

# Sinteza parametara regulatora slijednih sustava primjenom metoda Ziegler-Nicholsa

Petar Crnošija, Boris Bošnjak, Toni Bjažić  
Fakultet elektrotehnike i računarstva  
Unska 3, HR-10000 Zagreb, Hrvatska  
Tel.: 01 6129 849; Faks: 01 6129 809; E-mail: [petar.crnosija@fer.hr](mailto:petar.crnosija@fer.hr)

**Sažetak** - Za projektiranje parametara regulatora industrijskih postrojenja najviše se primjenjuju sljedeće metode: eksperimentalne, položaj polova i nula, frekvencijske i optimiranje parametara. Od eksperimentalnih metoda najviše se koristi Ziegler-Nicholsove metode: ruba stabilnosti i prijelazne funkcije. Tim se metodama parametri regulatora određuju prema graničnom pojačanju i periodu oscilacija na granici stabilnosti sustava s proporcionalnim regulatorom ili na temelju aproksimacije ponašanja procesa prijenosnom funkcijom s mrtvim vremenom i jednom vremenskom konstantom.

Metode Ziegler-Nicholsa primijenjene su za određivanje parametara regulatora brzine vrtnje sustava s istosmjernim strojem s permanentnim magnetima na rotoru. Obje metode daju parametre regulatora, kojima se postiže relativno veliko nadvišenje odziva na promjenu referentne veličine. Rezultati sinteze parametara Ziegler-Nicholsovih metodama uspoređeni s rezultatima sinteze uz kompenzaciju najveće vremenske konstante sustava. Ziegler-Nicholsovom metodom prijelazne funkcije, uz dodatak filtera na ulaz sustava, postiže se odziv s istim nadvišenjem u odnosu na promjenu referentne veličine, te vremenski brža i po iznosu bolja kompenzacija djelovanja poremećajne veličine, nego kompenzacijom najveće vremenske konstante u petlji.

## I. UVOD

Metode projektiranja parametara regulatora mogu se podijeliti na: eksperimentalne, analitičke, frekvencijske, položaja korijena (polova i nula) i optimiranje parametara. Od eksperimentalnih metoda najviše se koriste metode Ziegler-Nicholsa. Vrlo često u praksi primjenjivani postupci određivanja parametara regulatora procesa s izraženim mrtvim vremenom temeljeni su na empirijskim istraživanjima Zieglera i Nicholsa. Na raspolaganju su dvije metode [1, 2, 7]: ruba stabilnosti i prijelazne funkcije. Analitičke metode mogu se primijeniti na procese nižeg reda. Tako se za proces prvog reda može analitičkim postupkom izvesti relacije za određivanje parametara PI regulatora, kojima se polovi zatvorenog sustava postavljaju u zadani položaj [1], tj. kojima se postiže zadano ponašanje zatvorenog sustava: nadvišenje  $\sigma_m$  i vrijeme maksimuma odziva  $t_m$ . Za procese drugog i višeg reda potrebno je primijeniti složenije regulatore, koji imaju broj parametara jednak broju parametara procesa, da bi se polovi zatvorenog sustava postavili u zadani položaj. Prema tome, za procese drugog i višeg reda nije moguće analitički odrediti parametre PI regulatora, kojima bi se polovi zatvorenog sustava podesili u zadani položaj.

Za sustave drugog i višeg reda pogodno je koristiti frekvencijske metode, metodu dominantnih polova i metode optimiranja parametara PI regulatora uz različite kriterije optimiranja.

Od frekvencijskih metoda najviše se primjenjuje Bodeov prikaz amplitudno-frekvencijske i fazno-frekvencijske karakteristike. Razvijen je postupak određivanja parametara regulatora slijednog sustava primjenom Bodeovog prikaza frekvencijskih karakteristika, kojim se postiže vremenski brža i po iznosu bolja kompenzacija djelovanja poremećajne veličine (momenta tereta) na brzinu vrtnje, u odnosu na standardno (klasično) projektiranje regulatora, te zadano nadvišenje odziva brzine vrtnje u odnosu na promjenu referentne veličine [3]. Metoda položaja korijena, odnosno polova i nula prijenosne funkcije zatvorenog sustava, koja sadrži proces višeg reda i PI regulator, temelji se na položaju dominantnih polova i u literaturi je opisana načelno [1].

Od metoda optimiranja parametara najviše se koristi gradijentna i simpleks metoda te različiti kriteriji optimiranja parametara regulatora. Optimiranjem parametara regulatora slijednog sustava uz korištenje integralnih kriterija pogreške odziva slijednog sustava u odnosu na idealni odziv sustava može se postići zadano nadvišenje odziva sustava. No međutim, u tom se slučaju za integralnu vremensku konstantu regulatora dobije znatno veća vrijednost od najveće vremenske konstante slijednog sustava, što nije povoljno za brzu kompenzaciju djelovanja poremećajne veličine (momenta tereta). Razrađen je postupak dobivanja optimalnih vrijednosti parametara regulatora slijednog sustava uz primjenu referentnog modela za generiranje zadanog ponašanja slijednog sustava, kojim se optimalno (vremenski najbrže i po iznosu najbolje) kompenzira djelovanje momenta tereta (poremećajne veličine), te postiže zadano ponašanje slijednog sustava u odnosu na promjenu referentne veličine [4].

Programski paket Matlab omogućava projektiranje parametara regulatora prema: Ziegler-Nicholsovoj metodi, metodi dominantnih polova prijenosne funkcije zatvorenog sustava, Bodeovom prikazu frekvencijskih karakteristika otvorenog sustava te metodama optimiranja parametara uz korištenje referentnog modela i prema pokazateljima kvalitete upravljanja.

U ovom su radu za određivanje parametara PI regulatora slijednog sustava s istosmjernim beskolectorskim motorom primijenjene metode Ziegler-Nicholsa.

## II. POSTUPCI ODREĐIVANJA PARAMETARA REGULATORA METODAMA ZIEGLER-NICHOLSA

Vrlo često u praksi primjenjivani postupci određivanja parametara regulatora procesa s izraženim mrtvim vremenom temeljeni su na empirijskim istraživanjima

Zieglera i Nicholosa. Na raspolaganju su dvije metode [1, 2, 7]: ruba stabilnosti i prijelazne funkcije.

#### A. Određivanje parametara regulatora Ziegler-Nicholsovom metodom ruba stabilnosti

Metoda ruba stabilnosti zastupljena je u različitim vrstama simulacija regulacijskih sustava, kao i u postrojenjima gdje nije opasno dovoditi regulacijske sustave do ruba stabilnosti. Postupak određivanja parametara regulatora ovom metodom je sljedeći [1, 2, 7]: standardnom regulatoru odabere se samo proporcionalno (P) djelovanje (isključuje se integralna (I) komponenta),

1. pojačanje regulatora  $K_R$  se povećava do granične vrijednosti  $K_{Rgr}$ , za koju se u zatvorenom regulacijskom sustavu proizvedu trajne oscilacije konstante amplitude,
2. određuje se iznos periode oscilacija na granici stabilnosti  $T_{gr}$ ,
3. određuju se parametri regulatora (P, PI i PID) iz graničnog koeficijenta pojačanja regulatora  $K_{Rgr}$  i perioda graničnih oscilacija  $T_{gr}$ , prema relacijama danim u Tablici 1.

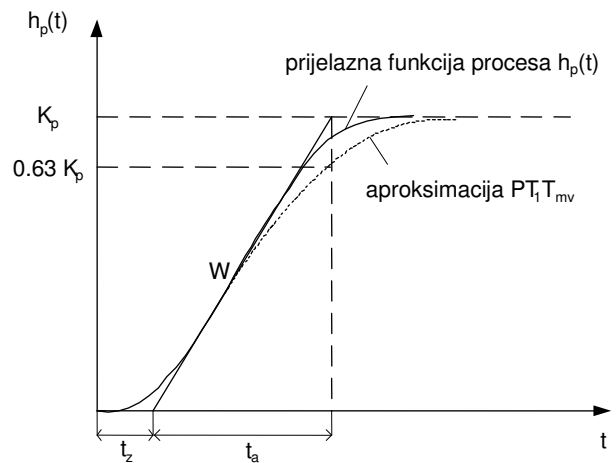
#### B. Određivanje parametara regulatora Ziegler-Nicholsovom metodom prijelazne funkcije

U industrijskim postrojenjima, koja nije moguće dovoditi do ruba stabilnosti često se koristi metoda prijelazne funkcije, odnosno odziva procesa na skokovitu promjenu ulazne veličine u proces. Snimanje prijelazne funkcije procesa  $h_p(t)$  često je dopušteno i dostupno bez većih poteškoća. Ponašanje nekog procesa s izraženim mrtvim vremenom može se dobro aproksimirati proporcionalnim (P) ponašanjem s jednom vremenskom konstantom ( $T_1$ ) i mrtvim vremenom ( $T_{mv}$ ), tj.  $PT_1T_{mv}$  članom:

$$G_p(s) = \frac{K_p}{1 + T_1 s} e^{-T_{mv} s}, \quad (1)$$

gdje je:  $K_p$  - koeficijent pojačanja procesa,  
 $T_{mv}$  - mrtvo vrijeme,  
 $T_1$  - vremenska konstanta.

Pri tome se iz prijelazne funkcije procesa  $h_p(t)$  određuju tri veličine, koje su određene tangentom u točki infleksije (Sl. 1.):



Sl. 1. Aproximacija odziva procesa s  $PT_1T_{mv}$  članom korištenjem tangente u točki infleksije.

$K_p$  - koeficijent pojačanja procesa,  
 $t_a$  - vrijeme porasta i  
 $t_z$  - vrijeme zadržanja.

Relativno dobra aproksimacija odziva procesa  $h_p(t)$  dobije se ako se za ekvivalentno mrtvo vrijeme  $T_{mv}$  odabere da je jednako vremenu zadržavanja  $t_z$ , a za ekvivalentnu vremensku konstantu  $T_1$  da je jednaka vremenu porasta  $t_a$ :

$$T_{mv} = t_z; T_1 = t_a. \quad (2)$$

Druga je mogućnost odabira parametara  $PT_1T_{mv}$  člana da se za vrijeme porasta  $t_a$ , odnosno vremensku konstantu  $T_1$ , te vrijeme zadržanja  $t_z$ , odnosno mrtvo vrijeme  $T_{mv}$ , odaberu odsječci apscisne osi koje određuje pravac koji siječe os 0% i 100% vrijednosti prijelazne funkcije procesa u točkama gdje prijelazna funkcija poprima 10% i 63% konačne vrijednosti.

Relacije za određivanje parametara regulatora prema vremenu zadržavanja  $t_z$ , odnosno ekvivalentnom mrtvom vremenu  $T_{mv}$  i vremenu porasta  $t_a$ , odnosno ekvivalentnoj vremenskoj konstanti  $T_1$ , dane su u Tablici II [1, 2, 7].

Koeficijent  $a$  u Tablici II predstavlja odsječak, koji na negativnoj ordinatnoj osi tvori tangenta odziva procesa (Sl. 1.), a određen je parametrima odziva procesa prema relaciji:

TABLICA I

VRIJEDNOSTI PARAMETARA REGULATORA PREMA ZIEGLER-NICHOLSOVOJ METODI RUBA STABILNOSTI

Tip regulatora	Vrijednosti parametara regulatora		
	$K_R$	$T_I$	$T_D$
P	$0.5K_{Rgr}$	-	-
PI	$0.4 K_{Rgr}$	$0.8T_{gr}$	-
PID	$0.6K_{Rgr}$	$0.5T_{gr}$	$0.125T_{gr}$

TABLICA II

VRIJEDNOSTI PARAMETARA REGULATORA PREMA ZIEGLER-NICHOLSOVOJ METODI PRIJELAZNE FUNKCIJE

Tip regulatora	Vrijednosti parametara regulatora		
	$K_R$	$T_I$	$T_D$
P	$1/a$	-	-
PI	$0.9/a$	$3 t_z$	-
PID	$1.2/a$	$2 t_z$	$0.5 t_z$

$$a = K_p t_z / t_a = K_p T_{mv} / T_1. \quad (3)$$

Metode Ziegler-Nicholsa su približne metode za određivanje parametara regulatora. To znači da dobiveni odziv s obzirom na promjenu referentne kao i poremećajne veličine približno zadovoljava traženu kvalitetu upravljanja. Stoga se često u praksi ove metoda koriste za dobivanje početnih vrijednosti parametara regulatora koje je potrebno korigirati ili optimirati na računalu koristeći različite kriterije kvalitete odziva.

### III. ODREĐIVANJE PARAMETARA SLIJEDNOG SUSTAVA METODAMA ZIEGLER-NICHOLSA

Blokovska shema slijednog sustava s istosmjernim motorom s permanentnim magnetima na rotoru i PI regulatorima struje i brzine vrtanje prikazana je na Sl. 2. Parametri elemenata sustava imaju sljedeće vrijednosti: nominalne (u indeksu  $n$ ) i maksimalne (u indeksu  $max$ ) vrijednosti parametara istosmjernog elektromotornog pogona s permanentnim magnetima na rotoru, parametara tranzistorskog pojačala ( $U_s$  - napon napajanja čopera), parametara članova povratnih veza struje armature i brzine vrtanje, te parametara PI regulatora struje armature i brzine vrtanje:

$n_n = 4000$ o/min;	$L_a = 2.44$ mH;
$P_n = 373$ W (0.5 ks);	$J = 0.0002$ kgm <sup>2</sup> ;
$M_n = 0.89$ Nm;	$B_r = 0.002125$ Nms;
$U_n = 40$ V;	$T_t = J/B_t = 94.1$ ms;
$I_n = 17.35$ A;	$K_b = 0.051297$ Vs;
$I_{max} = 2I_n = 34.7$ A;	$U_s = 160$ V;
$M_{max} = 2M_n = 1.78$ Nm;	$K_r = 16$ V/V;
$R_a = 1.4$ Ω;	$T_r = 50$ μs;
$K_c = 0.288$ V/A;	$K_{\omega} = 0.02387$ Vs;
$T_c = 0.159$ ms;	$T_{\omega} = 1$ ms;
$K_{pi} = ?$ V/V;	$K_{p\omega} = ?$ V/V;
$T_{ii} = T_a = L_a/R_a = 1.743$ ms.	$T_{i\omega} = ?$ s;

Parametri PI regulatora struje armature određeni su primjenom Bodeovog prikaza frekvencijskih karakteristika uz kompenzaciju najveće vremenske konstante u petlji [3], te uz korekciju koeficijenta pojačanja simuliranjem na

računalu da se postigne nadvišenje odziva  $\sigma_{mi}=5\%$ , te iznose:

$$T_{ii}=T_a=1.743 \text{ ms}; \quad K_{ii}=1.25. \quad (4)$$

Uz parametre PI regulatora armature struje (4) iz Bodeovog prilaza amplitudno frekvencijske karakteristike otvorenog sustava dobije se amplitudno frekvencijska karakteristika i prijenosna funkcija zatvorenog sustava [3]:

$$\frac{I_{as}(s)}{I_{as}^*(s)} = \frac{K_{zi}}{T_{zi}s+1}, \quad (5)$$

gdje je:  $K_{zi} = 1/K_c = 1/0.288 = 3.472$ ,  
 $T_{zi} = 1/\omega_{ci} = 1/2210 \text{ s}^{-1} = 0.4524 \text{ ms}$ .

Uz prijenosnu funkciju (5) prijenosna funkcija otvorenog kruga brzine vrtanje bez regulatora ima oblik (Sl. 2.):

$$G_p(s) = \frac{\Omega_{mr}(s)}{I_{as}^*(s)} = \frac{K_p}{(T_{zi}s+1)(T_t s+1)(T_{\omega} s+1)} = \frac{2}{(0.4524 \cdot 10^{-3} s+1)(0.0941 s+1)(0.001 s+1)} \quad (6)$$

gdje je:  $K_p = K_{zi}K_bK_{\omega}K_t$ ;  $K_t = 1/B_t$ ;  $T_t = J/B_t$ .

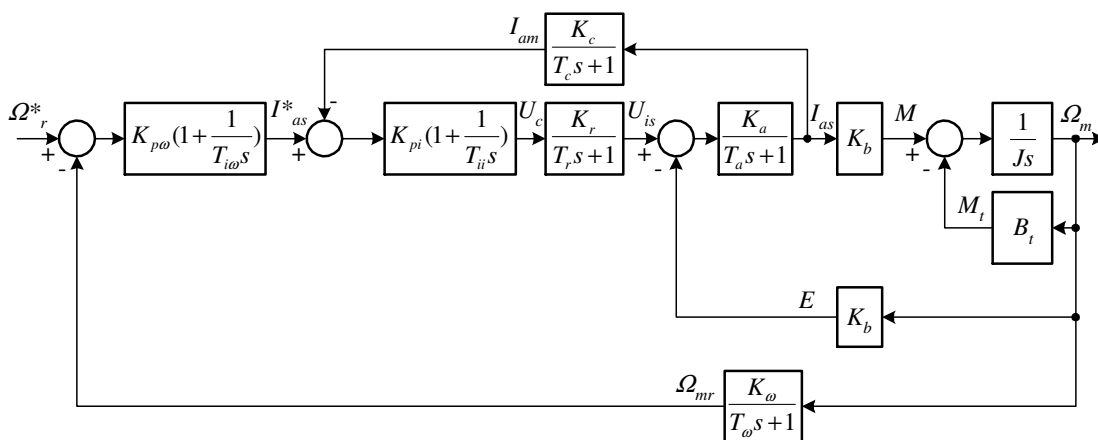
Parametri PI regulatora brzine vrtanje određeni su prema Ziegler-Nicholsovom metodama ruba stabilnosti i prijelazne funkcije.

#### A. Određivanje parametara regulatora brzine vrtanje Ziegler-Nicholsovom metodom ruba stabilnosti

Simuliranjem slijednog sustava (Sl. 2.) na računalu dobivena je granična (kritična) vrijednost pojačanja prema Ziegler Nichols metodi ruba stabilnosti:  $K_{p\omega}=168.802$ , a period oscilacija iznosi:  $T_{gr}=0.00353$ s. Prema Tablici I. za parametre PI regulatora brzine vrtanje (Sl. 2.) dobije se:

$$K_{p\omega} = 75.9609; \quad T_{i\omega} = 0.00300050 \text{ s}. \quad (7)$$

Parametri regulatora brzine vrtanje određeni primjenom Bodeovog prikaza frekvencijskih karakteristika uz kompenzaciju najveće vremenske konstante u petlji [3], te uz korekciju koeficijenta pojačanja simuliranjem na



Sl. 2. Blokovska shema kaskadnog sustava regulacije s istosmjernim motorom s permanentnim magnetima na rotoru.

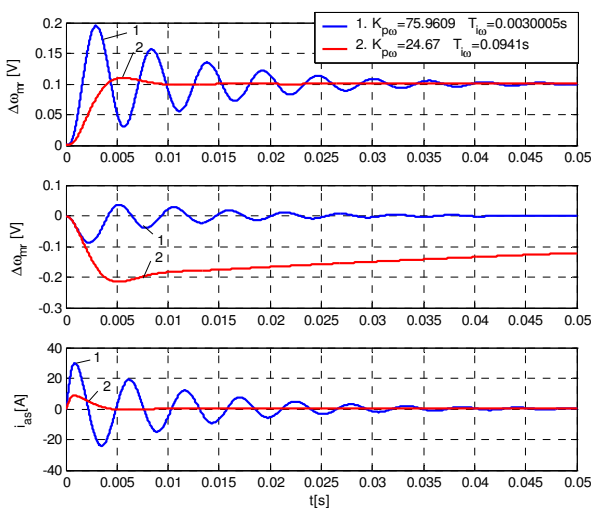
računalu da se postigne nadvišenje odziva  $\sigma_{mi}=10\%$ , iznose:

$$K_{p\omega} = 24.67; T_{i\omega} = 0.0941 \text{ s.} \quad (8)$$

Koeficijent pojačanja regulatora određen metodom Ziegler-Nicholsa (7) oko 3 puta je veći od koeficijenta pojačanja određenog kompenzacijom najveće vremenske konstante u petlji (8), a integralna vremenska konstanta znatno je manja.

Na Sl. 3. prikazana je usporedba odziva brzine vrtnje na promjenu reference  $\Omega_r^* = 0.1S(t)$  (slika 1.), promjenu nominalnog momenta tereta  $\Delta M_T = 0.89S(t)$  (slika 2.) i odziv struje armature na promjenu reference  $\Omega_r^* = 0.1S(t)$  (slika 3.), uz parametre regulatora određene prema Ziegler-Nicholsovoj metodi ruba stabilnosti (7) i uz kompenzaciju najveće vremenske konstante u petlji (8). Iz odziva brzine vrtnje na promjenu referentne vrijednosti (slika 1.) vidljivo je da nadvišenje odziva za parametre određene metodom Ziegler-Nicholsa ima veoma veliku vrijednost:  $\sigma_{m\omega} \approx 100\%$ . No međutim, djelovanje momenta tereta na brzinu vrtnje (slika 2) znatno brže i bolje je kompenzirano u slučaju parametara regulatora određenih metodom Ziegler-Nicholsa, nego metodom kompenzacije najveće vremenske konstante u petlji.

Korigirani koeficijent pojačanja regulatora brzine vrtnje za nadvišenje  $\sigma_m=50\%$  dobiven je optimiranjem i iznosi:  $K_{p\omega}=0.107411$ . Vrijednost korigiranog koeficijenta pojačanja znatno je manja od vrijednosti tog koeficijenta dobivene metodom Ziegler-Nicholsa (7) i kompenzacijom najveće vremenske konstante u petlji (8), pa će s tim koeficijentom pojačanja odziv brzine vrtnje na promjenu referentne vrijednosti biti znatno sporiji, a promjena brzine vrtnje na promjenu momenta tereta znatno lošije kompenzirana.



Sl. 3. Odzivi mjerene brzine vrtnje  $\Delta\omega_{mr}$  na promjenu referentne veličine (slika 1.) i nominalnog momenta tereta (slika 2.), te struje armature  $i_{as}$  na promjenu referentne veličine (slika 3.) uz parametre regulatora određene:

- 1- Ziegler-Nicholsovom metodom ruba stabilnosti,
- 2-kompenzacijom najveće vremenske konstante.

## B. Određivanje parametara regulatora brzine vrtnje Ziegler-Nicholsovom metodom prijelazne funkcije

Prijenosna funkcija otvorenog kruga brzine vrtnje bez regulatora dana je relacijom (6). Ako se prema Ziegler-Nicholsovoj metodi prijelazne funkcije odabere da je :

$$T_1 = T_i \text{ i } T_{mv} = T_\omega + T_{zi}, \quad (9)$$

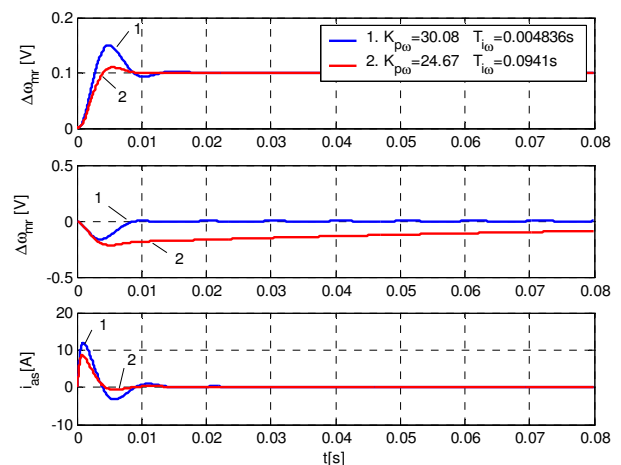
tada prema relacijama danim u Tablici II. slijede parametri regulatora brzine vrtnje:

$$K_{p\omega} = 30.08 \text{ i } T_{i\omega} = 4.836 \text{ ms.} \quad (10)$$

Na sl. 4. prikazana je usporedba odziva brzine vrtnje (1. slika) na promjenu reference  $\Omega_r^* = 0.1S(t)$  i promjenu momenta tereta  $\Delta M_T = 0.89S(t)$  (2. slika), te odziv struje armature na promjenu reference  $\Omega_r^* = 0.1S(t)$  (3. slika), uz parametre regulatora određene kompenzacijom najveće vremenske konstante (8) i prema Ziegler-Nicholsovoj metodi prijelazne funkcije (10).

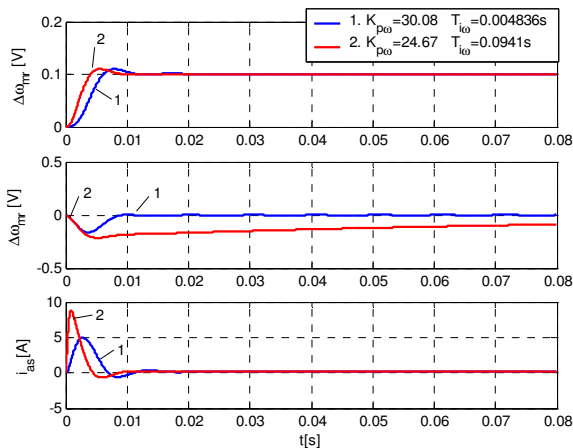
Iz 2. slike je vidljivo da se djelovanje momenta tereta na brzinu vrtnje znatno brže i nešto bolje kompenzira određivanjem parametara regulatora brzine vrtnje prema Ziegler-Nicholsovoj metodi prijelazne funkcije, nego uz kompenzaciju najveće vremenske konstante. Iz 1. slike je vidljivo da nadvišenje odziva brzine vrtnje iznosi  $\sigma_m=50\%$ . Da bi se dobilo nadvišenje odziva brzine vrtnje kao i u slučaju kompenzacije najveće vremenske konstante  $\sigma_m=10\%$ , potrebno je na ulaz sustava dodati filter s vremenskom konstantom  $T_f=0.00325 \text{ s}$ .

Na Sl. 5. prikazana je usporedba odziva brzine vrtnje (1. slika) na promjenu reference  $\Omega_r^* = 0.1S(t)$  i promjenu momenta tereta  $\Delta M_T = 0.89S(t)$  (2. slika), te odziv struje armature na promjenu reference  $\Omega_r^* = 0.1S(t)$  (3. slika), uz parametre regulatora određene kompenzacijom najveće vremenske konstante (8) i prema Ziegler-Nicholsovoj metodi prijelazne funkcije (10) i dodatnim filterom na ulazu sustava ( $T_f=0.00325 \text{ s}$ ).



Sl. 4. Odzivi mjerene brzine vrtnje  $\Delta\omega_{mr}$  na promjenu referentne veličine (1. slika) i nominalnog momenta tereta (2. slika), te struje armature  $i_{as}$  na promjenu referentne veličine (3. slika) uz parametre regulatora određene:

- 1-Ziegler-Nicholsovom metodom prijelazne funkcije,
- 2-kompenzacijom najveće vremenske konstante.



Sl. 5. Odzivi mjerene brzine referentne veličine (1. slika) i nominalnog momenta tereta (2. slika), te struje armature  $i_{as}$  na promjenu referentne veličine (3. slika) uz parametre regulatora određene:

- 1-Ziegler-Nicholsovom metodom prijelazne funkcije i filter na ulazu sustava ,
- 2-kompenzacijom najveće vremenske konstante.

U Tablici III. prikazana je usporedba nadvišenja  $\sigma_m$  i vremena maksimuma odziva mjerene brzine vrtnje  $t_m$  za parametre regulatora određenih prema metodi prijelazne funkcije (10) i uz kompenzaciju najveće vremenske konstante (8). Također je dana i potrebna vremenska konstanta filtra prvog reda u grani referentne vrijednosti za postizanje nadvišenja  $\sigma_m=10\%$ , te maksimalna vrijednost propada mjerene brzine vrtnje  $(\Delta\omega_{mr})_m$  pri djelovanju nominalnog momenta tereta.

TABLICA III  
 IZNOSI NADVIŠENJA ODZIVA MJERENE BRZINE VRTNJE  $\sigma_m$ , VREMENA MAKSIMUMA ODZIVA  $t_m$ , MAKSIMALNE VRIJEDNOSTI PROPADA MJERENE BRZINE VRTNJE  $(\Delta\omega_{mr})_m$ , UZ PARAMETRE REGULATORA ODREĐEN PREMA: 1-ZIEGLER-NICHOLSOVOJ METODI PRIJELAZNE FUNKCIJE, 2-KOMPENZACIJI NAJVEĆE VREMENSKE KONSTANTE.

$T_{i\omega}$ [ms]	$K_{p\omega} = 30.08$			
	$\sigma_m$ [%]	$t_m$ [ms]	$(\Delta\omega_{mr})_m$ [%]	
1.	4.836	49.6155	0.004968	1.63
$K_{p\omega} = 30.08; T_f = 0.00324821$ s				
	4.836	10	0.007998	1.63
$K_{p\omega} = 24.67$				
2.	94.1	10.0098	0.005658	2.1524

Iz Sl. 5. i Tablice III je vidljivo da se dodavanjem filtera na ulaz sustava dobije nadvišenje odziva  $\sigma_m=10\%$ , ali odziv brzine vrtnje postaje sporiji, tj. vrijeme maksimuma odziva  $t_m$  je veće nego u slučaju kompenzacije najveće vremenske konstante u petlji.

#### IV. ZAKLJUČAK

Metode projektiranja parametara regulatora mogu se podijeliti na: eksperimentalne, analitičke, frekvencijske, položaja korijena (polova i nula) i optimiranje parametara. Od eksperimentalnih metoda najviše se koriste Ziegler-Nicholsove metode: ruba stabilnosti i prijelazne funkcije.

U ovom je radu opisan postupak određivanja parametara regulatora Ziegler-Nicholsovom metodom ruba stabilnosti i prijelazne funkcije. Obje metode primijenjene su za određivanje parametara regulatora brzine vrtnje pogona s istosmjernim motorom s permanentnim magnetima na rotoru.

Ziegler-Nicholsovom metodom ruba stabilnosti dobiju se vrijednosti parametara regulatora, kojima se vremenski znatno brže i po iznosu bolje kompenzira djelovanje momenta tereta (poremećajne veličine) na brzinu vrtnje (reguliranu veličinu), nego određivanjem parametara regulatora uz kompenzaciju najveće vremenske konstante u petlji. No međutim, odziv brzine vrtnje na promjenu referentne veličine ima veoma veliko nadvišenje ( $\sigma_m \approx 100\%$ ). Da bi se postiglo nadvišenje odziva  $\sigma_m=50\%$  potrebno je koeficijent pojačanja regulatora znatno smanjiti, čime se postiže znatno sporiji odziv na promjenu referentne veličine i znatno lošija kompenzacija djelovanja momenta tereta, nego određivanjem parametara regulatora uz kompenzaciju najveće vremenske konstante u petlji.

Ziegler-Nicholsovom metodom prijelazne funkcije dobiju se vrijednosti parametara regulatora, kojima se vremenski znatno brže i po iznosu bolje kompenzira djelovanje momenta tereta (poremećajne veličine) na brzinu vrtnje (reguliranu veličinu), nego određivanjem parametara regulatora uz kompenzaciju najveće vremenske konstante u petlji. Odziv brzine vrtnje na promjenu referentne veličine ima nadvišenje  $\sigma_m \approx 50\%$ . Da bi se postiglo nadvišenje odziva  $\sigma_m=10\%$  potrebno je na ulaz sustava dodati filter prvog reda. Time se postiže nešto sporiji odziv na promjenu referentne veličine, ali znatno brža i po iznosu bolja kompenzacija djelovanja momenta tereta, nego određivanjem parametara regulatora uz kompenzaciju najveće vremenske konstante u petlji.

Dobiveni rezultati pokazuju da primjena metode ruba stabilnosti Ziegler-Nicholsa ne daje bolje rezultate od metode kompenzacije najveće vremenske konstante u petlji. Primjenom metode prijelazne funkcije Ziegler-Nicholsa, uz dodatni filter na ulazu sustava, može se postići vremenski brža i po iznosu bolja kompenzacija djelovanja poremećajne veličine, te zadano nadvišenje odziva, ali vremenski sporiji odziv na promjenu referentne veličine, nego metodom kompenzacije najveće vremenske konstante u petlji.

Postignuti rezultati primjene metoda Ziegler-Nicholsa omogućit će daljnju modifikaciju postupka sinteze parametara regulatora, kojima će se postići zadano nadvišenje i brzina odziva na promjenu referentne veličina, te vremenski brža i po iznosu bolja kompenzacija djelovanja poremećajne veličine, nego metodom kompenzacije najveće vremenske konstante u petlji.

#### V. LITERATURA

- [1] K. J. Åström and T. Hägglund, *Automatic Tuning of PID Controllers*, Instrument Society of America, Research Triangle Park, North Carolina, 1988.
- [2] A. B. Corripio, *Tuning of Industrial Control Systems*, Instrument Society of America, Research Triangle Park, North Carolina, 1990.
- [3] P. Crnošija, Ž. Ban, R. Krishnan, "Overshoot Controlled Servo System Synthesis Using Bode Plot and its Application to PM Brushless DC Motor Drive", *International Workshop on Advance Motion Control*, pp. 188-193, Maribor, 2002.
- [4] P. Crnosija, T. Bjazic, R. Krishnan, "Optimization of PM Brushless DC Motor Drive", *International Conference on Industrial Technology*, pp. 566-569, Maribor, 2003.
- [5] R. Krishnan, *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC motor Drives: Theory, Operation, Performance, Modeling, Simulation, Analysis and Design, Part 3: Permanent Magnet Brushless DC Machines and Their Control*, R. Krishnan, Virginia Tech, Blacksburg, 2000.
- [6] R. Krishnan, *Electric Motor Drives; Modeling, Analysis, and Control*, Prentice Hall, New Jersey, 2001.
- [7] *The Control Handbook*, Ed. W. S. Levine, CCR Press, 1995.