković, dipl. ing.
HEP – HE Dubrovnik
Ante Starčevića 51
20000 Dubrovnik, Hrvatska

Uredništvo primilo rukopis:
 1999-11-30.