

prof. dr. sc. Petar Crnošija
Toni Bajžić
Boris Bošnjak
FER, Zagreb

B5 – 21

PRIMJENA METODA OPTIMIRANJA ZA ODREĐIVANJE LINEARNOG KONTINUIRANOG MODELA SUSTAVA REGULACIJE PARNE TURBINE

SAŽETAK

Za projektiranje regulatora neophodno je koristiti matematički model dinamike sustava regulacije parne turbine. Dinamički je model moguće odrediti analitičkim postupkom i eksperimentalno.

U ovom je radu opisan postupak za određivanje linearnog kontinuiranog dinamičkog modela sustava regulacije parne turbine uz primjenu Matlab za simuliranje i optimiranje parametara prijenosnih funkcija. Opisane su metode optimiranja parametara. Određeni su najpovoljniji oblici prijenosnih funkcija turbine s kondenzatorom i servo sustavom. Optimiranjem parametara prijenosnih funkcija postignuta je najmanja vrijednost pogreške u prijelaznoj pojavi u odnosu na nelinearni dinamički model sustava regulacije parne turbine 30 MW u EL-TO Zagreb.

Ključne riječi: Metode optimiranja parametara, dinamički model parne turbine, linearni kontinuirani model sustava regulacije parne turbine.

APPLICATION OF OPTIMIZATION METHODS FOR DETERMINATION OF LINEAR CONTINUOUS MODEL OF STEAM TURBINE CONTROLLING SYSTEM

SUMMARY

For regulator design it is necessary to use mathematical model of a steam turbine controlling system dynamic. Dynamical model can be determined analytically and experimentally.

Procedure for determination a linear continuous model of a steam turbine regulating system dynamic by using Matlab for simulation and transfer function parameters optimization has been described in this paper. Parameter optimization methods are described. The most favorable forms of a steam turbine with condenser and servo motor transfer functions are derived. By optimization of the transfer function parameters a minimum transient error in reference to the nonlinear dynamic model of the 30 MW steam turbine controlling system in EL-TO Zagreb are achieved.

Key words: Parameter optimization methods, steam turbine dynamic model, linear continuous model of a steam turbine controlling system.

1. UVOD

Projektiranje regulatora obavlja se korištenjem matematičkog modela dinamike sustava regulacije parne turbine. Taj je model moguće odrediti analitičkim postupkom i eksperimentalno. Za analitičko određivanje dinamičkog modela i parametara modela neophodno je temeljito poznavanje fizikalnih pojava

i izvedbe elemenata sustava regulacije. Eksperimentalno određivanje dinamičkog modela i parametara modela zahtijeva snimanje i analizu prijelaznih pojava sustava regulacije. Znatno ubrzanje eksperimentalnog postupka određivanja oblika i optimalnih parametara prijenosnih funkcija postiže se razradom i provjerom tog postupka simuliranjem na računalu.

U ovom je radu opisan postupak za određivanje linearnog kontinuiranog dinamičkog modela sustava regulacije parne turbine uz korištenje nelinearnog kontinuiranog modela te Matlab-a za simuliranje sustava i optimiranje parametara prijenosnih funkcija. Opisane su metode optimiranja parametara. Dan je prikaz strukture sustava regulacije parne turbine 30 MW u EL-TO Zagreb. Određeni su najpovoljniji oblici i optimalne vrijednosti parametara prijenosnih funkcija hidrauličkog servo motora te turbine s kondenzatorom i servo sustavom, 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.

2. ANALIZA MODELA, KRITERIJA I METODA ODREĐIVANJA MODELA I PARAMETARA PROCESA

Za potrebe analize i sinteze sustava automatskog upravljanja koristi se model procesa. Pri tome se pod procesom podrazumijevaju svi elementi sustava osim regulatora: objekt upravljanja, izvršni element, pojačalo snage i mjerni element. Da bi se mogla obaviti analiza i sinteza sustava neophodno je odrediti ne samo model, nego i parametre pojedinih elemenata i čitavog procesa. U slučaju kada su pojave u elementima procesa dobro poznate i mogu se dovoljno točno opisati, model procesa se smatra poznatim, a potrebno je identificirati samo parametre procesa. U općem slučaju, kada su pojave u procesu veoma složene da bi se mogle egzaktno matematički opisati, neophodno je identificirati model i parametre procesa.

Pod identifikacijom procesa podrazumijeva se određivanje matematičkog modela i parametara dinamičkog procesa na temelju analize podataka o ulaznoj i izlaznoj veličini. Za identifikaciju procesa potrebno je planirati eksperiment i prikupiti podatke o ulaznoj i izlaznoj veličini. Zatim je potrebno odabrati strukturu modela i kriterij optimiranja te primijeniti metodu optimiranja parametara za dobivanje optimalnih vrijednosti parametara modela procesa prema odabranom kriteriju.

Za određivanje optimalnih parametara procesa i regulatora mogu se primijeniti različite metode optimiranja parametara: gradijentna, simpleks te Hookea i Jevesa. Programski paket Matlab koristi gradijentnu i simpleks metodu. Pri tome se za kriterije optimiranja može koristiti različite integralne kriterije pogreške ili pokazatelje kvalitete odziva.

2.1. Modeli procesa

Modeli procesa mogu biti u parametarskom i neparametarskom obliku. Parametarski opisi modela dani su prijenosnim funkcijama i varijablama stanja u matričnom obliku. Prijenosna funkcija procesa može se odrediti iz opisa varijablama stanja. Neparametarske metode obuhvaćaju analizu procesa u vremenskom i frekvencijskom području. Ove metode ne zahtijevaju eksplicitnu upotrebu vektora parametara u postupku traženja najboljeg opisa procesa.

Na proces djeluje ulazna upravljačka veličina $u(t)$ i poremećajna veličina (smetnja) $f(t)$. Prema tome, izlazna veličina $y(t)$ će sadržavati komponentu uslijed djelovanja upravljačke veličine $y_u(t)$ i komponentu uslijed djelovanja smetnje $y_f(t)$:

$$y(t) = y_u(t) + y_f(t) . \quad (1)$$

Komponenta izlazne veličine $Y_u(s)$ određena je prijenosnom funkcijom procesa u odnosu na upravljačku veličinu $G_u(s)$, a komponenta izlazne veličine $Y_f(s)$ određena je prijenosnom funkcijom procesa u odnosu na smetnju $G_f(s)$ pa izlazna veličina u Laplaceovom području iznosi:

$$Y(s) = Y_u(s) + Y_f(s) = G_u(s)U(s) + G_f(s)F(s) . \quad (2)$$

U literaturi iz područja identifikacije procesa koriste se sljedeće oznake za smetnju i prijenosnu funkciju smetnje: $f(t)=e(t)$, $y_f(t)=v(t)$ i $G_f(s)=H(s)$.

Eksperimentalne metode (Ziegler-Nicholsova metoda) podešavanja parametara regulatora temelje se na aproksimaciji ponašanja sustava prijenosnom funkcijom s jednom vremenskom konstantom T_{M1} i mrtvim vremenom T_m :

$$G_{M1}(s) = \frac{Y_M(s)}{U(s)} = \frac{K_M}{1 + T_{M1}s} e^{-T_m s} . \quad (3)$$

Analičke metode temelje se direktnom izračunavanju prijenosne funkcije regulatora prema zadanom ponašanju sustava.

Sinteza parametara regulatora može se obaviti frekvencijskim metodama. Pri tome je najpogodnije koristiti Bodeov prikaz (aproksimaciju s pravcima) amplitudno i fazno frekvencijske karakteristike. Realni sustavi su obično višeg reda, ali se veoma dobro mogu aproksimirati prijenosnim funkcijama drugog i trećeg reda.

Za sustave s izraženim mrtvim vremenom veoma dobra aproksimacija ponašanja dobije se prijenosnom funkcijom drugog reda koja sadrži: dva pola (konjugirano kompleksna ili realna), jednu nulu i mrtvo vrijeme T_m :

$$G_{M2}(s) = \frac{Y_M(s)}{U(s)} = K_M \frac{1 + b_1 s}{1 + a_1 s + a_2 s^2} e^{-T_m s} . \quad (4)$$

Za sustave bez mrtvog vremena veoma dobra aproksimacija ponašanja dobije se prijenosnom funkcijom trećeg reda, koja u općem slučaju može imati: jedan par konjugirano kompleksnih ili realnih polova, jedan realan pol i jednu realnu nulu:

$$G_{M3}(s) = \frac{Y_M(s)}{U(s)} = K_M \frac{1 + b_1 s}{(1 + a_1 s + a_2 s^2)(1 + a_3 s)} . \quad (5)$$

Realni su procesi četvrtog i višeg reda. Dodatne su vremenske konstante obično manjeg iznosa od dominantnih vremenskih konstanti procesa pa će u postupku identifikacije parametara biti približno uzete u obzir u mrtvom vremenu T_m u relacijama (3) i (4), odnosno u vremenskoj konstanti $a_3 = T_3$ u relaciji (5).

Ako je proces drugog reda, optimiranjem koeficijenata prijenosne funkcije (5) dobit će se veoma mala vrijednost koeficijenta a_3 ($a_3 \approx 0$) pa se taj član u prijenosnoj funkciji može zanemariti. Isto tako, ako proces ne sadrži derivacijsku komponentu djelovanja, optimiranjem koeficijenata prijenosne funkcije (5) dobit će se veoma mala vrijednost koeficijenta b_1 ($b_1 \approx 0$) pa se taj član u prijenosnoj funkciji može zanemariti.

Ako proces sadrži integralno ponašanje u prijenosnim funkcijama (4) i (5) trebalo bi u polinomima nazivnika $A(s)$ umjesto jedinice napisati koeficijent a_0 . U tom bi se slučaju optimiranjem parametara za koeficijent a_0 dobila veoma mala vrijednost ($a_0 \approx 0$), tako da se taj koeficijent može zanemariti, pa se dobije prijenosna funkcija s integralnim ponašanjem. Ukupni koeficijent pojačanja u tom bi slučaju iznosio K_M/a_1 .

Ako proces sadrži derivacijsko ponašanje, u prijenosnim funkcijama (4) i (5) trebalo bi u polinomima brojnika $B(s)$ umjesto jedinice napisati koeficijent b_0 . U tom bi se slučaju optimiranjem parametara za koeficijent b_0 dobila veoma mala vrijednost ($b_0 \approx 0$), tako da se taj koeficijent može zanemariti, pa se dobije prijenosna funkcija s derivacijskim ponašanjem. Ukupni koeficijent pojačanja u tom bi slučaju iznosio $K_M b_1$.

2.2. Kriteriji optimiranja parametara procesa

Kriteriji optimiranja proizvodnih procesa mogu biti: maksimalna produktivnost, minimalna cijena proizvoda, maksimalni dohodak i minimalni utrošak energije.

U proizvodnim se procesima obično koristi kombinacija navedenih kriterija, kako bi se maksimalnom produktivnošću postigla minimalna cijena proizvoda i maksimalni dohodak. U proteklih desetak godina sve više se koristi kriterij minimalnog utroška energije ili kompromis između minimalnog utroška energije i maksimalnog dohotka.

Za optimiranje parametara regulatora procesa koriste se integralni kriteriji i pokazatelji kvalitete prijelazne pojave: zadano nadvišenje σ_{mz} i maksimalna brzina odziva, odnosno minimalno vrijeme prvog maksimuma odziva t_{mmin} .

Za optimiranje parametara regulatora može se koristiti jedan od četiri standardna integralna kriterija pogreške izlazne veličine sustava, koja je jednaka razlici izlazne veličine modela sustava $y_M(t)$ i izlazne veličine sustava $y(t)$; $\delta_p(t) = y_M(t) - y(t)$: integral kvadrata pogreške (I_1), integral umnoška vremena i kvadrata pogreške (I_2), integral apsolutne vrijednosti pogreške (I_3) i integral umnoška vremena i apsolutne vrijednosti pogreške (I_4).

Za optimiranje parametara modela procesa obično se koristi integralni kriterij kvadrata pogreške, odnosno suma kvadrata pogreške kada se račun obavlja s diskretnim vrijednostima veličina.

Optimiranjem parametara regulatora prema integralnim kriterijima I_1 - I_4 dobije se odziv sustava s nadvišenjem σ_m reda veličine 20%. Ako se želi dobiti optimalne vrijednosti parametara regulatora, kojima se postiže manja vrijednost nadvišenja odziva ili odziv bez nadvišenja (aperiodski odziv), potrebno je koristiti složenije integralne kriterije.

Jedna je od mogućnosti korištenje integralnog kriterija kvadrata pogreške i otežanog kvadrata derivacije pogreške (I_5), dok je druga mogućnost korištenje integralnog kriterija kvadrata pogreške i otežanog kvadrata upravljačkog signala procesa (I_6).

Optimiranje parametara regulatora može se obaviti izravno prema pokazateljima kvalitete prijelazne pojave. Pri tome se obično nastoji postići: zadani iznos nadvišenja odziva σ_{mz} i maksimalna brzina odziva, odnosno minimalno vrijeme prvog maksimuma odziva t_{mmin} .

2.3. Metode optimiranja parametara procesa

Pod optimiranjem parametara sustava podrazumijeva se određivanje vrijednosti parametara kojima se postiže ponašanje sustava veoma blisko optimalnom prema odabranom kriteriju optimiranja. Pri upravljanju procesima postavljaju se zahtjevi na optimalnu kvalitetu prijelazne pojave, tj. minimalno trajanje prijelazne pojave t_{mmin} uz zadano nadvišenje odziva σ_{mz} .

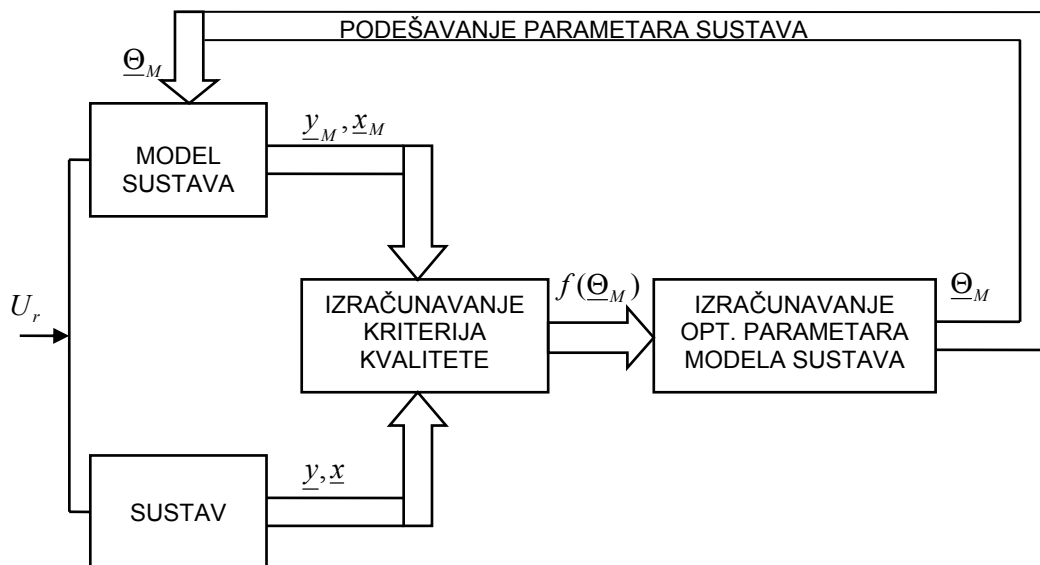
Metode optimiranja parametara mogu se primijeniti za: određivanje parametara procesa, optimiranje parametara klasičnih i adaptivnih regulatora procesa i rješavanje raznih problema koji se mogu svesti na optimiranje.

Blokovska shema postupka određivanja (identifikacije) parametara sustava primjenom modela sustava i metoda optimiranja parametara prikazana je na slici 1. Metode optimiranja parametara koriste se za određivanje parametara modela sustava, kojima se postiže minimalna vrijednost kriterija kvalitete, odnosno minimalna razlika ponašanja modela sustava $y_M(t)$ i realnog sustava $y(t)$. Kao kriterij kvalitete najčešće se koristi integralni kriterij kvadrata pogreške.

Metode optimiranja parametara procesa mogu se podijeliti u sljedeće grupe: 1. gradijentne metode, 2. metode redukcije intervala, 3. simpleks metoda i 4. metoda Hokea i Jeevesa.

Pogodnost je gradijentnih metoda što gradijentom funkcije (kriterija) kvalitete određuju smjer gibanja prema optimumu. Za određivanje minimuma funkcije kvalitete primjenom gradijentnih metoda optimiranja parametara u općem je slučaju neophodno odrediti: prvu derivaciju funkcije kvalitete po parametrima (gradijent funkcije kvalitete), drugu derivaciju funkcije kvalitete po parametrima, veličinu koraka, odnosno promjene parametara, uvjete za prestanak optimiranja i način određivanja globalnog optimuma.

Razrađene su i gradijentne metode, koje u postupku određivanja optimalnih vrijednosti parametara koriste samo prvu derivaciju funkcije kvalitete po parametrima.



Slika 1. Blokovska shema sustava za određivanje parametara sustava primjenom modela sustava i metoda optimiranja parametara.

Za izračunavanje optimalne vrijednosti parametara može se koristiti Newtonova metoda, koja zahtijeva izračunavanje drugih derivacija funkcije kvalitete $f(\Theta)$. U tom se slučaju funkcija kvalitete $f(\Theta)$ aproksimira kvadratnom funkcijom. Za proračun ekstrema (optimuma) prema Newtonovoj metodi, neophodno je izračunati Hesseovu matricu drugih derivacija funkcije kvalitete H te njenu inverznu matricu H^{-1} . Taj postupak zahtijeva veliki broj iteracija i mnogo računanja. Zbog toga su razvijene metode za izračunavanje matrica H i H^{-1} iz njihovih vrijednosti u prethodnom koraku proračuna. Te se metode nazivaju modificirane ili kvazi Newtonove metode. Najefikasnija modifikacija Newtonove metode je BFGS (Broyden, Fletcher, Goldfarb, Shanno) metoda, prema kojoj se vrijednost matrice u narednom koraku proračuna $H(k+1)$ određuje iz vrijednosti u prethodnom koraku proračuna.

Minimum funkcije kvalitete može se odrediti primjenom metoda redukcije (smanjenja) intervala unutar kojega se nalazi optimum. Pri tome se mogu koristiti sljedeće metode: pretraživanje jednog po jednog parametra, Fibonaccieva metoda i metoda zlatnog reza, kvadratna i kubna interpolacija (ekstrapolacija).

Osnovni je nedostatak pretraživanja jednog po jednog parametra spora konvergencija prema optimumu, odnosno veliki broj iteracija proračuna.

Primjenom Fibonaccieve metode i metode zlatnog reza smanjuje se za određeni iznos interval u kojemu se nalazi optimum. Osnovni je nedostatak ovih metoda spora konvergiranja, tj. velik broj iteracija proračuna za određivanje optimalnih vrijednosti parametara.

Za primjenu kvadratne i kubne interpolacije funkcija kvalitete se aproksimira parabolom drugog i trećeg reda te određuje ekstrem funkcije kvalitete. Metode kvadratne i kubne interpolacije obično se koriste zajedno s gradijentnom metodom za točnije određivanja optimalne vrijednosti parametara kada se gradijentnom metodom dođe blizu optimalne vrijednosti parametara.

Od negradijentnih metoda za optimiranje parametara pogodno je koristiti simpleks metodu Neldera i Meada. Primjenom te metode za optimiranje r parametara sustava odabire se $r + 1$ točka u prostoru parametara te određuje: točka maksimuma i točka minimuma funkcije kvalitete, centroid između svih točaka osim točke maksimuma, točka refleksije (preslikavanjem točke maksimuma oko centroida).

Osim toga, može se koristiti ekspanzija (u slučaju povoljnije vrijednosti funkcije kvalitete u točki refleksije) ili kontrakcija (u slučaju nepovoljnije vrijednosti funkcije kvalitete u točki refleksije).

Primjenom metode Hooke-Jeevesa ubrzava se postupak optimiranja u odnosu na diskretnu promjenu jednog po jednog parametra i pretraživanje čitavog prostora parametara. Metoda se temelji na određivanju baznih točaka te preslikavanju prethodne bazne točke preko nove bazne točke.

Noviji programski paketi sadrže različite metode optimiranja parametara. Tako npr. MATLAB sadrži gradijentne i simpleks metode optimiranja parametara sustava.

3. ODREĐIVANJE PARAMETARA LINEARNOG KONTINUIRANOG MODELA SUSTAVA REGULACIJE PARNE TURBINE PRIMJENOM METODA OPTIMIRANJA PARAMETARA

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 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: hidrauličkog regulatora brzine vrtnje, tlaka oduzete pare i tlaka izlazne pare, mikroprocesorskog regulatora brzine vrtnje, tlaka oduzete pare i protutlaka izlazne pare, parorazvodnih ventila visokog tlaka (VT), krilnog servomotora s razvodnom osovinom za parorazvodne ventile visokog tlaka (VT), parorazvodnih ventila niskog tlaka (NT), krilnog servomotora s razvodnom osovinom za parorazvodne ventile niskog tlaka (NT).

Cijeli regulacijski sustav turbine namijenjen je za reguliranje triju fizikalnih veličina: brzine vrtnje, tlaka reguliranog oduzimanja pare, protutlaka izlazne pare.

Zbog toga je regulacijski sustav turbine izveden s tri regulatora: brzine vrtnje, tlaka oduzimate i protutlačne pare. To je ujedno i najveći broj regulatora koji se može primijeniti na turbini. Različiti režimi rada turbine zahtijevaju mogućnost blokiranja pojedinih regulatora u određenim položajima. Pri paralelnom radu agregata s električkom mrežom blokira se regulator brzine vrtnje. Kod upućivanja turbine u pogon blokira se regulator tlaka oduzimate pare u položaju koji odgovara nultom oduzimanju iz turbine, a regulator protutlaka blokira se u položaju koji odgovara maksimalnom protoku izlazne pare iz turbine.

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).

S ekonomskog stajališta za ovu turbinu je najpovoljniji rad s oba regulatora tlaka. U tom slučaju generator je uključen u elektroenergetski sustav, koji određuje brzinu vrtnje agregata, a regulator brzine vrtnje je blokiran. Protok pare kroz turbinu je pri tome potpuno pod upravljanjem obaju regulatora tlaka i usklađen je s potrebama potrošača oduzete i izlazne pare. Dobivena električna energija se mijenja u ovisnosti o promjenama protoka pare kroz turbinu i neovisno o potrebama elektroenergetskog sustava u koji je generator uključen.

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 servomotoru regulacijskih ventila VT dijela turbine,

u_{NT} - upravljački signal prema servomotoru regulacijskih ventila NT dijela turbine,

D_e - protok pare prema potrošačima na reguliranom oduzimanju pare,

t_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.

Postupak određivanja oblika prijenosnih funkcija linearnog kontinuiranog modela i optimalnih parametara tih prijenosnih funkcija sustava prikazan je na slici 1. Na ulaz linearnog kontinuiranog modela sustava treba dovesti promjenu ulaznog signala u . Na isti se način, oduzimanjem početnog uvjeta y_0 od izlaznog signala y , generira promjena izlaznog signala sustava (nelinearnog modela sustava): $\Delta y = y - y_0$. Pogreška linearnog kontinuiranog modela procesa jednaka je razlici odziva modela sustava i odziva sustava: $\delta = \Delta y_M - \Delta y$.

Optimalne vrijednosti parametara prijenosnih funkcija određene su primjenom Matlab-a i simpleks metode optimiranja parametara. Kao kriterij optimiranja parametara korišten je integral kvadrata pogreške δ .

3.1. Linearni kontinuirani model servo motora

Za određivanje linearnog kontinuiranog modela servo motora korištene su prijenosne funkcije (4) i (5) te različite početne vrijednosti i iznosi promjene ulazne veličine. Dobiveni rezultati pokazuju da se bolja aproksimacija, odnosno manja vrijednost maksimalne pogreške u prijelaznoj pojavi δ_m dobije korištenjem prijenosne funkcije (5). Maksimalna vrijednost pogreške u prijelaznoj pojavi iznosi $\delta_m = 2,76\%$ pa se može smatrati da prijenosna funkcija (5) predstavlja dobru aproksimaciju dinamičkog ponašanja servo motora.

3.2. Linearni kontinuirani model turbine s kondenzatorom i servo motorom

Optimalne vrijednosti parametara prijenosnih funkcija turbine s kondenzatorom i servo motorom određene su uz nominalni tlak pare na reguliranom oduzimanju p_{en} te različite vrijednosti veličina: ulazne veličina servo motora visokog tlaka (u_{VT}), ulazne veličina servo motora niskog tlaka (u_{NT}), protoka pare u visokotlačni dio turbine (D_{VT}), protoka pare u niskotlačni dio turbine (D_{NT}), protoka pare na reguliranom oduzimanju turbine (D_e) i reguliranog protutlaka pare p_p .

Odzivi snage P_T , tlaka reguliranog oduzimanja p_e , protutlaka p_p , zakreta ventila visokog tlaka Φ_{VT} i zakreta ventila niskog Φ_{NT} , uz skokovitu promjenu ulazne veličine u servo motor visokog tlaka $\Delta u_{VT}(t) = -0,1S(t-10)$, prikazani su na slici 2.

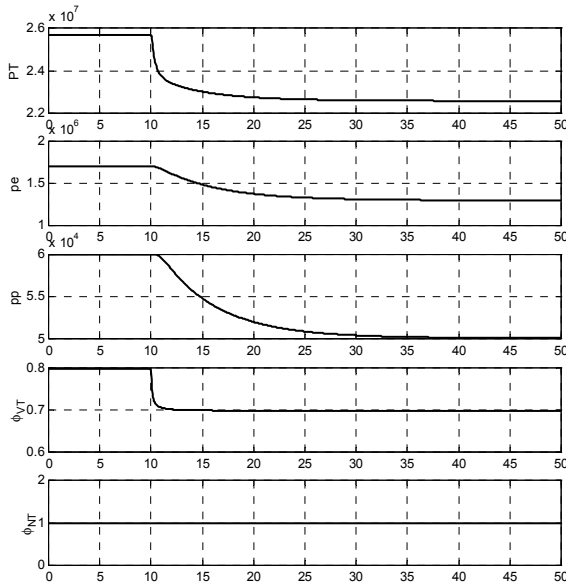
Za linearni kontinuirani model snage $(PT)_M$ na promjenu ulazne veličine u servo motor visokog tlaka Δu_{VT} (Sl. 2.), nakon detaljnijeg istraživanja dobivena je najbolja aproksimacija s prijenosnom funkcijom sa četiri vremenske konstante u nazivniku i jednom vremenskom konstantom u brojniku:

$$G_{VTP1}(s) = \frac{\Delta P T_M(s)}{\Delta U_{VT}(s)} = K_{V1} \frac{1 + b_{V1}s}{(1 + T_{V11}s)(1 + T_{V12}s)(1 + T_{V13}s)(1 + T_{V14}s)} \quad (6)$$

Maksimalna vrijednost pogreške u prijelaznoj pojavi iznosi $\delta_m=1,43\%$ pa se može smatrati da prijenosna funkcija (6) predstavlja veoma dobru aproksimaciju dinamičkog ponašanja snage turboagregata na promjenu ulazne veličine u servo motor visokog tlaka.

Za promjenu tlaka reguliranog oduzimanja p_{eM} na promjenu ulazne veličine u servo motor visokog tlaka Δu_{VT} (Sl. 2.), dobivena je najbolja aproksimacija dinamičkog ponašanja turbine s kondenzatorom i servo motorom s prijenosnom funkcijom s tri vremenske konstante u nazivniku:

$$G_{VTP2}(s) = \frac{\Delta p_{eM}(s)}{\Delta U_{VT}(s)} = \frac{K_{V2}}{(1 + T_{V21}s)(1 + T_{V22}s)(1 + T_{V23}s)} \quad (7)$$



Slika 2. Odzivi turbine s kondenzatorom i servo motorom uz promjenu $\Delta u_{VT}(t)=-0,1S(t-10)$.

Maksimalna vrijednost pogreške u prijelaznoj pojavi iznosi $\delta_m=0,33\%$ pa se može smatrati da prijenosna funkcija (7) predstavlja veoma dobru aproksimaciju dinamičkog ponašanja tlaka reguliranog oduzimanja turboagregata na promjenu ulazne veličine u servo motor visokog tlaka.

Za linearni model protutlak u kondenzatoru p_{pM} u odnosu na promjenu ulazne veličine u servo motor visokog tlaka Δu_{VT} (Sl. 2.), najbolja aproksimacija ponašanja dobivena je prijenosnom funkcijom sa četiri vremenske konstante u nazivniku:

$$G_{VTP3}(s) = \frac{\Delta p_{pM}(s)}{\Delta U_{VT}(s)} = \frac{K_{V3}}{(1 + T_{VT31}s)(1 + T_{VT32}s)(1 + T_{VT33}s)(1 + T_{VT34}s)} \quad (8)$$

Maksimalna vrijednost pogreške u prijelaznoj pojavi iznosi $\delta_m=0,86\%$ pa se može smatrati da prijenosna funkcija (8) predstavlja veoma dobru aproksimaciju dinamičkog ponašanja protutlaka turboagregata na promjenu ulazne veličine u servo motor visokog tlaka.

Odzivi snage PT, tlaka reguliranog oduzimanja p_e , protutlaka p_p , zakreta ventila visokog tlaka Φ_{VT} i zakreta ventila niskog Φ_{NT} , uz skokovitu promjenu ulazne veličine u servo motor niskog tlaka $\Delta u_{NT}(t) = -0,1S(t-10)$, prikazani su na slici 3.

Iz odziva snage PT na promjenu ulazne veličine u servo motor niskog tlaka Δu_{NT} (Sl. 3.) uočljivo je postojanje proporcionalne i derivacijske komponente pa je za linearni model odabrana prijenosna funkcija s dvije vremenske konstante u nazivniku i jednom vremenskom konstantom u brojniku:

$$G_{NTP1}(s) = \frac{\Delta PT_M(s)}{\Delta U_{NT}(s)} = K_{N1} \frac{1 + b_{N1}s}{(1 + T_{N11}s)(1 + T_{N12}s)} \quad (9)$$

Maksimalna vrijednost pogreške u prijelaznoj pojavi iznosi $\delta_m=3,47\%$ pa se može smatrati da prijenosna funkcija (9) predstavlja dobru aproksimaciju dinamičkog ponašanja snage turboagregata na promjenu ulazne veličine u servo motor niskog tlaka.

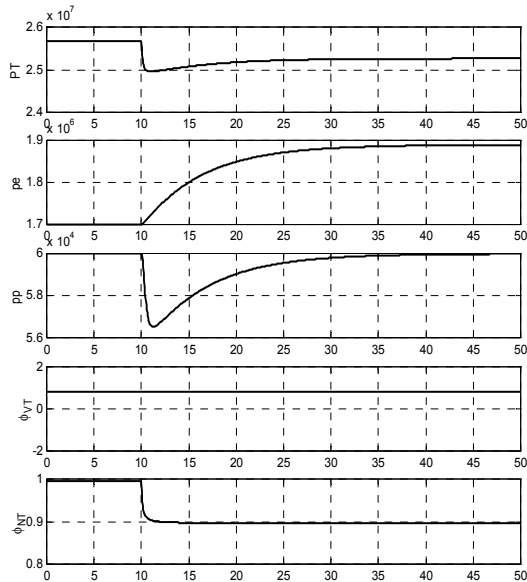
Za tlak reguliranog oduzimanja p_{eM} na promjenu ulazne veličine u servo motor niskog tlaka Δu_{NT} (Sl. 3.), dobivena je najbolja aproksimacija dinamičkog ponašanja turbine s kondenzatorom i servo motorom s prijenosnom funkcijom s dvije vremenske konstante u nazivniku:

$$G_{NTP2}(s) = \frac{\Delta p_{eM}(s)}{\Delta U_{NT}(s)} = \frac{K_{N2}}{(1 + T_{N21}s)(1 + T_{N22}s)} \quad (10)$$

Maksimalna vrijednost pogreške u prijelaznoj pojavi iznosi $\delta_m=0,54\%$ pa se može smatrati da prijenosna funkcija (10) predstavlja veoma dobru aproksimaciju dinamičkog ponašanja tlaka reguliranog oduzimanja turboagregata na promjenu ulazne veličine u servo motor niskog tlaka.

Za linearni model protutlak u kondenzatoru p_{pM} u odnosu na promjenu ulazne veličine u servo motor niskog tlaka Δu_{NT} (Sl. 3.), najbolja aproksimacija ponašanja dobivena je prijenosnom funkcijom sa četiri vremenske konstante u nazivniku:

$$G_{NTP3}(s) = \frac{\Delta p_{pM}(s)}{\Delta U_{NT}(s)} = \frac{K_{N3}s}{(1 + T_{N31}s)(1 + T_{N32}s)(1 + T_{N33}s)(1 + T_{N34}s)} \quad (11)$$



Slika 3. Odzivi turbine s kondenzatorom i servo motorom uz promjenu $\Delta u_{NT}(t)=-0,1S(t-10)$.

$$G_{D1}(s) = \frac{\Delta P_{TM}(s)}{\Delta De(s)} = K_{D1} \frac{1 + b_{D1}s}{(1 + a_{D11}s + a_{D12}s^2)(1 + T_{D13}s)} \quad (12)$$

Maksimalna vrijednost pogreške u prijelaznoj pojavi iznosi $\delta_m=1,02\%$ pa se može smatrati da prijenosna funkcija (12) predstavlja veoma dobru aproksimaciju dinamičkog ponašanja snage turboagregata na promjenu protoka pare na reguliranom oduzimanju pare.

Iz odziva tlaka reguliranog oduzimanja p_e na promjenu protoka pare na reguliranom oduzimanju pare D_e (Sl. 4.) vidljivo je da se radi o procesu s proporcionalnim ponašanjem. Veoma dobra aproksimacija ponašanja nelinearnog modela dobivena je prijenosnom funkcijom linearnog modela s proporcionalnim ponašanjem i jednom vremenskom konstantom u nazivniku:

$$G_{D2}(s) = \frac{\Delta p_{eM}(s)}{\Delta De(s)} = \frac{K_{D2}}{1 + T_{D2}s} \quad (13)$$

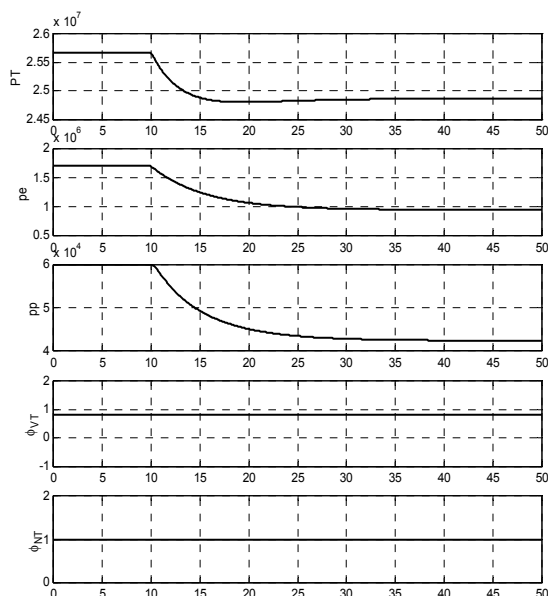
Maksimalna vrijednost pogreške u prijelaznoj pojavi iznosi $\delta_m=1,89\%$ pa se može smatrati da prijenosna funkcija (11) predstavlja dobru aproksimaciju dinamičkog ponašanja protutlaka turboagregata na promjenu ulazne veličine u servo motor niskog tlaka.

Odzivi snage turbine PT, tlaka reguliranog oduzimanja p_e , protutlaka u kondenzatoru p_p , zakreta ventila visokog tlaka Φ_{VT} i zakreta ventila niskog tlaka Φ_{NT} uz promjenu protoka pare na reguliranom oduzimanju pare $\Delta D_e=10,42S(t-10)$ prikazani su na slici 4.

Iz odziva snage PT na promjenu protoka pare na reguliranom oduzimanju pare D_e (Sl. 4.) vidljiva je oscilatornost prijelazne pojave, što upućuje na postojanje polinoma drugog reda u nazivniku prijenosne funkcije linearnog modela. Najbolja aproksimacija odziva nelinearnog modela postignuta je prijenosnom funkcijom linearnog modela s polinomom drugog reda i jednom vremenskom konstantom u nazivniku te jednom vremenskom konstantom u brojniku:

Maksimalna vrijednost pogreške u prijelaznoj pojavi iznosi $\delta_m=0,004\%$ pa se može smatrati da prijenosna funkcija (13) predstavlja veoma dobru aproksimaciju dinamičkog ponašanja tlaka reguliranog oduzimanja turboagregata na promjenu protoka pare na reguliranom oduzimanju pare.

Iz odziva protutlaka u kondenzatoru p_p na promjenu protoka pare na reguliranom oduzimanju pare D_e (Sl. 4.) vidljivo je da se radi o procesu s proporcionalnim ponašanjem. Veoma dobra aproksimacija ponašanja nelinearnog modela dobivena je prijenosnom funkcijom linearnog modela s proporcionalnim ponašanjem i dvije vremenske konstante u nazivniku:



Slika 4. Odzivi turbine s kondenzatorom i servo motorom uz promjenu $\Delta D_e=10,42S(t-10)$.

Iz odziva snage PT na promjenu temperature pare u kondenzatoru $\Delta t_v=\Delta\theta_v$ (Sl. 5.) vidljivo je da se dobra aproksimacija odziva nelinearnog modela može postići prijenosnom funkcijom s proporcionalnim ponašanjem i jednom vremenskom konstantom u nazivniku:

$$G_{t1}(s) = \frac{\Delta P T_M(s)}{\Delta \theta_v(s)} = \frac{K_{t1}}{1 + T_{t1}s} \quad (15)$$

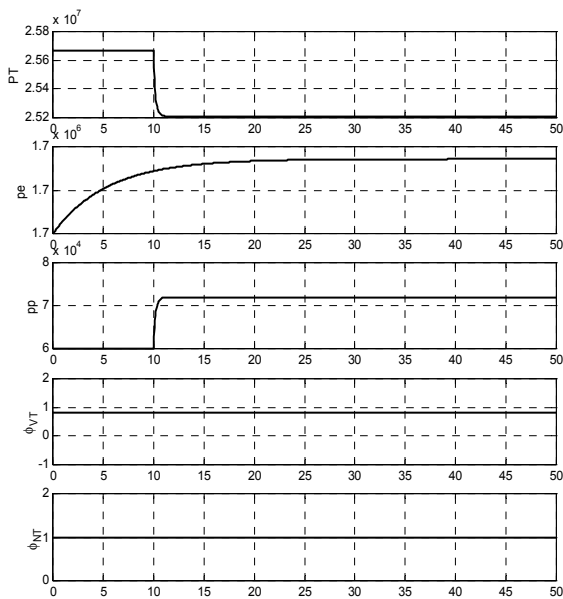
Maksimalna vrijednost pogreške u prijelaznoj pojavi iznosi $\delta_m=1,1\%$ pa se može smatrati da prijenosna funkcija (15) predstavlja veoma dobru aproksimaciju dinamičkog ponašanja snage turboagregata na promjenu temperature vode u kondenzatoru.

Iz odziva tlaka reguliranog oduzimanja p_e na promjenu temperature vode u kondenzatoru $\Delta t_v=\Delta\theta_v$ (Sl. 5.) vidljivo je da promjena temperature vode u kondenzatoru ne utječe na tlak reguliranog oduzimanja. Prijelazna pojava tlaka reguliranog oduzimanja p_e zanemarivo malog je iznosa a nastaje uslijed netočnosti početnih uvjeta.

$$G_{D3}(s) = \frac{\Delta p p_M(s)}{\Delta D_e(s)} = \frac{K_{D3}}{(1 + T_{D31}s)(1 + T_{D32}s)} \quad (14)$$

Maksimalna vrijednost pogreške u prijelaznoj pojavi iznosi $\delta_m=1,00\%$ pa se može smatrati da prijenosna funkcija (14) predstavlja veoma dobru aproksimaciju dinamičkog ponašanja protutlaka turboagregata na promjenu protoka pare na reguliranom oduzimanju pare.

Prijelazna pojava snage turbine PT, tlaka reguliranog oduzimanja p_e , protutlaka p_p , zakreta ventila visokog tlaka Φ_{VT} i zakreta ventila niskog tlaka Φ_{NT} uz promjenu temperature pare u kondenzatoru $\Delta t_v=\Delta\theta_v=5S(t-10)$ prikazana je na slici 5.



Slika 5. Odzivi turbine s kondenzatorom i servo motorom uz promjenu temperature $\Delta t_v = \Delta \vartheta_v = 5S(t-10)$.

Iz odziva protutlaka u kondenzatoru p_p na promjenu temperature vode u kondenzatoru $\Delta t_v = \Delta \vartheta_v$ (Sl. 5.) vidljivo je da se dobra aproksimacija dinamičkog ponašanja nelinearnog modela protutlaka turbine s kondenzatorom i servo motorom može postići prijenosnom funkcijom s proporcionalnim ponašanjem i jednom vremenskom konstantom u nazivniku:

$$G_{t3}(s) = \frac{\Delta p p_M(s)}{\Delta \vartheta_v(s)} = \frac{K_{t3}}{1 + T_{t3}s} \quad (16)$$

Maksimalna vrijednost pogreške u prijelaznoj pojavi iznosi $\delta_m = 1,00\%$ pa se može smatrati da prijenosna funkcija (16) predstavlja veoma dobru aproksimaciju dinamičkog ponašanja protutlaka turboagregata na promjenu temperature vode u kondenzatoru.

4. ZAKLJUČAK

Za projektiranje sustava automatskog upravljanja neophodno je imati matematički model i vrijednosti parametara elemenata i čitavog sustava. Zbog toga su u ovom radu razrađene metode za određivanje modela i parametara sustava regulacije parne turbine 30 MW u EL-TO Zagreb.

Analiza modela, kriterija i metoda određivanja modela i parametara modela procesa obavljena je u drugom poglavlju. Opisani su kontinuirani modeli procesa nižeg reda: prvog i drugog reda s mrtvim vremenom te trećeg reda bez mrtvog vremena. Od kriterija optimiranja parametara procesa opisana su četiri standardna integralna kriterija pogreške te integralni kriterij kvadrata pogreške i otežanog kvadrata derivacije pogreške i integralni kriterij kvadrata pogreške i otežanog kvadrata upravljačkog signala. Dan je prikaz metoda optimiranja parametara procesa i njihove primjene za optimiranje parametara regulatora i određivanje parametara procesa. Opisani su postupci optimiranja parametara uz korištenje različitih metoda: gradijentnih (uz korištenje prve i druge derivacije funkcije kvalitete), redukcije intervala, simpleks metode Neldera i Meada i metode Hooke-Jeevesa.

Određivanje parametara linearnog kontinuiranog modela sustava regulacije parne turbine 30 MW u EL-TO Zagreb, primjenom metoda optimiranja parametara, opisano je u trećem poglavlju.

Optimiranje parametara linearnog kontinuiranog modela servo motora visokog tlaka obavljeno je za prijenosne funkcije trećeg reda i drugog reda s mrtvim vremenom. Određene su optimalne vrijednosti parametara i maksimalna vrijednost pogreške u prijelaznoj pojavi u odnosu na nelinearni model.

Opisani su rezultati određivanja oblika i optimalnih parametara prijenosnih funkcija linearnih kontinuiranih modela turbine s kondenzatorom i servo motorom uz promjene: ulazne veličine u servo motor visokog tlaka, ulazne veličine u servo motor niskog tlaka, protoka pare na reguliranom oduzimanju pare i temperature u kondenzatoru. Pri tome je određen oblik prijenosnih funkcija i optimalne vrijednosti parametara tih prijenosnih funkcija, kojima se postiže najmanja vrijednost pogreške u prijelaznoj pojavi u odnosu na nelinearni model. To je napravljeno za sljedeće veličine turboagregata: snagu turbine, tlak reguliranog oduzimanja i protutlak u kondenzatoru.

Rezultati određivanja oblika i optimalnih parametara prijenosnih funkcija turboagregata 30 MW u EL-TO Zagreb omogućavaju: primjenu programskog paketa za optimiranje parametara za eksperimentalno određivanje prijenosnih funkcija i optimalnih parametara modela turboagregata. Na taj bi se način omogućilo razradu, realizaciju i optimiranje parametara digitalnog regulatora sa stanovišta što bolje i brže kompenzacije djelovanja poremećajnih veličina te postizanja zadanog ponašanja u odnosu na promjenu upravljačkih veličina.

Za eksperimentalno određivanje modela i optimalnih parametara kontinuiranih prijenosnih funkcija neophodno je istražiti utjecaj vremena diskretizacije i šuma u mjernom signalu na točnost određivanja optimalnih parametara prijenosnih funkcija. Na taj bi se način znatno olakšalo i ubrzalo eksperimentalno određivanje oblika i optimalnih parametara diskretnih prijenosnih funkcija turboagregata 30 MW u EL-TO Zagreb te optimalnih parametara digitalnog regulatora sa stanovišta što bolje i brže kompenzacije djelovanja poremećajnih veličina te postizanja zadanog ponašanja u odnosu na promjenu upravljačkih veličina.

Eksperimentalne metode određivanja modela i optimalnih parametara modela i regulatora razrađene i primijenjene na jednoj parnoj turbini mogle bi se relativno brzo primijeniti i na parnim turbinama u drugim termoelektranama u Hrvatskoj. Na taj bi se način moglo optimirati rad turbine i turboagregata sa stanovišta regulacije u odnosu na upravljačke i poremećajne veličina.

LITERATURA

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