

# UTJECAJ VREMENA DISKRETIZACIJE I ŠUMA NA ODREĐIVANJE PARAMETARA LINEARNOG KONTINUIRANOG MODELA SUSTAVA REGULACIJE PARNE TURBINE

P. Crnošija, T. Bjažić, B. Bošnjak  
Fakultet elektrotehnike i računarstva  
Unska 3, Zagreb, Hrvatska  
Tel.: +385 1 6129 849, Faks: + 385 1 6129 809  
E-mail: petar.crnosija@fer.hr

**Sažetak - Za eksperimentalno određivanje modela neophodno je odrediti utjecaj vremena diskretizacije signala i šuma u mjernom signalu na točnost određivanja parametara modela sustava. U ovom je radu opisan postupak određivanja linearnog kontinuiranog dinamičkog modela sustava regulacije parne turbine uz primjenu Matlaba za simuliranje i optimiranje parametara prijenosnih funkcija. Određena je maksimalna vrijednost vremena diskretizacije i razrađen je način filtriranja signala, kojim se postiže zadovoljavajuća točnost određivanja optimalnih vrijednosti parametara prijenosnih funkcija turbine s kondenzatorom i servo motorom. Dani su odzivi tlaka reguliranog oduzimanja i protutlaka te maksimalne vrijednosti pogreške u prijelaznoj pojavi i pogreške određivanja parametara prijenosnih funkcija uz diskretizaciju signala i prisutnost šuma u mjernom signalu.**

## I. UVOD

Za projektiranje regulatora koristi se matematički model dinamike sustava regulacije parne turbine, koji je moguće odrediti analitičkim postupkom i eksperimentalno. Eksperimentalno određivanje dinamičkog modela i parametara modela zahtijeva snimanje i analizu prijelaznih pojava sustava regulacije [1, 2, 3]. Znatno ubrzanje eksperimentalnog postupka određivanja oblika i optimalnih parametara prijenosnih funkcija postiže se razradom i provjerom tog postupka simuliranjem na računalu. U [4] je opisan postupak za određivanje linearnog kontinuiranog dinamičkog modela sustava regulacije parne turbine uz korištenje nelinearnog kontinuiranog modela te Matlaba za simuliranje sustava i optimiranje parametara prijenosnih funkcija [5]. Određeni su najpovoljniji oblici i optimalne vrijednosti parametara prijenosnih funkcija hidrauličkog servo motora te turbine s kondenzatorom i servo motorom, kojima se postiže najmanja vrijednost pogreške u prijelaznoj pojavi u odnosu na nelinearni dinamički model sustava regulacije parne turbine 30 MW u EL-TO Zagreb. Izvedba i rad sustava sustava regulacije parne turbine opisani su u [6]. Metode optimiranja parametara opisane su u [5, 7, 8, 9, 10].

U ovom je radu opisan utjecaj vremena diskretizacije signala i šuma u mjernom signalu na točnost određivanja optimalnih vrijednosti parametara linearnog kontinuiranog modela sustava regulacije parne turbine 30 MW u EL-TO Zagreb.

U drugom poglavlju dan je prikaz sustava regulacije parne turbine 30 MW u EL-TO Zagreb.

Utjecaj vremena diskretizacije mjernih signala na točnost određivanja optimalnih vrijednosti parametara

linearnog kontinuiranog modela servo motora i sustava regulacije parne turbine dan je u trećem poglavlju.

Način filtriranja šuma u mjernom signalu i utjecaj šuma na maksimalnu vrijednost pogreške u prijelaznoj pojavi i pogrešku određivanja optimalnih vrijednosti parametara linearnog kontinuiranog modela servo motora i sustava regulacije parne turbine opisan je u četvrtom poglavlju. Zaključna razmatranja navedena su u petom poglavlju, a korištena literatura navedena je u šestom poglavlju.

## II. PRIKAZ STRUKTURE SUSTAVA REGULACIJE PARNE TURBINE 30 MW U EL-TO ZAGREB

Parnoturbinsko postrojenje snage 30 MW instalirano u EL-TO Zagreb sastoji se od protutlačne parne turbine s reguliranim oduzimanjem pare, grijućeg kondenzatora, kondenzatnih pumpi, parnog ejektora, otplinjača, napojnih pumpi i visokotlačnog regenerativnog zagrijača. Para iz reguliranog oduzimanja koristi se za toplinske potrošače i za visokotlačni regenerativni zagrijač napojne vode. Manji dio pare iz nereguliranog oduzimanja koristi se za toplinske potrošače nižeg tlaka i za otplinjač. Izlazna para iz turbine koristi se u grijućim kondenzatorima za grijanje mrežne vode.

Regulacijski sustav protutlačne turbine s reguliranim oduzimanjem pare sastoji se od sljedećih osnovnih dijelova: hidrauličkih i mikroprocesorskih regulatora brzine vrtnje, tlaka oduzete pare i tlaka izlazne pare, parorazvodnih ventila visokog tlaka (VT) i niskog tlaka (NT), krilnih servo motora s razvodnom osovinom za parorazvodne ventile visokog tlaka (VT) i niskog tlaka (NT). Regulacijski sustav turbine namijenjen je za reguliranje triju fizikalnih veličina: brzine vrtnje, tlaka reguliranog oduzimanja pare i protutlaka izlazne pare. Zbog toga je regulacijski sustav turbine izveden s tri regulatora: brzine vrtnje, tlaka oduzimate pare i protutlačne pare. Budući da na turbini postoje samo dvije grupe ventila sa servo motorima: visokog tlaka (VT) i niskog tlaka (NT), nikada ne mogu istovremeno djelovati sva tri regulatora. Iz tog proizlazi da je kod ove turbine moguće odvojeno ili zajedničko djelovanje sljedećih regulatora: brzine vrtnje, tlaka oduzete pare, tlaka izlazne pare, brzine vrtnje i tlaka oduzete pare (u otočnom režimu rada), tlaka oduzimate pare i protutlaka izlazne pare (kada je agregat sinkroniziran s mrežom).

Linearni kontinuirani dinamički model servo motora te turbine s kondenzatorom i servo motorima određen je za slučaj sinkronizacije generatora s mrežom. U tom su slučaju ulazne (upravljačke i poremećajne) veličine u turboagregat:

- $u_{VT}$  - upravljački signal prema servo motoru regulacijskih ventila VT dijela turbine,
- $u_{NT}$  - upravljački signal prema servo motoru regulacijskih ventila NT dijela turbine,
- $D_e$  - protok pare prema potrošačima na reguliranom oduzimanju pare,
- $\vartheta_v$  - srednja temperatura zagrijavane vode u ogrjevnim kondenzatorima.

Izlazne veličine iz turboagregata su:

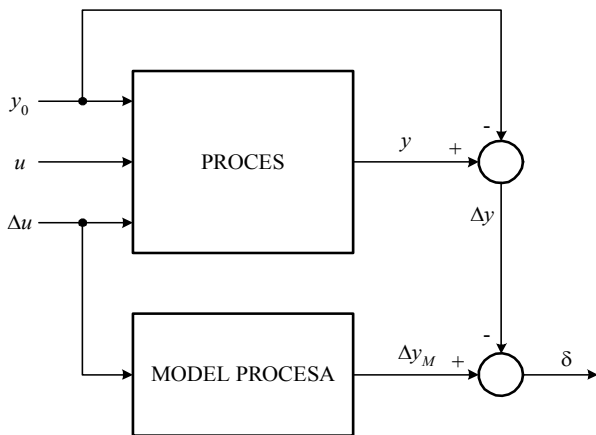
- $p_e$  - tlak pare na reguliranom oduzimanju,
- $p_p$  - protutlak, tj. tlak pare na izlazu iz turbine i
- $P_T$  - mehanička snaga turbine.

### III. UTJECAJ VREMENA DISKRETIZACIJE SIGNALA NA TOČNOST ODREĐIVANJA OPTIMALNIH PARAMETARA MODELA SUSTAVA REGULACIJE PARNE TURBINE

Postupak određivanja oblika prijenosnih funkcija linearnog kontinuiranog modela i optimalnih parametara tih prijenosnih funkcija sustava prikazan je na Sl. 1. U ovom je radu umjesto realnog procesa upotrebljen nelinearni dinamički model parne turbine s kondenzatorom i hidrauličkim servo motorom, pojačalom i H/M pretvornikom, koji je 9. reda, a za linearni kontinuirani model procesa odabrane su prijenosne funkcije 3. i 4. reda, kojima se postiže zadovoljavajuće mali iznos pogreške aproksimacije odziva procesa.

Na ulaz linearnog kontinuiranog modela procesa (sustava) treba dovesti promjenu ulaznog signala  $\Delta u$  pa se na izlazu dobije  $\Delta y_M$  (Sl. 1.). Oduzimanjem početnog uvjeta  $y_0$  od izlaznog signala  $y$ , generira se promjena izlaznog signala procesa (nelinearnog modela procesa):  $\Delta y = y - y_0$ . Pogreška linearnog kontinuiranog modela procesa jednaka je razlici odziva linearnog modela procesa i odziva procesa:  $\delta = \Delta y_M - \Delta y$ .

Optimalne vrijednosti parametara prijenosnih funkcija određene su primjenom Matlaba i simpleks metode optimiranja parametara. Kao kriterij optimiranja parametara korišten je integral kvadrata pogreške  $\delta$ .



Sl. 1. Blokova shema postupka optimiranja parametara prijenosnih funkcija servo motora i turbine s kondenzatorom i servo motorom.

Utjecaj vremena diskretizacije na točnost određivanja optimalnih parametara prijenosnih funkcija određen je za servo motor i turbinu s kondenzatorom i servo motorom. Za linearni kontinuirani model servo motora odabran je najpovoljniji oblik prijenosne funkcije (trećeg reda):

$$G_{M3}(s) = \frac{Y_M(s)}{U(s)} = \frac{K_M(1+b_1s)}{(1+a_1s+a_2s^2)(1+a_3s)}. \quad (1)$$

Za ispitivanje utjecaja vremena diskretizacije na točnost određivanja optimalnih vrijednosti parametara linearnog kontinuiranog modela servo motora na izlaz iz nelinearnog i linearnog modela, odnosno nakon generiranja pogreške  $\delta$  (Sl. 1.), dodan je ekstrapolator nultog reda (ZOH). Točnost određivanja optimalnih vrijednosti parametara ispitana je za početnu vrijednost i promjenu ulaznog signala u servo motor visokog tlaka:  $u_{VT}(0) = 0.5$  i  $\Delta u_{VT}(t) = 0.1S(t-0.1)$ .

Rezultati optimiranja parametara prijenosne funkcije (1) za različite vrijednosti vremena diskretizacije  $T_d$  pokazuju da vrijeme diskretizacije  $T_d$  do iznosa 50 ms praktički ne utječe na točnost određivanja optimalnih vrijednosti parametara prijenosne funkcije. No međutim, preporučljivo je da vrijeme diskretizacije signala servo motora bude manje od 50 ms, budući da je najmanja vremenska konstanta prijenosne funkcije (1) reda veličine  $T_3 = a_3 \approx 50$  ms. Prijelazna pojava pogreške ( $\delta = e_1$ ) za vrijeme diskretizacije  $T_d=10$ ms prikazana je na slici 2.

Za linearne modele snage  $\Delta PT_M$ , tlaka reguliranog oduzimanja  $\Delta p_{eM}$  i protutlaka  $\Delta p_{pM}$ , kojima se postiže najbolja aproksimacija ponašanja nelinearnog modela na promjenu ulazne veličine u servo motor visokog tlaka  $\Delta u_{VT}(t)$ , tj. najmanja vrijednost maksimalne pogreške u prijelaznoj pojavi, nakon detaljnijeg istraživanja dobivene su prijenosne funkcije:

$$G_{VTP1}(s) = \frac{\Delta PT_M(s)}{\Delta U_{VT}(s)} = K_{V1} \frac{1+b_{V1}s}{(1+T_{V11}s)(1+T_{V12}s)(1+T_{V13}s)(1+T_{V14}s)} \quad (2)$$

$$G_{VTP2}(s) = \frac{\Delta p_{eM}(s)}{\Delta U_{VT}(s)} = \frac{K_{V2}}{(1+T_{V21}s)(1+T_{V22}s)(1+T_{V23}s)}, \quad (3)$$

$$G_{VTP3}(s) = \frac{\Delta p_{pM}(s)}{\Delta U_{VT}(s)} = \frac{K_{V3}}{(1+T_{V31}s)(1+T_{V32}s)(1+T_{V33}s)(1+T_{V34}s)}. \quad (4)$$

Za linearne modele snage  $\Delta PT_M$ , tlaka reguliranog oduzimanja  $\Delta p_{eM}$  i protutlaka  $\Delta p_{pM}$ , kojima se postiže najbolja aproksimacija ponašanja nelinearnog modela na promjenu ulazne veličine u servo motor niskog tlaka  $\Delta u_{NT}(t)$ , nakon detaljnijeg istraživanja dobivene su prijenosne funkcije:

$$G_{NTP1}(s) = \frac{\Delta P T_M(s)}{\Delta U_{NT}(s)} = K_{N1} \frac{1 + b_{N1}s}{(1 + T_{N11}s)(1 + T_{N12}s)}, \quad (5)$$

$$G_{NTP2}(s) = \frac{\Delta p_{eM}(s)}{\Delta U_{NT}(s)} = \frac{K_{N2}}{(1 + T_{N21}s)(1 + T_{N22}s)}, \quad (6)$$

$$G_{NTP3}(s) = \frac{\Delta p_{pM}(s)}{\Delta U_{NT}(s)} = \frac{K_{N3}s}{(1 + T_{N31}s)(1 + T_{N32}s)(1 + T_{N33}s)(1 + T_{N34}s)}. \quad (7)$$

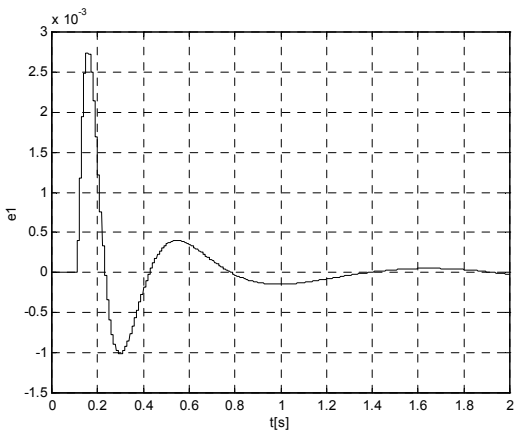
Za korak integracije  $t_i = h = 10$  ms i vrijednosti vremena diskretizacije signala pogreške  $T_d = (10 - 50)$  ms optimiranjem parametara prijenosnih funkcija (2) - (7) dobivene su vrijednosti parametara i maksimalne vrijednosti pogreške u prijelaznoj pojavi kao i u slučaju korištenja kontinuiranih signala (0.3-3%).

#### IV. UTJECAJ ŠUMA U IZLAZNOM SIGNALU NA TOČNOST ODREĐIVANJA OPTIMALNIH PARAMETARA MODELA SUSTAVA REGULACIJE PARNE TURBINE

Utjecaj šuma na točnost određivanja optimalnih vrijednosti parametara linearnog kontinuiranog modela servo motora i turbine s kondenzatorom i servo motorom ispitan je dodavanjem signala generatora šuma izlaznom signalu procesa (Sl. 1.). Filtriranje signala je obavljeno filtriranjem signala pogreške  $\delta$ . Pri tome je korišten filter prvog reda, koji ima koeficijent pojačanja  $K_f = 1$  i vremensku konstantu  $T_f$ :

$$G_f(s) = \frac{Y_f(s)}{Y_s(s)} = \frac{1}{1 + T_f s}. \quad (8)$$

Optimiranje parametara prijenosne funkcije servo motora visokog tlaka (1) obavljeno je uz početni uvjet  $u_{VT}(0) = 0.5$  i promjenu ulazne veličine  $\Delta u_{VT}(t) = 0.1S(t-0.1)$ . Vrijeme diskretizacije signala pogreške iznosilo je  $T_d = 1$  i 5 ms, a realizirano je dodavanjem ekstrapolatora nultog reda (ZOH) iza signala pogreške. Pri tome su korištene različite amplitude signala šuma:  $y_s=0.01, 0.02$  i  $0.05$ , koje odgovaraju iznosu od 10%, 20% i 50% iznosa



Sl. 2. Prijelazna pojava pogreške linearnog modela servo motora (1)  $\delta = e_1$  za  $y_{VT}(0) = 0.5$ ,  $\Delta u_{VT}(t) = 0.1S(t-0.1)$  i  $T_d = 10$  ms.

promjene izlaznog signala ( $\Delta y_{VT}=0.1$ ). Vrijeme diskretizacije signala generatora šuma iznosilo je  $T_{ds}=T_d=1$  i 5ms. Osim toga, ispitivanje utjecaja šuma obavljeno je uz različite vrijednosti vremenskih konstanti filtera:  $T_f=10, 20, 50$  i 100ms.

Vrijednosti parametara dobivene optimiranjem uz prisustvo signala šuma, vremena diskretizacije pogreške i signala šuma  $T_{ds}=T_d=1$ ms te bez filtriranja signala pogreške, znatnije ovise o amplitudi signala šuma  $y_s$ . Filtriranjem signala pogreške smanjuje se maksimalna vrijednost pogreške u prijelaznoj pojavi i povećava se točnost izračunavanja parametara.

Za amplitudu signala šuma  $y_s=0.01$  i vremensku konstantu filtera  $T_f=50$ ms maksimalna vrijednost filtrirane pogreške u prijelaznoj pojavi reda je veličine pogreške bez prisustva signala šuma ( $e_{1m}=2.6\%$ ), a optimalne vrijednosti parametara reda su veličine optimalnih vrijednosti parametara bez prisustva signala šuma. Maksimalna filtrirana pogreška u stacionarnom stanju  $e_{1fs}$  [%] približno je proporcionalna maksimalnoj vrijednosti signala šuma, ali je filterom s vremenskom konstantom  $T_f=50$ ms približno je 10 puta manje od maksimalne vrijednosti signala šuma  $y_s$ .

Za amplitude signala šuma  $y_s=0.05$ , tj. 50% iznosa promjene izlaznog signala, maksimalna vrijednost filtrirane pogreške u prijelaznoj pojavi približno je dvostruko veća nego u slučaju bez signala šuma, a optimalne vrijednosti vremenskih konstanti se znatnije razlikuju (20 - 30%).

Prijelazna pojava filtrirane pogreške za slučaj:  $u_{VT}(0) = 0.5$ ,  $\Delta u_{VT}(t) = 0.1S(t-1)$ ,  $y_s = 0.01$ ,  $T_{ds} = T_d = 1$  ms i  $T_f = 50$  ms prikazana je na slici 3. Maksimalna vrijednost pogreške u prijelaznoj pojavi približno je jednaka vrijednosti te pogreške kada ne postoji signal šuma (Sl. 2). U stacionarnom stanju maksimalna vrijednost filtrirane pogreške iznosi  $e_{1fs}=0.001$ , tj. oko 1% iznosa promjene izlaznog signala ( $\Delta y_{VT}=0.1$ ). Budući da je maksimalna vrijednost signala generatora šuma  $y_s=0.01$ , filtriranjem signala pogreške približno je 10 puta smanjen utjecaj šuma na iznos maksimalne vrijednosti pogreške u stacionarnom stanju.

Za manje vrijednosti vremenske konstante filtera:  $T_f=10$  ms (20ms) povećava se maksimalna vrijednost filtrirane pogreške u prijelaznoj pojavi:  $e_{1fm}=3.54\%$  (3.07%) i maksimalna vrijednost filtrirane pogreške u stacionarnom stanju:  $e_{1f}=2.8\%$  (1.8%).

Povećanjem vremena diskretizacije signala pogreške na  $T_d=5$  ms i optimiranjem parametara prijenosne funkcije (1) bez prisustva signala šuma dobiju se iste vrijednosti parametara i maksimalne vrijednosti pogreške kao i u slučaju vremena diskretizacije  $T_d=1$  ms. Dodavanjem signala šuma, uz vrijeme generiranja tog signala  $T_{ds}=T_d=5$ ms, dobiju se optimalne vrijednosti parametara prijenosne funkcije (1) i maksimalne vrijednosti pogreške u prijelaznoj pojavi, koje se ne razlikuju znatnije od vrijednosti dobivenih uz vrijeme diskretizacije  $T_{ds}=T_d=1$ ms. Maksimalna vrijednost pogreške u stacionarnom stanju za  $T_{ds}=T_d=5$ ms oko 2 puta je veća nego za  $T_{ds}=T_d=1$ ms.

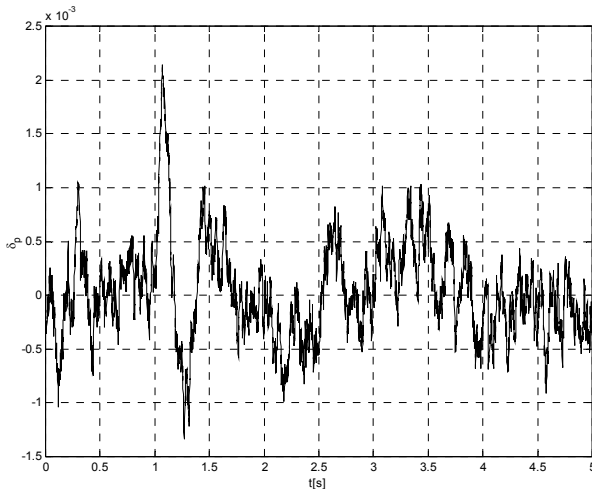
Utjecaj šuma na točnost određivanja optimalnih vrijednosti parametara linearnog kontinuiranog modela turbine s kondenzatorom i servo motorom ispitan je dodavanjem signala generatora šuma izlaznim signalima,

budući da se šum obično pojavljuje u mjernom signalu, te ekstrapolatora nultog reda (ZOH) i filtera nakon generiranja signala pogreške  $\delta$ . Pri tome je korišten filter prvog reda, koji ima koeficijent pojačanja  $K_f=1$  i vremensku konstantu  $T_f$  (8). Za vrijeme diskretizacije signala generatora šuma i pogreške odabrana je vrijednost  $T_d=5$ ms. Utjecaj signala šuma ispitan je uz razinu tog signala 10% promjene izlazne veličine:  $\Delta y_s=0.1\Delta y$  te vrijeme diskretizacije signala šuma i signala pogreške  $T_d=5$ ms.

Za prijenosnu funkciju snage  $PT_M$  u slučaju promjene ulazne veličine u servo motor visokog tlaka  $u_{VT}$  (2) diskretizacija signala uz  $T_d=5$  ms ne povećava maksimalnu vrijednost pogreške u prijelaznoj pojavi ( $\delta_{rm}=0.86\%$ ), a pogreška određivanja parametara je veoma malog iznosa. Uz prisustvo signala šuma pogreška određivanja optimalnih vrijednosti koeficijenata prijenosne funkcije (2) veoma je malog iznosa (1-2%).

No međutim, signal šuma znatno povećava maksimalnu vrijednost pogreške u prijelaznoj pojavi. Tako npr. uz djelovanje signala šuma i bez filtera ( $T_f=0$ ) maksimalna vrijednost pogreške iznosi  $\delta_{rm}=15.5\%$ . Za vremensku konstantu filtera  $T_f=50$ ms maksimalna vrijednost pogreška iznosi  $\delta_{rm}=2.99\%$ , tj. oko 5 puta je manja nego u slučaju bez filtera, ali je oko 3.5 puta veća nego u slučaju bez signala šuma ( $\delta_{rm}=0.86\%$ ).

Za prijenosnu funkciju tlaka reguliranog oduzimanja  $p_{eM}$  u slučaju promjene ulazne veličine u servo motor visokog tlaka  $u_{VT}$  (3) diskretizacija signala uz  $T_d=5$ ms povećava maksimalnu vrijednost pogreške u prijelaznoj pojavi od  $\delta_{rm}=0.27\%$  na  $\delta_{rm}=0.67\%$ , a pogreška određivanja parametara je veoma malog iznosa za koeficijente  $K_{V2}$ ,  $T_{V21}$  i  $T_{V22}$ , dok je za najmanju vremensku konstantu  $T_{V23}$  pogreška oko 15%. Uz prisustvo signala šuma pogreška određivanja optimalnih vrijednosti koeficijenata prijenosne funkcije (3) veoma je malog iznosa. No međutim, signal šuma znatno povećava maksimalnu vrijednost pogreške u prijelaznoj pojavi. Za vremensku konstantu filtera  $T_f=50$ ms maksimalna vrijednost pogreške iznosi  $\delta_{rm}=3.12\%$ , tj.



Sl. 3. Prijelazna pojava filtrirane pogreške  $\delta_p = e_{Vf}$  za model servo motora (1) uz prisustvo šuma:  $u_{VT}(0) = 0.5$ ,  $\Delta u_{VT}(t) = 0.1S(t-1)$ ,  $y_s = 0.01$ ,  $T_{ds} = T_d = 1$  ms i  $T_f = 50$  ms.

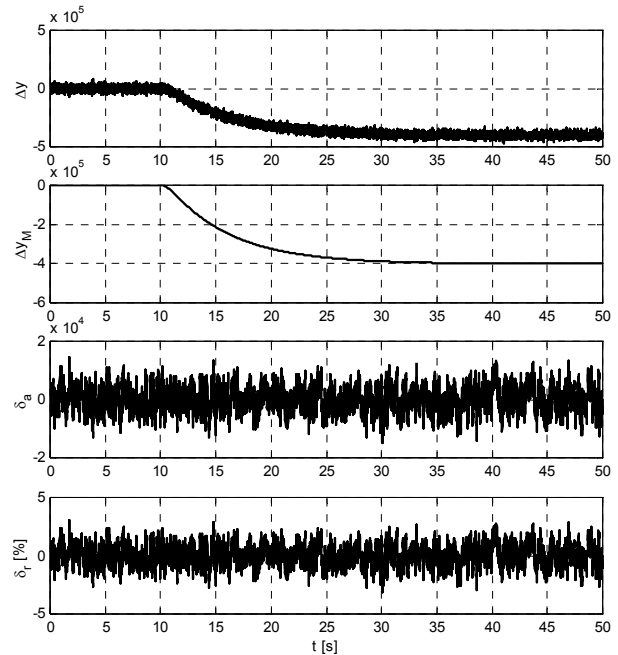
oko 5 puta je manja nego u slučaju bez filtera, ali je oko 4,5 puta veća nego u slučaju bez signala šuma ( $\delta_{rm}=0.67\%$ ).

Na slici 4. prikazana je prijelazna pojava promjene tlaka reguliranog oduzimanja nelinearnog modela turbine s kondenzatorom i servo motorom  $\Delta y = \Delta p_e$ , promjene tlaka reguliranog oduzimanja linearnog modela  $\Delta y_M = \Delta p_{eM}$  te apsolutne pogreške  $\delta_a$  i relativne pogreške  $\delta_r$  [%], uz  $\Delta u_{VT}(t) = -0.1S(t-10)$ ,  $T_d=5$ ms i  $T_f=50$ ms. Iz slike 4. je vidljivo da maksimalna vrijednost pogreške u prijelaznoj pojavi iznosi oko 3% te da je to ujedno i vrijednost pogreške u stacionarnom stanju.

Za prijenosnu funkciju protutlaka  $p_{pM}$  u slučaju promjene ulazne veličine u servo motor visokog tlaka  $u_{VT}$  (4) diskretizacija signala uz  $T_d=5$ ms ne povećava maksimalnu vrijednost pogreške u prijelaznoj pojavi ( $\delta_{rm}=0.5\%$ ), a pogreška određivanja parametara je veoma malog iznosa. Uz prisustvo signala šuma pogreška određivanja optimalnih vrijednosti koeficijenata prijenosne funkcije (4) veoma je malog iznosa. No međutim, signal šuma znatno povećava maksimalnu vrijednost pogreške u prijelaznoj pojavi.

Za vremensku konstantu filtera  $T_f=50$  ms maksimalna vrijednost pogreške iznosi  $\delta_{rm}=2.93\%$ , tj. oko 5 puta je manja nego u slučaju bez filtera, ali je oko 6 puta veća nego u slučaju bez signala šuma ( $\delta_{rm}=0.50\%$ ).

Na slici 5. prikazana je prijelazna pojava promjene protutlaka nelinearnog modela turbine s kondenzatorom i servo motorom  $\Delta y = \Delta p_p$ , promjene protutlaka linearnog modela  $\Delta y_M = \Delta p_{pM}$  te apsolutne pogreške  $\delta_a$  i relativne pogreške  $\delta_r$  [%], za  $\Delta u_{VT}(t) = -0.1S(t-10)$ ,  $T_d=5$  ms i  $T_f=50$  ms. Iz slike 5. je vidljivo da maksimalna vrijednost pogreške u prijelaznoj pojavi iznosi oko 3% te



Sl. 4. Prijelazna pojava promjene tlaka reguliranog oduzimanja nelinearnog modela turbine s kondenzatorom i servo motorom  $\Delta y = \Delta p_e$ , promjene tlaka reguliranog oduzimanja linearnog modela  $\Delta y_M = \Delta p_{eM}$  te apsolutne pogreške  $\delta_a$  i relativna pogreška  $\delta_r$  [%], za  $\Delta u_{VT}(t) = -0.1S(t-10)$ ,  $\Delta y_s = 0.1\Delta y$ ,  $T_d = 5$  ms,  $T_f = 50$ ms.

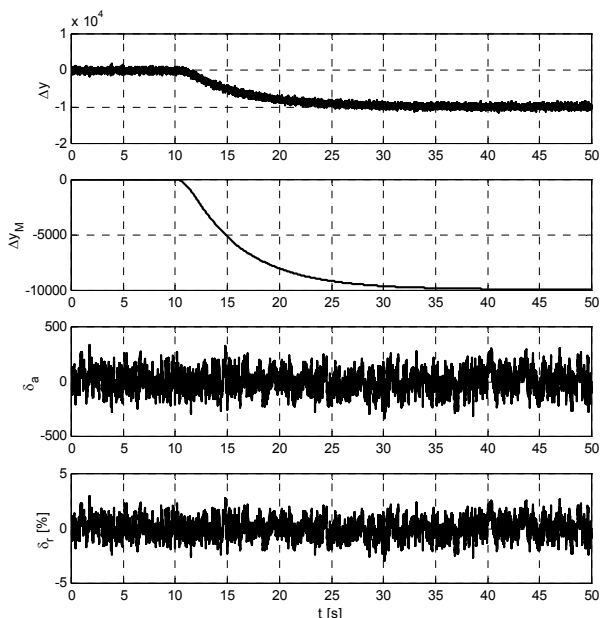
da je to ujedno i vrijednost pogreške u stacionarnom stanju.

Za prijenosnu funkciju snage  $PT_M$  u slučaju promjene ulazne veličine u servo motor niskog tlaka  $u_{NT}$  (5) diskretizacija signala uz  $T_d=5ms$  ne povećava maksimalnu vrijednost pogreške u prijelaznoj pojavi ( $\delta_{rm}=3.16\%$ ), a pogreška određivanja parametara zanemarivo je malog iznosa.

Uz prisustvo signala šuma pogreška određivanja optimalnih vrijednosti koeficijenta prijenosne funkcije (5) veoma je malog iznosa. No međutim, signal šuma znatno povećava maksimalnu vrijednost pogreške u prijelaznoj pojavi. Za vremensku konstantu filtera  $T_f=50ms$  maksimalna vrijednost pogreške iznosi  $\delta_{rm}=3.32\%$ , tj. oko 3 puta je manja nego u slučaju bez filtera i reda je veličine pogreške u slučaju bez signala šuma ( $\delta_{rm}=3.16\%$ ).

Za prijenosnu funkciju tlaka reguliranog oduzimanja  $p_{eM}$  u slučaju promjene ulazne veličine u servo motor niskog tlaka  $u_{NT}$  (6) diskretizacija signala uz  $T_d=5ms$  ne povećava maksimalnu vrijednost pogreške u prijelaznoj pojavi ( $\delta_{rm}=0.59\%$ ), a pogreška određivanja parametara je veoma malog iznosa za koeficijente  $K_{N2}$ ,  $T_{N21}$ , dok je za najmanju vremensku konstantu  $T_{N22}$  pogreška oko 20%. Uz prisustvo signala šuma pogreška određivanja optimalnih vrijednosti koeficijenta prijenosne funkcije (6) veoma je malog iznosa. No međutim, signal šuma znatno povećava maksimalnu vrijednost pogreške u prijelaznoj pojavi. Za vremensku konstantu filtera  $T_f=50ms$  maksimalna vrijednost pogreške iznosi  $\delta_{rm}=3.32\%$ , tj. oko 5.5 puta je manja nego u slučaju bez filtera, ali je oko 5.5 puta veća nego u slučaju bez signala šuma ( $\delta_{rm}=0.59\%$ ).

Na slici 6. prikazana je prijelazna pojava promjene tlaka reguliranog oduzimanja nelinearnog modela turbine



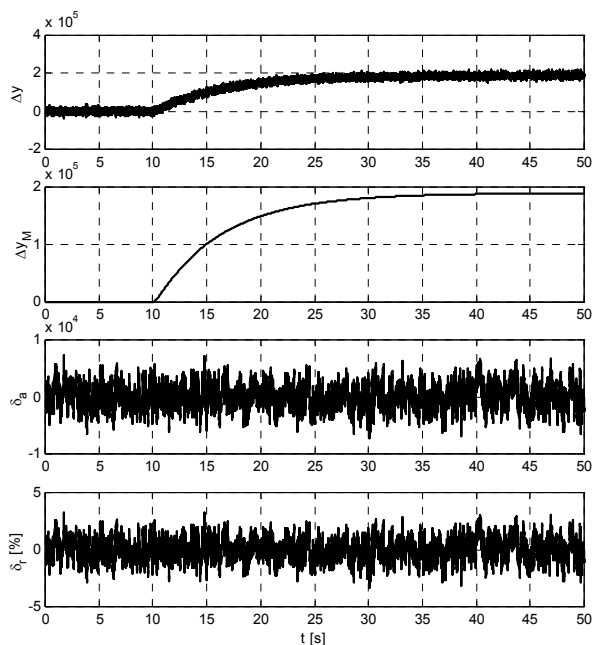
Sl. 5. Prijelazna pojava promjene protutlaka nelinearnog modela turbine s kondenzatorom i servo motorom  $\Delta y = \Delta p_p$ , promjene protutlaka linearnog modela  $\Delta y_M = \Delta p_{pM}$  te apsolutne pogreške  $\delta_a$  i relativne pogreške  $\delta_r$  [%], za  $\Delta u_{NT} = -0.1S(t-10)$ ,  $\Delta y_s = 0.1\Delta y$ ,  $T_d = 5$  ms,  $T_f = 50$  ms.

s kondenzatorom i servomotorom  $\Delta y = \Delta p_e$ , promjene tlaka reguliranog oduzimanja linearnog modela  $\Delta y_M = \Delta p_{eM}$  te apsolutne pogreške  $\delta_a$  i relativne pogreške  $\delta_r$  [%], za  $\Delta u_{NT} = -0.1S(t-10)$ ,  $T_d=5$  ms i  $T_f=5ms$ . Iz slike 6. je vidljivo da maksimalna vrijednost pogreške u prijelaznoj pojavi iznosi oko 3% te da je maksimalna vrijednost pogreške u stacionarnom stanju oko 3%.

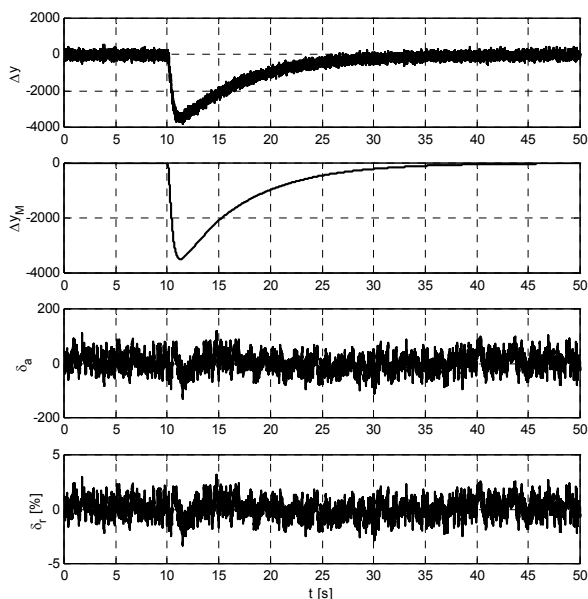
Za prijenosnu funkciju protutlaka  $p_{pM}$  u slučaju promjene ulazne veličine u servo motor niskog tlaka  $u_{NT}$  (7) diskretizacija signala uz  $T_d=5ms$  ne povećava maksimalnu vrijednost pogreške u prijelaznoj pojavi ( $\delta_{rm}=1.5\%$ ), a pogreška određivanja parametara je zanemarivo malog iznosa. Uz prisustvo signala šuma pogreška određivanja optimalnih vrijednosti koeficijenta prijenosne funkcije (7) veoma je malog iznosa. No međutim, signal šuma znatno povećava maksimalnu vrijednost pogreške u prijelaznoj pojavi. Tako npr. uz djelovanje signala šuma i bez filtera ( $T_f=0$ ) maksimalna vrijednost pogreške iznosi  $\delta_{rm} = 14.4\%$ .

Za vremensku konstantu filtera  $T_f = 50$  ms maksimalna vrijednost pogreške pogreška iznosi  $\delta_{rm} = 3.39\%$ , tj. oko 4 puta je manja nego u slučaju bez filtera, ali je oko 2 puta veća nego u slučaju bez signala šuma ( $\delta_{rm} = 1.50\%$ ).

Na slici 7. prikazana je prijelazna pojava protutlaka nelinearnog modela turbine s kondenzatorom i servo motorom  $\Delta y = \Delta p_p$ , promjene protutlaka linearnog modela  $\Delta y_M = \Delta p_{pM}$  te apsolutne pogreške  $\delta_a$  i relativne pogreške  $\delta_r$  [%], za  $\Delta u_{NT} = -0.1S(t-10)$ ,  $T_d=5ms$  i  $T_f=50ms$ . Iz slike 7. je vidljivo da maksimalna vrijednost pogreške u prijelaznoj pojavi iznosi oko 3% te da je maksimalna vrijednost pogreške u stacionarnom stanju oko 3%.



Sl. 6. Prijelazna pojava promjene tlaka reguliranog oduzimanja nelinearnog modela turbine s kondenzatorom i servo motorom  $\Delta y = \Delta p_e$ , promjene tlaka reguliranog oduzimanja linearnog modela  $\Delta y_M = \Delta p_{eM}$  te apsolutne pogreške  $\delta_a$  i relativne pogreške  $\delta_r$  [%], za  $\Delta u_{NT} = -0.1S(t-10)$ ,  $\Delta y_s = 0.1\Delta y$ ,  $T_d=5ms$ ,  $T_f=50ms$ .



Sl. 7. Prijelazna pojava promjene protutlaka nelinearnog modela turbine s kondenzatorom i servo motorom  $\Delta y = \Delta p_p$ , promjene protutlaka linearnog modela  $\Delta y_M = \Delta p_{pM}$  te apsolutne pogreške  $\delta_a$  i relativne pogreške  $\delta_r$  [%], za  $\Delta u_{NT} = -0.1S(t-10)$ ,  $\Delta y_s = 0.1\Delta y$ ,  $T_d = 5\text{ms}$ ;  $T_f = 50\text{ms}$ .

## V. ZAKLJUČAK

U ovom je radu opisan postupak određivanja linearnog kontinuiranog modela sustava regulacije parne turbine u slučaju diskretizacije signala i prisutnost šuma u mjernom signalu.

Prikaz sustava regulacije parne turbine 30 MW u EL-TO Zagreb dan je u drugom poglavlju. Regulacijski sustav turbine namijenjen je za reguliranje triju fizikalnih veličina: brzine vrtnje, tlaka reguliranog oduzimanja pare i protutlaka izlazne pare.

Utjecaj vremena diskretizacije signala  $T_d$  na točnost određivanja optimalnih vrijednosti parametara prijenosnih funkcija kontinuiranih modela opisan je u trećem poglavlju. Dani su najpovoljniji oblici prijenosnih funkcija kontinuiranih modela servo motora te turbine s kondenzatorom i servo motorom za slučajeve promjene ulaznih veličina u servo motore visokog i niskog tlaka.

Optimalne vrijednosti parametara prijenosnih funkcija određene su primjenom Matlaba za simuliranje sustava i simpleks metode za optimiranje parametara sustava.

Maksimalna vrijednost vremena diskretizacije signala kojom se postiže zadovoljavajuća točnost određivanja optimalnih vrijednosti parametara prijenosnih funkcija iznosi:  $T_{dm} = 50\text{ms}$ .

Utjecaj šuma u mjernom signalu na točnost određivanja optimalnih parametara linearnih kontinuiranih modela sustava regulacije parne turbine opisan je u četvrtom poglavlju. Razrađen je način filtriranja signala, kojim se postiže zadovoljavajuća točnost određivanja optimalnih parametara prijenosnih funkcija i smanjuje iznos pogreške u prijelaznoj pojavi i stacionarnom stanju. Kada je u mjernom signalu prisutan šum potrebno je da vrijeme diskretizacije iznosi  $T_d = 5\text{ms}$ , kako bi se postigla relativno mala vrijednost pogreške određivanja optimalnih vrijednosti parametara prijenosnih funkcija. Pri tome je pogreška u prijelaznoj pojavi i stacionarnom stanju proporcionalna iznosu šuma u mjernom signalu. Filterom prvog reda s vremenskom konstantom  $T_f = 50\text{ms}$  smanjuje se te pogreške oko 3 puta.

Rezultati istraživanja utjecaja vremena diskretizacije signala i prisutnosti šuma u mjernom signalu, opisani u ovom radu, omogućavaju snimanje prijelaznih pojava izlaznih veličina u realnim sustavima regulacije parnih turbina te određivanje optimalnih parametara prijenosnih funkcija kontinuiranih modela i regulatora.

## LITERATURA

- [1] L. Ljung, System Identification - Theory for the User, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New York, 1987.
- [2] L. Ljung, System Identification Toolbox Users Guide, The Math Works, Inc., Natick, 1991.
- [3] The Control Handbook, W. S. Levine, CCR Press, 1995.
- [4] P. Crnošija, T. Bjažić, B. Bošnjak, Primjena metoda optimiranja za određivanje linearnog kontinuiranog modela sustava regulacije parne turbine, Zbornik radova 6. Savjetovanje HK CIGRE, Grupa B5 - Zaštita i automatizacija, 177-187, Cavtat, 2003.
- [5] A. Grace, Optimization Toolbox Users Guide, The Math Works, Inc., Natick, 1995.
- [6] B. Staniša, P. Crnošija, Ž. Ban, Analiza izvedbe i načina rada sustava regulacije parne turbine 30 MW u EL-TO Zagreb, Zbornik radov 5. Savjetovanja CIGRE, Pogon i vodenje EES-a, 15-24, Cavtat, 2001.
- [7] G. A. Bekey and W. J. Karplus, Hybrid Computation, John Willey & Sons, Inc., New York, 1968.
- [8] W. E. Biles and J. J. Swain, Optimization and Industrial Experimentation, J. Wiley & Sons, Inc., New York, 1980.
- [9] J. C. Nash, Compact Numerical Methods for Computers: Linear Algebra and Function Minimisation, Adam Hilger Ltd., Bristol, 1979.
- [10] R. J. Ord-Smith and J. Stephenson, Computer Simulation of Continuous Systems, Cambridge University Press, Cambridge, 1975.