

# OPTIMIRANJE PARAMETARA REGULATORA PREMA POKAZATELJIMA KVALITETE UPRAVLJANJA

Petar Crnošija, Toni Bjažić  
Fakultet elektrotehnike i računarstva  
Zavod za automatiku i procesno računarstvo  
HR-10000 ZAGREB, Unska 3, HRVATSKA  
Tel.: 01 6129 849, Faks: 01 6129 809, E-mail: petar.crnosija@fer.hr

**Sažetak** - Za projektiranje parametara regulatora industrijskih postrojenja primijenjuju se različite metode: eksperimentalne, položaj polova i nula, frekvencijske i optimiranja parametara. Primjenom većine od navedenih metoda dobije se relativno veliko nadvišenje odziva i integralna vremenska konstanta regulatora znatno veća od najveće vremenske konstante sustava, što nije povoljno sa stanovišta kompenzacije djelovanja poremećajne veličine.

U ovom su radu određeni parametri regulatora prema zadanom iznosu nadvišenja odziva sustava. Simuliranjem kaskadnog sustava regulacije na računalu određena je i grafički prikazana ovisnost nadvišenja odziva sustava o koeficijentu pojačanja regulatora uz različite vrijednosti integralne vremenske konstante regulatora. Optimiranjem je određeno potrebno pojačanje regulatora uz zadani iznos nadvišenja odziva i različite vrijednosti integralne vremenske konstante regulatora. Vremenski brža kompenzacija djelovanja poremećajne veličine postignuta je uz manje vrijednosti integralne vremenske konstante regulatora.

U radu su dani odzivi kaskadnog sustava regulacije na promjenu referentne i poremećajne veličine, koji su dobiveni korištenjem programskog paketa Matlab.

## I. UVOD

Za projektiranje parametara regulatora industrijskih postrojenja najviše se primijenjuju sljedeće metode [1, 3, 4, 8]: eksperimentalne, položaj polova i nula, frekvencijske i optimiranja parametara.

Eksperimentalne metode podešavanja parametara regulatora temelje se na aproksimaciji ponašanja procesa (objekta upravljanja) prijenosnom funkcijom s jednom vremenskom konstantom i mrtvim vremenom ili na određivanju parametara regulatora prema graničnom pojačanju i periodu oscilacija na granici stabilnosti sustava s proporcionalnim regulatorom. Primjena tih metoda za određivanje parametara regulatora procesa koji nemaju izraženo mrtvo vrijeme rezultira relativno velikim nadvišenjem odziva i integralnom vremenskom konstantom većom od najveće vremenske konstante procesa, što nije povoljno sa stanovišta kompenzacije djelovanja poremećajne veličine.

Metoda mjesta korjena prijenosne funkcije zatvorenog sustava pogodna je za primjenu na sustave drugog reda, jer omogućava određivanje parametara PI regulatora, kojima se postiže zadani položaj polova, odnosno zadane pokazatelje kvalitete prijelazne pojave. Za realne sustave višeg reda, primjenom metode mjesta korjena može se korjenu smjestiti u zadano područje s ravnine, ali je određivanje pokazatelja kvalitete prijelazne pojave u tom slučaju relativno složeno.

Za sintezu parametara regulatora frekvencijskim metodama najpogodnije je koristiti Bodeov prikaz (aproksimaciju s pravcima) amplitudno i fazno frekvencijske karakteristike. Izvedene su približne relacije, kojima se povezuje nadvišenje odziva zatvorenog sustava i fazno osiguranje te vrijeme maksimuma odziva i frekvencija presjeka za sustave drugog i trećeg reda [5]. Pri tome se parametri regulatora određuju uz kompenzaciju najveće vremenske konstante sustava i prema simetričnim frekvencijskim karakteristikama otvorenog sustava. Te se relacije mogu primijeniti za sintezu sustava, odnosno određivanje parametara regulatora prema zadanom nadvišenju i vremenu maksimuma odziva sustava.

Za određivanje parametara regulatora mogu se primijeniti različite metode optimiranja parametara [2, 6, 7]: gradijentna, simpleks, Hooke-Jeves i slučajnog izbora parametara. Programski paket Matlab [6] koristi gradijentnu i simpleks metodu. Pri tome se za kriterije optimiranja može koristiti različite integralne kriterije pogreške i pokazatelje kvalitete odziva.

Kada se za optimiranje parametara regulatora koriste standardni integralni kriteriji pogreške u odnosu na idealni odziv sustava, dobije se nadvišenje odziva sustava reda veličine 20%. Manji iznos nadvišenja i aperiodski odziva sustava može se dobiti korištenjem integralnog kriterija kvadrata pogreške i otežanog kvadrata derivacije pogreške [5]. Međutim, u tom se slučaju dobije vrijednost integralne vremenske konstante regulatora znatno veće od najveće vremenske konstante sustava, što nije povoljno sa stanovište kompenzacije djelovanja poremećajne veličine.

Optimiranje parametara regulatora može se obaviti prema zadanim pokazateljima kvalitete upravljanja, kao npr. nadvišenju odziva i maksimalnoj brzini odziva, odnosno minimalnom vremenu prvog maksimuma odziva. U tom se slučaju za optimalnu vrijednost integralne vremenske konstante regulatora dobije znatno veća vrijednost od najveće vremenske konstante sustava. Prema tome, navedene zahtjeve na pokazatelje kvalitete upravljanja ostvaruje se koeficijentom pojačanja regulatora, a integralna vremenska konstanta praktički ne utječe na navedene pokazatelje kvalitete upravljanja (nadvišenje i vrijeme maksimuma odziva sustava). No međutim, zbog velike vrijednosti integralne vremenske konstante regulatora, potrebno je relativno mnogo vremena da pogreške u stacionarnom stanju u odnosu na promjenu referentne i poremećajne veličine postanu jednake nuli.

Zbog toga je u ovom radu određena ovisnost nadvišenja odziva kaskadnog sustava regulacije o koeficijentu pojačanja regulatora, uz različite vrijednosti integralne vremenske konstante regulatora, koja ima vrijednost manju od najveće vremenske konstante sustava.

Metode optimiranja parametara primijenjene su za određivanje potrebnog iznosa koeficijenta pojačanja regulatora uz zadani iznos nadvišenja odziva i integralne vremenske konstante regulatora.

U drugom poglavlju opisan je sustav na koji je primijenjeno optimiranje parametara regulatora prema pokazateljima kvalitete upravljanja.

Rezultati određivanja ovisnosti nadvišenja o koeficijentu pojačanja i optimalnih vrijednosti koeficijenta pojačanja uz zadani iznos nadvišenja odziva i integralne vremenske konstante regulatora dani su u trećem poglavlju.

Zaključna razmatranja navedena su u četvrtom poglavlju, a korištena literatura dana je u petom poglavlju.

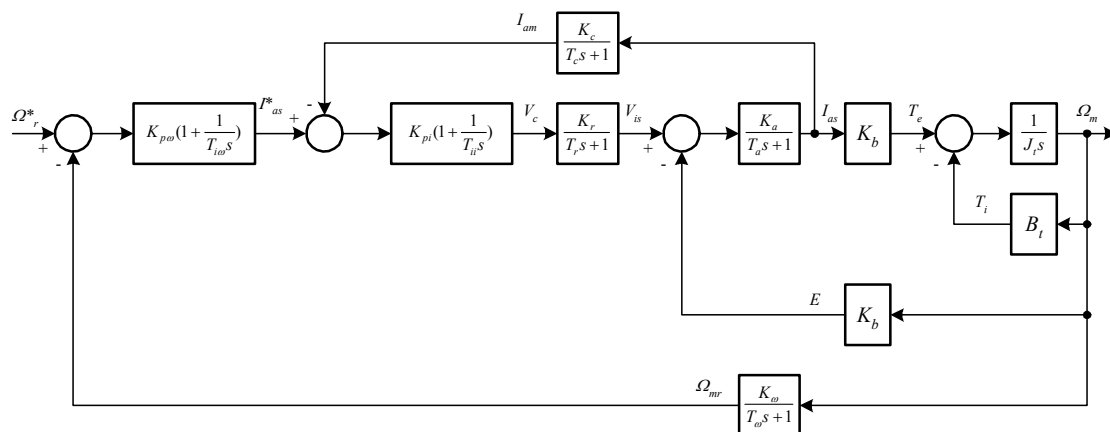
## II. OPIS KASKADNOG SUSTAVA REGULACIJE

Optimiranje parametara regulatora prema pokazateljima kvalitete upravljanja obavljeno je za kaskadni sustav regulacije brzine vrtnje elektromotornog pogona [9], koji se sastoji od (Sl. 1.): istosmjernog motora s permanentnim magnetima na rotoru, tranzistorskog pojačala snage, unutrašnje povratne veze i PI regulatora struje te vanjske povratne veze i PI regulatora brzine vrtnje.

Parametri elemenata kaskadnog sustava regulacije dani su u Tabeli I [9]. Indeksom  $b$  označene su baze, odnosno nominalne vrijednosti, a indeksom  $m$  označene su maksimalne vrijednosti veličina.

TABELA I  
PARAMETRI ELEMENATA KASKADNOG SUSTAVA  
REGULACIJE

$n_b=4000$ o/min	$P_b=373$ W	$I_b=17,35$ A
$V_s=160$ V	$T_b=0,89$ Nm	$I_{bm}=2I_b=34,7$ A
$K_r=16$ V/V	$T_r=50$ μs	$R_a=1,4$ Ω
$K_b=0,051297$ Vs	$B_t=0,002125$ Nms	$J_t=0,0002$ kgm <sup>2</sup>
$K_c=0,288$ V/A	$T_c=0,159$ ms	$K_{\omega}=0,02387$ Vs
$K_{p\omega}=?$ V/V	$T_{i\omega}=?$ ms	$K_{pi}=1,25$ V/V
$V_b=40$ V	$L_a=2,44$ mH	$T_{\omega}=1$ ms
$T_m=2T_b=1,78$ Nm	$T_t=J_t/B_t=94,1$ ms	$T_{ii}=T_a=L_a/R_a=1,743$ ms



Sl. 1. Blokvska shema kaskadnog sustava regulacije brzine vrtnje pogona s istosmjernim motorom s permanentnim magnetima na rotoru.

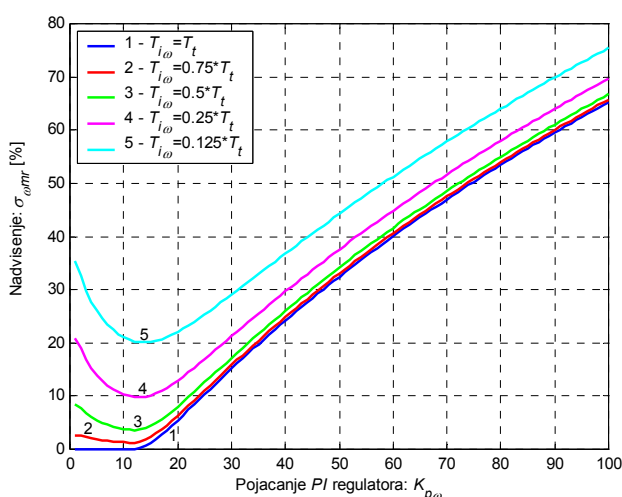
Parametri PI regulatora struje određeni su tako da se kompenzira najveća vremenska konstanta u petlji:  $T_{ii}=T_a=L_a/R_a=1,743$ ms,  $K_{pi}=1,25$ .

## III. REZULTATI ODREĐIVANJA PARAMETARA REGULATORA PREMA ZADANOM NADVIŠENJU ODZIVA SUSTAVA

Simuliranjem kaskadnog sustava regulacije brzine vrtnje (Sl. 1.) na računalu, uz korištenje programskog paketa Matlab, određena je ovisnost nadvišenja odziva mjerene brzine vrtnje  $\sigma_{\omega mr}$  o koeficijentu pojačanja regulatora brzine vrtnje  $K_{p\omega}$ , uz različite vrijednosti integralne vremenske konstante regulatora brzine vrtnje u odnosu na najveću vremensku konstantu u petlji ( $T_t=J_t/B_t=94,1$ ms):  $T_{i\omega}=T_t$ ;  $0,75T_t$ ;  $0,5T_t$ ;  $0,25T_t$  i  $0,125T_t$  (Sl. 2.).

Iz slike 2 je vidljivo da se smanjenjem integralne vremenske konstante  $T_{i\omega}$ , uz konstantnu vrijednost koeficijenta pojačanja regulatora  $K_{p\omega}$ , povećava nadvišenje odziva sustava  $\sigma_{\omega mr}$ . Naime, smanjenjem integralne vremenske konstante PI regulatora, uz konstantni iznos koeficijenta pojačanja, povećava se ukupni koeficijent pojačanja otvorene petlje pa se time povećava i nadvišenje odziva sustava.

Osim toga, za krivulje prikazane na slici 2 je karakteristično da imaju izražen minimum u slučaju kada je integralna vremenska konstanta regulatora manja od najveće vremenske konstante sustava:  $T_{i\omega}<T_t$ . To znači da se za određeni iznos integralne vremenske konstante neće moći postići nadvišenje odziva manje od minimalne vrijednosti određene krivuljama na slici 2. Prema tome, ako se želi postići nadvišenja odziva sustava manja od 20 (10)%, integralna vremenska konstanta regulatora trebala bi biti veća od  $0,125T_t$  ( $0,25T_t$ ).



Sl. 2. Ovisnost nadvišenja odziva mjerene brzine vrtnje  $\sigma_{\omega_{mr}}$  o koeficijentu pojačanja  $K_{p\omega}$  uz različite vrijednosti integralne vremenske konstante:  
 1.  $T_{i\omega}=T_t$ ; 2.  $T_{i\omega}=0,75T_t$ ; 3.  $T_{i\omega}=0,5T_t$ ; 4.  $T_{i\omega}=0,25T_t$ ; 5.  $T_{i\omega}=0,125T_t$ .

Isto tako, zadani iznos nadvišenja odziva sustava, uz određenu vrijednost integralne vremenske konstante regulatora, može se postići uz dvije sasvim različite vrijednosti koeficijenta pojačanja regulatora sustava (Sl. 2.). To znači da se optimiranjem koeficijenta pojačanja regulatora, uz zadani iznos nadvišenja odziva, mogu se dobiti sasvim različite vrijednosti tog koeficijenta. Prema tome, vrijednost koeficijenta pojačanja regulatora određena primjenom metoda optimiranja parametara ovisit će o početnoj vrijednosti tog koeficijenta. Ako je početna vrijednost koeficijenta pojačanja regulatora malog (velikog) iznosa, dobit će optimalna vrijednost tog koeficijenta malog (velikog) iznosa.

Optimalna vrijednost koeficijenta pojačanja regulatora  $K_{p\omega}$  i vrijeme maksimuma odziva  $t_m$  u slučaju promjene referentne veličine te maksimalni propad mjerene brzine vrtnje  $\Delta\omega_{mr}$  u slučaju djelovanja nominalnog momenta tereta, određeni su za zadani iznos nadvišenja odziva sustava  $\sigma_{mz}=20\%$  i različite vrijednosti integralne vremenske konstante regulatora  $T_{i\omega}$  (Tabela II). Smanjenjem iznosa integralne vremenske konstante  $T_{i\omega}$ , neznatno se smanjuje vrijednost koeficijenta pojačanja  $K_{p\omega}$  te neznatno povećava vrijeme maksimuma odziva  $t_m$  i maksimalna vrijednost propada mjerene brzine vrtnje  $\Delta\omega_{mr}$ .

Za  $T_{i\omega}=0,25T_t$  i  $\sigma_{mz}=20\%$  dobiju se dvije optimalne vrijednosti koeficijenta pojačanja regulatora brzine vrtnje (Sl. 2.)  $K_{p\omega1}=1,524$  i  $K_{p\omega2}=28,6$ . Budući da je  $K_{p\omega1}$  za red veličine manjeg iznosa od  $K_{p\omega2}$ , vrijeme maksimuma odziva mjerene brzine vrtnje  $t_m$  i maksimalni propad mjerene brzine vrtnje uslijed djelovanja momenta tereta  $\Delta\omega_{mr}$  za  $K_{p\omega1}$  bit će za red veličine veći nego za  $K_{p\omega2}$  (Tabela II).

Odzivi mjerene brzine vrtnje  $\omega_{mr}$ , brzine vrtnje  $\omega_m$  i struje  $I_{as}$  na skokovitu promjenu referentne veličine  $\omega_r^*(t)=0,1S(t)$  uz  $T_{i\omega}=T_t=94,1ms$  i  $K_{p\omega}=35,2$  prikazani su na slici 3, a odzivi tih veličina na skokovitu promjenu momenta tereta nominalnog iznosa  $T_r=0,89S(t)$  prikazani su na slici 4. Iz odziva na promjenu referentne veličine (Sl. 3.) vidljivo je da prijelazna pojava završava već nakon 15ms, dok je iz odziva na promjenu momenta tereta (Sl. 4.) vidljivo da prijelazna pojava ne završava niti nakon 200ms. Uzrok tome je relativno velika vrijednost integralne vremenske konstante regulatora ( $T_{i\omega}=T_t=94,1ms$ ).

Odzivi mjerene brzine vrtnje  $\omega_{mr}$ , brzine vrtnje  $\omega_m$  i struje  $I_{as}$  na skokovitu promjenu referentne veličine  $\omega_r^*(t)=0,1S(t)$  uz  $T_{i\omega}=0,25T_t=23,5ms$  i  $K_{p\omega}=28,6$  prikazani su na slici 5, a odzivi tih veličina na skokovitu promjenu momenta tereta nominalnog iznosa  $T_r=0,89S(t)$  prikazani su na slici 6.

Iz usporedbe odziva na promjenu referentne veličine prikazanih na slikama 3 i 5 vidljivo je da ti odzivi imaju jednake vrijednosti nadvišenja i da se vremena maksimuma odziva neznatno razlikuju. Uzrok tome su približno jednake vrijednosti koeficijenta pojačanja regulatora brzine vrtnje (Tabela II).

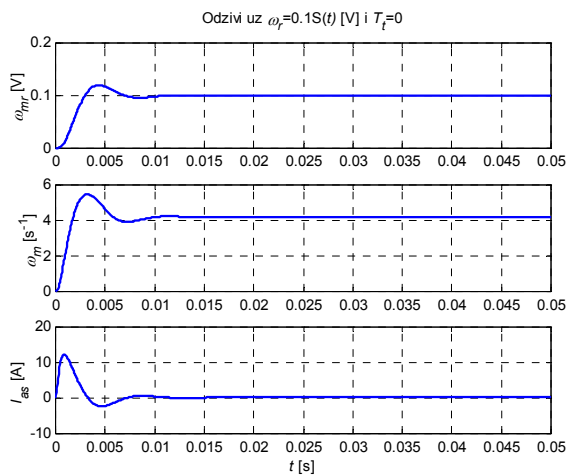
Odziv na promjenu momenta tereta prikazan na slici 6 ima približno jednak maksimalni propad brzine vrtnje  $\Delta\omega_{mr}$  kao i odziv na slici 4, budući da u oba slučaja koeficijent pojačanja regulatora ima približno jednaku vrijednost (Tabela II). Međutim, odziv na slici 6 ima znatno brže vraćanje u polazno stacionarno stanje nego odziv na slici 4. Uzrok tome je 4 puta manja integralna vremenska konstanta regulatora za odzive na slici 6 ( $T_{i\omega}=0,25T_t=23,5ms$ ) u odnosu na integralnu vremensku konstantu regulatora za odzive na slici 4 ( $T_{i\omega}=T_t=94,1ms$ ).

Iz navedenog slijedi da se približno jednake brzine (vremena maksimuma) odziva dobiju optimiranjem koeficijenta pojačanja regulatora prema zadanom nadvišenju odziva, uz različite vrijednosti integralne vremenske konstante regulatora. No međutim, vremenski brža kompenzacija djelovanja poremećajne veličine (momenta tereta) postiže se određivanjem optimalne vrijednosti koeficijenta pojačanja regulatora prema zadanom nadvišenju odziva, uz manje vrijednosti integralne vremenske konstante regulatora.

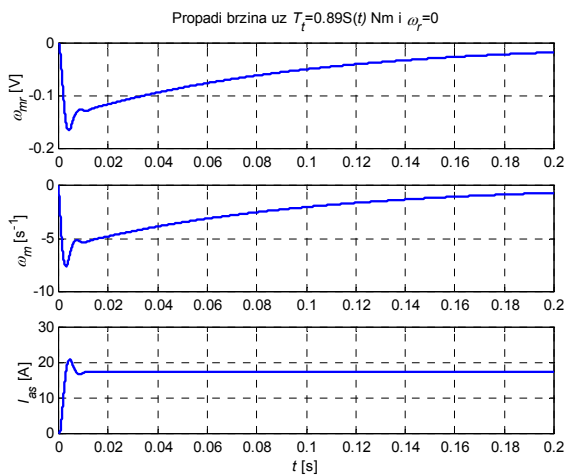
TABELA II  
 OVISNOSTI KOEFICIJENTA POJAČANJA REGULATORA  $K_{p\omega}$ , VREMENA MAKSIMUMA ODZIVA  $t_m$  I MAKSIMALNOG PROPADA MJERENE BRZINE VRTNJE  $\Delta\omega_{mr}$  O INTEGRALNOJ VREMENSKOJ KONSTANTI  $T_{i\omega}$  ZA  $\sigma_{mz}=20\%$ .

$\sigma_{mz} = 20\%$				
$T_{i\omega}$	$K_{p\omega1}$	$K_{p\omega2}$	$t_m$ [s]	$\Delta\omega_{mr}$ [s <sup>-1</sup> ]
$T_t$	-	35,2	0,0044	-0,16579
$0,75T_t$	-	34,5	0,0045	-0,16773
$0,5T_t$	-	33,1	0,0046	-0,17183
$0,25T_t$	1,524	28,6	0,0052	-0,18740
$0,125T_t$	-	-	-	-

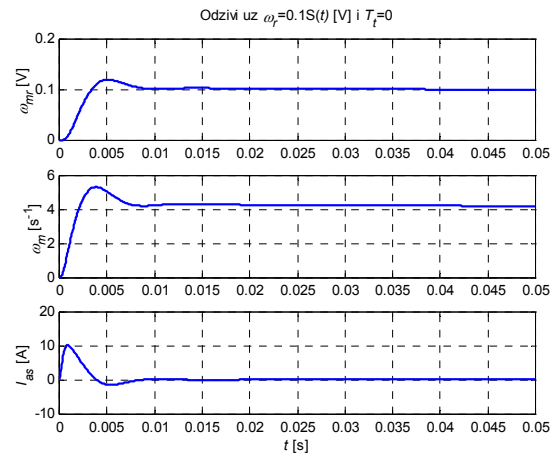
Da bi se postigla i manja vrijednost maksimalnog propada brzine vrtnje  $\Delta\omega_{mr}$ , uslijed djelovanja momenta tereta, potrebno je odrediti i podesiti veću vrijednost koeficijenta pojačanja regulatora. To je moguće postići određivanjem optimalne vrijednosti koeficijenta pojačanja regulatora za nadvišenje odziva u odnosu na promjenu referentne veličine veće od zadanog iznosa. U tom se slučaju zadano nadvišenje odziva sustava može ostvariti dodavanjem filtera na ulaz sustava.



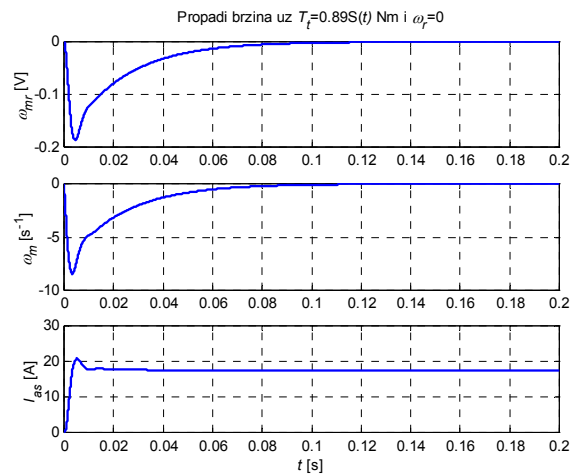
Sl. 3. Odzivi mjerene brzine vrtnje  $\omega_{mr}$ , brzine vrtnje  $\omega_m$  i struje  $I_{as}$  na skokovitu promjenu referentne veličine  $\omega_r^*(t) = 0,1S(t)$  uz  $T_{i\omega} = T_i = 94,1\text{ms}$  i  $K_{p\omega} = 35,2$ .



Sl. 4. Odzivi mjerene brzine vrtnje  $\omega_{mr}$ , brzine vrtnje  $\omega_m$  i struje  $I_{as}$  na skokovitu promjenu momenta tereta  $T_l = 0,89S(t)$  uz  $T_{i\omega} = T_i = 94,1\text{ms}$  i  $K_{p\omega} = 35,2$ .



Sl. 5. Odzivi mjerene brzine vrtnje  $\omega_{mr}$ , brzine vrtnje  $\omega_m$  i struje  $I_{as}$  na skokovitu promjenu referentne veličine  $\omega_r^*(t) = 0,1S(t)$  uz  $T_{i\omega} = 0,25T_i = 23,5\text{ms}$  i  $K_{p\omega} = 28,6$ .



Sl. 6. Odzivi mjerene brzine vrtnje  $\omega_{mr}$ , brzine vrtnje  $\omega_m$  i struje  $I_{as}$  na skokovitu promjenu momenta tereta  $T_l = 0,89S(t)$  uz  $T_{i\omega} = 0,25T_i = 23,5\text{ms}$  i  $K_{p\omega} = 28,6$ .

#### IV. ZAKLJUČAK

Za projektiranje parametara regulatora industrijskih postrojenja najviše se primjenjuju: eksperimentalne metode, metoda položaja polova i nula, frekvencijske metode i metode optimiranja parametara.

Primjenom eksperimentalnih metoda za određivanje parametara regulatora procesa koji nemaju izraženo mrtvo vrijeme dobije se relativno veliko nadvišenje odziva i integralna vremenska konstanta veća od najveće vremenske konstante procesa, što nije povoljno sa stanovišta kompenzacije djelovanja poremećajne veličine.

Primjenom metode mjesta korjena na realne sustave višeg reda može se korjene smjestiti u zadano područje  $s$  ravnine, ali je određivanje pokazatelja kvalitete prijelazne pojave u tom slučaju relativno složeno.

Za sintezu parametara regulatora frekvencijskim metodama najpogodnije je koristiti Bodeov prikaz amplitudno i fazno frekvencijske karakteristike te približne relacije kojima se povezuje nadvišenje odziva zatvorenog

sustava i fazno osiguranje te vrijeme maksimuma odziva i frekvencija presjeka.

Za određivanje parametara regulatora mogu se primijeniti različite metode optimiranja parametara. Programski paket Matlab koristi gradijentnu i simpleks metodu. Pri tome se za kriterije optimiranja može koristiti različite integralne kriterije pogreške i pokazatelje kvalitete odziva.

Optimiranjem parametara regulatora prema standardnim integralnim kriterijima pogreške u odnosu na idealni odziv sustava, dobije se nadvišenje odziva sustava reda veličine 20% i vrijednost integralne vremenske konstante regulatora znatno veće od najveće vremenske konstante sustava, što nije povoljno sa stanovišta kompenzacije djelovanja poremećajne veličine.

Optimiranjem parametara regulatora prema zadanom nadvišenju odziva i minimalnom vremenu prvog maksimuma odziva, za optimalnu vrijednost integralne vremenske konstante regulatora dobije znatno veća vrijednost od najveće vremenske konstante sustava.

Zbog toga je u ovom radu za kaskadni sustav regulacije određena i grafički prikazana ovisnost nadvišenja odziva sustava o koeficijentu pojačanja regulatora, uz različite vrijednosti integralne vremenske konstante regulatora, koja je po iznosu manja od najveće vremenske konstante sustava. Krivulje imaju izražen minimum u slučaju kada je integralna vremenska konstanta regulatora manja od najveće vremenske konstante sustava ( $T_{io} < T_t$ ). To znači da se za određeni iznos integralne vremenske konstante neće moći postići nadvišenje odziva manje od minimalne vrijednosti. Isto tako, zadani iznos nadvišenja odziva sustava, uz određenu vrijednost integralne vremenske konstante regulatora, može se postići uz dvije sasvim različite vrijednosti koeficijenta pojačanja regulatora sustava. To znači da se optimiranjem koeficijenta pojačanja regulatora, uz zadani iznos nadvišenja odziva, mogu se dobiti sasvim različite vrijednosti tog koeficijenta. Ako je početna vrijednost koeficijenta pojačanja regulatora malog (velikog) iznosa, dobit će optimalna vrijednost tog koeficijenta malog (velikog) iznosa.

Optimalna vrijednost koeficijenta pojačanja regulatora  $K_{p0}$  i vrijeme maksimuma odziva  $t_m$  u slučaju promjene referentne veličine te maksimalni propad mjerene brzine vrtnje  $\Delta\omega_{mr}$  u slučaju djelovanja nominalnog momenta tereta, određeni su za zadani iznos nadvišenja odziva sustava  $\sigma_{mz}=20\%$  i različite vrijednosti integralne vremenske konstante regulatora  $T_{io}$ .

Za  $T_{io}=0,25T_t$  i  $\sigma_{mz}=20\%$  dobivene su dvije optimalne vrijednosti koeficijenta pojačanja regulatora brzine vrtnje  $K_{p01}$  i  $K_{p02}$ . Budući da je  $K_{p01}$  za red veličine manjeg iznosa od  $K_{p02}$ , vrijeme maksimuma odziva mjerene brzine vrtnje  $t_m$  i maksimalni propad mjerene brzine vrtnje uslijed djelovanja momenta tereta  $\Delta\omega_{mr}$  za  $K_{p01}$  bit će za red veličine veći nego za  $K_{p02}$ .

U radu su prikazani odzivi mjerene brzine vrtnje  $\omega_{mr}$ , brzine vrtnje  $\omega_m$  i struje  $I_{as}$  na skokovitu promjenu referentne veličine  $\omega^*(t)=0,1S(t)$  i nominalnog momenta

tereta  $T_t=0,89S(t)$  za nadvišenje  $\sigma_{mz}=20\%$  i dvije vrijednosti integralne vremenske konstante regulatora  $T_{io}=T_t=94,1\text{ms}$  ( $K_{p0}=35,2$ ) i  $T_{io}=0,25T_t=23,5\text{ms}$  ( $K_{p0}=28,6$ ).

Odzivi na promjenu referentne veličine imaju jednake vrijednosti nadvišenja, a vremena maksimuma odziva neznatno se razlikuju. Odzivi na promjenu momenta tereta imaju približno jednak maksimalni propad brzine vrtnje  $\Delta\omega_{mr}$ , ali odziv uz  $T_{io}=0,25T_t=23,5\text{ms}$  ima znatno brže vraćanje u polazno stacionarno stanje nego odziv uz  $T_{io}=T_t=94,1\text{ms}$ .

Iz navedenog slijedi da se približno jednaka vremena maksimuma odziva dobiju optimiranjem koeficijenta pojačanja regulatora prema zadanom nadvišenju odziva, uz različite vrijednosti integralne vremenske konstante regulatora. No međutim, vremenski brža kompenzacija djelovanja poremećajne veličine (momenta tereta) postiže se određivanjem optimalne vrijednosti koeficijenta pojačanja regulatora prema zadanom nadvišenju odziva, uz manje vrijednosti integralne vremenske konstante regulatora.

Da bi se postigla i manja vrijednost maksimalnog propada brzine vrtnje  $\Delta\omega_{mr}$ , uslijed djelovanja momenta tereta, potrebno je odrediti i podesiti veću vrijednost koeficijenta pojačanja regulatora. To je moguće postići određivanjem optimalne vrijednosti koeficijenta pojačanja regulatora za nadvišenje odziva u odnosu na promjenu referentne veličine veće od zadanog iznosa. U tom se slučaju zadano nadvišenje odziva sustava može ostvariti dodavanjem filtera na ulaz sustava.

## LITERATURA

- [1] K. J. Åström and T. Hägglund, *Automatic Tuning of PID Controllers*, Instrument Society of America, Research Triangle Park, North Carolina, 1988.
- [2] W. E. Biles and J. J. Swain, *Optimization and Industrial Experimentation*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1980.
- [3] A. B. Corripio, *Tuning of Industrial Control Systems*, Instrument Society of America, Research Triangle Park, North Carolina, 1990.
- [4] P. Crnošija, *Slijedni sustavi, I. dio, Analiza i sinteza kontinuiranih slijednih sustava*, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zavod za automatiku i procesno računarstvo, Zagreb, 2000.
- [5] P. Crnošija, Ž. Ban, "Kriteriji za optimiranje parametara regulatora", *24. Međunarodni skup MIPRO01, CTS*, 65-68, Opatija 2001.
- [6] A. Grace, *Optimization Toolbox Users Guide*, The Math Works, Inc., Natick, 1995.
- [7] J. C. Nash, *Compact Numerical Methods for Computers: Linear Algebra and Function Minimisation*, Adam Hilger Ltd., Bristol, 1979.
- [8] *The Control Handbook*, Ed. W. S. Levine, CCR Press, 1995.
- [9] R. Krishnan, *Electric Motor Drives; Modeling, Analysis, and Control*, Prentice Hall, New Jersey, 2001.