



**ROBUSNA REGULACIJA SISTEMA SA KAŠNJENJEM - II DEO:
PROJEKTOVANJE DECENTRALIZOVANIH I PID REGULATORA
KOTLOVSKIH POSTROJENJA**

Trajko Petrović, Dejan Ivezić*

Elektrotehnički fakultet, Beograd, Jugoslavija

**Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, Jugoslavija*

Sadržaj: Jedan od aspekata problema robusnog upravljanja multivarijabilnim procesima, sinteza robusnog regulatora, se razmatra u ovom radu. Projektovani su optimalni decentralizovani i PID regulatori za jedan od podsistema kotlovskih postrojenja, robusni u odnosu na referentne signale. Ispitana je i upoređena robusnost spregnutog sistema sa projektovanim regulatorima, međusobno, i u odnosu na već postojeći regulator.

Ključne reči: Robusno upravljanje, decentralizovani regulator, PID regulator

**ROBUST SYSTEM REGULATION WITH DELAY - II PART: DESIGN OF
DECENTRALIZED AND PID REGULATORS OF BOILER INSTALATION**

Abstract: The synthesis of decentralized and PID controllers as a part of the problem referring to robust control of multivariable processes is investigated in this paper. Optimal decentralized and PID controllers for solid-fuel boiler subsystem are designed. Controllers have different number of tuning parameters and they are robust for referent signals. Robustness of feedback system with designed controllers is tested and compared.

Key words: Robust control, decentralized controller, PID controller

1. UVOD

Osnovi teorije robusnog upravljanja izloženi su u [1]. U [2] je dat model jednog podsistema parnog kotla na čvrsto gorivo, kao višestruko prenosnog sistema, u obliku matrice funkcija prenosa sa kašnjenjem i projektovan je odgovarajući PI regulator. Taj model je u [3] poslužio kao osnova za formiranje perturbovanog modela istog procesa, pogodnijeg za primenu teorije robusnog upravljanja. U model procesa je uvedena neodređenost tipa nezavisnih perturbacija po elementima matrice funkcija prenosa. U ovom radu su projektovani decentralizovani regulatori nominalnog i dijagonalno dominantnog nominalnog procesa i PID regulator dijagonalno dominantnog nominalnog procesa. Projektovani regulatori su robusni u odnosu na referencu. Ideja je da se u frekvencijskom domenu upoređi robusnost ovde projektovanih regulatora,

međusobno, i u odnosu na u [2] projektovan klasični PI regulator. Dobijeni rezultati se verifikuju tranzijentnom analizom.

2. IZBOR TEŽINSKE FUNKCIJE

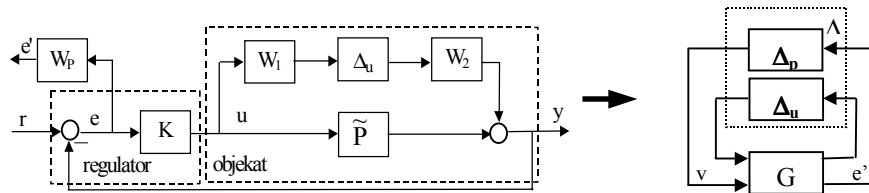
Pre no što se pređe na projektovanje samih robusnih regulatora, neophodno je definisati za ovde prisutan problem težinsku funkciju, W_p , funkcije osetljivosti koja predstavlja podešljivi parametar koji bira projektant da bi se obezbedio željeni oblik funkcije osetljivosti E [1]. Ukoliko se pri izboru težinske funkcije uzmu u obzir granične vrednosti vremenskih konstanti iz [2], a želi se vremenska konstanta zatvorenog kola manja od 20s i nulta greška prelazne funkcije u stacionarnom stanju, usvaja se sledeći oblik težinske funkcije:

$$W_p = 0.5 \frac{s + 0.05}{s} \cdot I \quad (1)$$

Dakle, ukoliko je zahtev robusne performanse ispunjen, za bilo koju perturbaciju iz skupa mogućih perturbacija modela objekta, zatvoreni sistem neće imati grešku prelazne funkcije u stacionarnom stanju i ostvariće se željena performansa zatvorenog kola.

3. PROJEKTOVANJE DECENTRALIZOVANIH I PID REGULATORA

Teorijska podloga za projektovanje decentralizovanih regulatora data je u [1] a za projektovanje PID regulatora u [4]. Za u [3] definisani multivarijabilni model projektuju se decentralizovani regulatori (DC_r^1, DC_r^2) sa jednim i dva podešljiva parametra. Proces se potom, uvođenjem odgovarajuće konstantne matrice predkompenzatora u regulator, čini diagonalno dominantnim i projektuju se decentralizovani regulatori (DCD_r^1, DCD_r^2) kao i PID regulator (PID) diagonalno dominantnog nominalnog modela. Postupak sinteze decentralizovanog i PID regulatora i dalje analize zatvorenog sistema sa istim, a na bazi koncepta strukturne singularne vrednosti koji se tretira u ovom radu, polazi od formiranja odgovarajuće matrice interkonekcije na osnovu blok dijagrama zatvorenog sistema (sl.1.), gde je $\Delta = \text{diag}(\Delta_u, \Delta_p)$, $\bar{\sigma}(\Delta) \leq 1$ i Δ_p je puna matrica odgovarajućih dimenzija.



Sl.1. Blok diagram perturbovanog modela objekta, regulatora i težinske funkcije i odgovarajuća G- Δ forma

Ukoliko se matrica funkcija prenosa nominalne funkcije osetljivosti \tilde{E} u odnosu na referentni ulaz $v = r$ is definiše kao:

$$\tilde{E} = (I + \tilde{P}K)^{-1} \quad (2)$$

odgovarajuća matrica interkonekcije G u odnosu na funkciju osetljivosti \tilde{E} se dobija u obliku:

$$G = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -W_1 K \tilde{E} W_2 & W_1 K \tilde{E} \\ -W_p \tilde{E} W_2 & W_p \tilde{E} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Zahtevi koje treba da zadovolje pokazatelji kvaliteta rada zatvorenog sistema se definišu u odnosu na blokove matrice interkonekcije kao

$$\text{Nominalna performansa} \quad NP = \sup_{\omega} np(\omega) = \sup_{\omega} \overline{\sigma}(W_p \tilde{E}) = \sup_{\omega} \overline{\sigma}(G_{22}) < 1 \quad (4)$$

$$\text{Robusna stabilnost} \quad RS = \|rs(\omega)\|_{\infty} = \|G_{11}\|_{\mu_{\Delta_u}} = \sup_{\omega} \mu_{\Delta_u}(G_{11}) < 1 \quad (5)$$

$$\text{Robusna performansa} \quad RP = \|rp(\omega)\|_{\infty} = \|G\|_{\mu_{\Delta}} = \sup_{\omega} \mu_{\Delta}(G) < 1 \quad (6)$$

Ukoliko su gornja tri zahteva ispunjena sigurno je da zatvoreni sistem sa sl.1 ne može biti destabilizovan nepoznatim ali jedinicom ograničenim matricama Δ_p , Δ_u i Δ . Drugim rečima, što su manje vrednosti NP , RS i RP bolja je nominalna performansa, robusna stabilnost i robusna performansa zatvorenog sistema sa sl.1. Kao što je u [1] objašnjeno, osnovna ideja pri projektovanju decentralizovanog regulatora je u zameni modela procesa, u ovom slučaju oblika,

$$\tilde{P} = \begin{bmatrix} \tilde{P}_{11} & \tilde{P}_{12} \\ \tilde{P}_{21} & \tilde{P}_{22} \end{bmatrix} \quad (7)$$

odgovarajućim diagonalnim modelom

$$\hat{P} = \begin{bmatrix} \tilde{P}_{11} & 0 \\ 0 & \tilde{P}_{22} \end{bmatrix} \quad (8)$$

pa će optimalni regulator K imati oblik

$$\hat{K} = \begin{bmatrix} K_{11} & 0 \\ 0 & K_{22} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Struktura diagonalnog regulatora \hat{K} , sa jednim i dva podešljiva parametra je:

$$\hat{K} = \frac{k_d}{s} \begin{bmatrix} \{\tilde{P}_{11}\}^{-1} & 0 \\ 0 & \{\tilde{P}_{22}\}^{-1} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\hat{K} = \frac{1}{s} \begin{bmatrix} k_{d1} \{\tilde{P}_{11}\}^{-1} & 0 \\ 0 & k_{d2} \{\tilde{P}_{22}\}^{-1} \end{bmatrix} \quad (11)$$

gde operator $\{\}$ označava da se pri inverziji koristi samo minimalno fazni deo funkcija prenosa \tilde{P}_{11} i \tilde{P}_{22} [1]. Decentralizovani regulator K diagonalno dominantnog procesa ima sledeći oblik:

$$K = F \hat{K} \quad (12)$$

gde je F konstantna matrica predkompensatora izabrana tako da matrica $\tilde{P}F$ bude dijagonalna. Očigledno je da sa konstantnom matricom moguće učiniti proces dijagonalno dominantnim, pa se redukcija međusobne interakcije ostvaruje usvajanjem matrice F u obliku [3]:

$$F = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

\hat{K} u (14) je klasčni decentralizovani regulator dat sa (12) i (13), ali sada za diagonalno dominantan proces $\tilde{P}F$. Struktura regulatora \hat{K} , sa jednim i dva podešljiva parametra je sada:

$$\hat{K} = \frac{k_d}{s} \begin{bmatrix} \{\tilde{PF}\}_{11}^{-1} & 0 \\ 0 & \{\tilde{PF}\}_{22}^{-1} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\hat{K} = \frac{1}{s} \begin{bmatrix} k_{d1} \{\tilde{PF}\}_{11}^{-1} & 0 \\ 0 & k_{d2} \{\tilde{PF}\}_{22}^{-1} \end{bmatrix} \quad (15)$$

Projektovanje punog PID regulatora multivarijabilnog procesa bi zahtevalo optimizaciju po 12 podešljivih parametara što predstavlja problem za dobijanje rezultata u realnom vremenu. Međutim, kako uvođenje matrice predkompensatora F daje dijagonalno dominantni proces, usvaja se struktura PID regulatora u obliku:

$$\hat{K} = \begin{bmatrix} k_{p11} + k_{i11}/s + k_{d11}s & 0 \\ 0 & k_{p22} + k_{i22}/s + k_{d22}s \end{bmatrix} \quad (16)$$

pa PID regulator sa predkompensatorom ima formu datu sa (12).

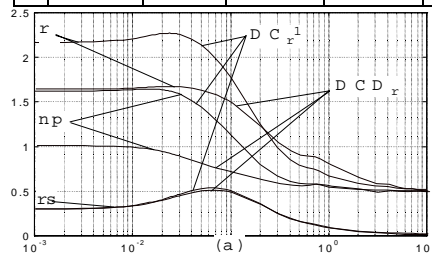
4. IZBOR PARAMETARA DECENTRALIZOVANOG I PID REGULATORA

Koristeći programski paket MATLAB, projektovani su decentralizovani i PID regulatori robusni u odnosu na referentne ulaze. Regulatori DC_r^1 i DC_r^2 za nominalni proces, sa jednim i dva podešljiva parametra imaju struktura datu sa (10) and (11). Regulatori DCD_r^1 i DCD_r^2 za dijagonalno dominantan nominalni proces, sa jednim i dva podešljiva parametra imaju struktura datu sa (14) and (15). Struktura PID regulatora sa šest podešljivih parametara je data sa (16), odnosno sa (12). Cilj je izabrati podešljive parametre tako da se ostvari najbolja robusna performansa (minimalno RP), koristeći optimizacioni postupak

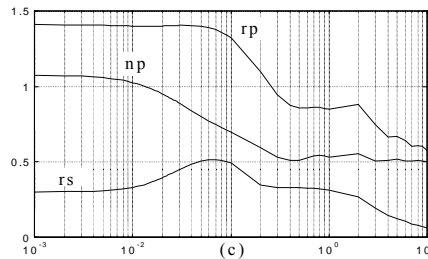
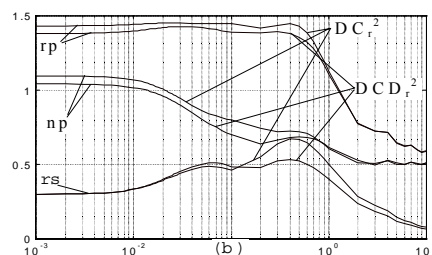
$$\min_K \sup_{\omega} \mu(G) \quad (17)$$

Tab.1. *Mere performanse i stabilnosti za zatvoreni sistem sa PID i decent. regulatorima*

Sl.	Regul.	$k_d(k_{p11})$	$k_{d1}(k_{i11})$	$k_{d2}(k_{d11})$	k_{p22}	k_{i11}	k_{d11}	NP	RS	RP
3	DC_r^1	0.025	-	-	-	-	-	1.6429	0.5344	2.2691
5	DC_r^2	-	0.17	0.023	-	-	-	1.0967	0.6723	1.4521
3	DCD_r^1	0.024	-	-	-	-	-	1.0423	0.5103	1.6448
5	DCD_r^2	-	0.14	0.024	-	-	-	1.0414	0.5311	1.4269
6	PID	-1.3788	-0.1507	≈ 0	1.44	0.023	≈ 0	1.0724	0.5142	1.4100

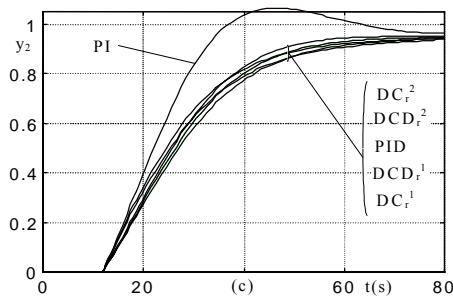
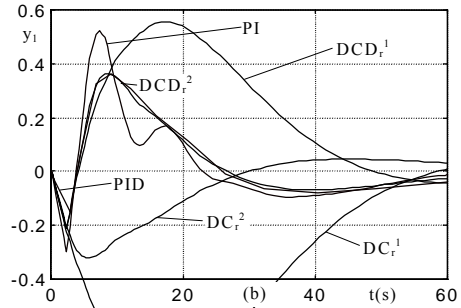
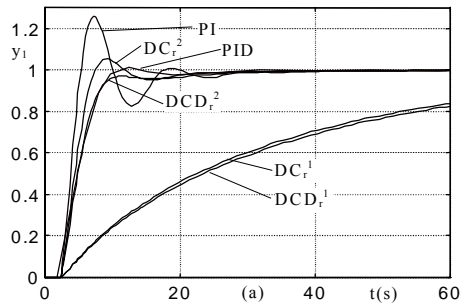


Sl.2. *Frekvencijski dijagram $rp(\omega)$, $rs(\omega)$ i $np(\omega)$ za sisteme sa*
 (a) DC_r^1 ili DCD_r^1
 (b) DC_r^2 ili DCD_r^2
 (c) PID

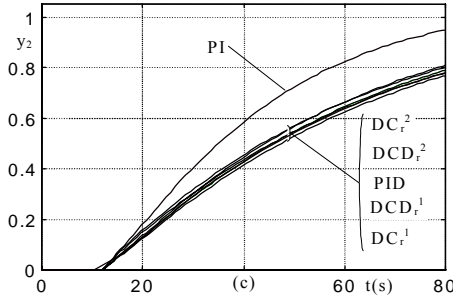
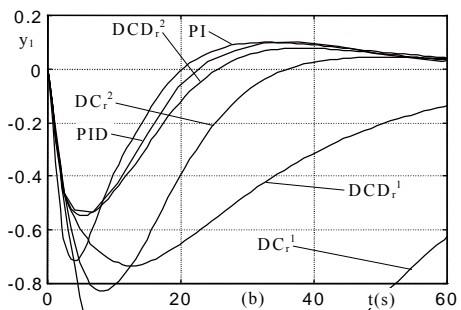
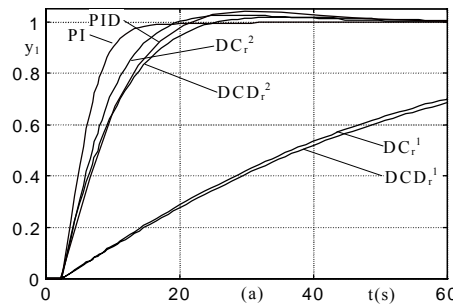


Vrednosti prema (17) izabranih koeficijenata za odgovarajuće regulatore su dati u tabeli 1. U istoj tabeli su prikazane i sračunate vrednosti robusne performanse (RP), robusne stabilnosti (RS) i nominalne performanse (NP) za projektovane regulatore. Za izabrane parametre dati su na sl.2 dijagrami zavisnosti pokazatelja robusne performanse, nominalne performanse i robusne stabilnosti od frekvencije

5. TRANZIJENTNA ANALIZA



Sl.3. Odziv perturbovanog objekta (20) na jediničnu odskočnu funkciju
(a) na ulazu u_1 ($y_2=0$);
(b) i (c) na ulazu u_2



Sl.4. Odziv perturbovanog objekta (21) na jediničnu odskočnu funkciju
(a) na ulazu u_1 ($y_2=0$);
(b) i (c) na ulazu u_2

Da bi ocena kvaliteta projektovanih regulatora bila pravilna neophodno ju je verifikovati simulacijom odziva u vremenskom domenu. Vremenski odzivi zatvorenog sistema sa ovde projektovanim regulatorima DC_r^1 , DC_r^2 , DCD_r^1 , DCD_r^2 , PID i u [2] prethodno projektovanim PI regulatorom se daju da bi se uporedio kvalitet praćenja referentnih signala. Vremenski odzivi perturbovanog modela su dati na sl.3 i sl.4. Da bi se došlo do zadovoljavajuće potvrde o kvalitetu robusne performanse, date su prelazne funkcije za pretpostavljeno najnepovoljnije perturbacije iz skupa mogućih [3]. Izabrane kombinacije parametara daju perturbovani model objekta u obliku:

$$P = \begin{pmatrix} \frac{-1.2 \exp(-2.4s)}{8s+1} & \frac{-0.8}{12s+1} \\ 0 & \frac{1.2 \exp(-12s)}{48s+1} \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$\text{ili } P = \begin{pmatrix} \frac{-0.8 \exp(-2.4s)}{12s+1} & \frac{-1.2}{8s+1} \\ 0 & \frac{0.8 \exp(-12s)}{72s+1} \end{pmatrix} \quad (19)$$

Na ovaj način izvedena simulacija vremenskih odziva predstavlja najbolji način za potvrdu dobijene robusne performanse. U realnosti neodređenosti će biti manje tako da bi odgovarajući odzivi imali slične, ali manje izražene, osobine.

6. ZAKLJUČAK

U radu su prezentovani robusni decentralizovani i PID regulatori jednog podsistema parnog kotla. Proces je prethodno modeliran, a ovde su postavljeni zahtevi za performansom spregnutog sistema. Projektovani su optimalni decentralizovani regulatori sa jednim i sa dva podešljiva parametra i PID regulator, robusni u odnosu na referentni signal. Performansa i stabilnost nominalnog i perturbovanog zatvorenog sistema sa projektovanim regulatorima ispitane su frekvencijskom analizom, i prikazani su karakteristični vremenski odzivi. Upoređeni su odzivi sistema spregnutog sa ovde projektovanim regulatorima i sa PI regulatorom projektovanim u [2]. Zaključeno je sistem spregnut sa decentralizovanim regulatorom sa dva podešljiva parametra i PID regulatorom pokazuje najbolje osobine.

7. LITERATURA

- [1] M.Morari, E.Zafiriou, "Robust Process Control", Englewood Cliffs, NY, Prentice Hall, 1989.
- [2] L.Johansson, H.N.Koivo, "Inverse Nyquist Array Technique in The Design of a multivariable Controller for a Solid-Fuel Boiler", *Int.J.Control*, Vol.10, 1984, pp.1077-108
- [3] T.Petrović, D.Ivezić, "Robusna regulacija sistema sa kašnjenjem - I deo: Analiza i modeliranje kotlovskih postrojenja", *X Simpozijum Energetska elektronika – Ee'99*, Novi Sad (YU), novembar.1999.
- [4] Đ.Garabandić, T.Petrović, "Multivariable PID control in the μ -optimality framework", *J.Aut.Control*, Vol.4, 1994, pp.89-93.