

Adaptivno upravljanje hidrauličkog cilindra sa referentnim modelom

Milan R. Ristanović, dipl.inž., ¹⁾
Mr Dejan M. Sekulić, dipl.inž.¹⁾

Pred elektrohidrauličke servosisteme postavljaju se veoma strogi zahtevi u pogledu njihovog dinamičkog ponašanja. U ovom radu se istražuje upravljanje pozicije hidrauličkog cilindra zajedno sa elektrohidrauličkim servorazvodnikom korišćenjem tehnike adaptivnog upravljanja. Razmatraju se adaptivni sistemi sa referentnim modelom. Polazi se od povratne sprege koju čine proces i regulator sa podešljivim parametrima. Osnovni problem je određivanje zakona promene parametara regulatora u odnosu na promene u procesu. Prikazani su rezultati simulacije i eksperimenta upravljanja pozicije hidrauličkog cilindra primenom MRAS-SPR regulatora.

Ključne reči: Adaptivno upravljanje, adaptivni sistemi sa referentnim modelom, elektrohidraulički servosistem.

Korišćene oznake i simboli

A	– površina klipa [m ²]
$A(p)$	– polinom
$A_m(p)$	– polinom
$A_o(p)$	– opservacioni polinom
$B(p)$	– polinom
$B_m(p)$	– polinom
E	– gereška izlaza [m]
E_f	– filtrirana greška
$G_m(p)$	– prenosna funkcija referentnog modela
$G(p)$	– prenosna funkcija elektrohidrauličkog servovalva sa hidrocilindrom
K_r	– pojačanje servorazvodnika [m ² /sV]
$P(p)=P_1(p)P_2(p)$	– stabilan moničan polinom
$Q(p)$	– polinom
$R(p), S(p), T(p)$	– polinomi u upravljačkom algoritmu
T_r	– vremenska konstanta razvodnika [s]
$U \in R$	– upravljački signal [V]
U_c	– ulazni signal u sistem [m]
$Y(t)$	– stvarni izlaz [m]
$Y_m(t)$	– izlaz modela [m]
$\alpha \in R^+$	– konstantan parametar
$\gamma \in R^+$	– pojačanje adaptacije [V/s ²]
ε	– uvećana greška
ζ	– koeficijent prigušenja
η	– uvećanje greške
$\theta=(r_1 s_0 s_1 t_0 t_1)^T$	– vektor koji se sastoji od podešljivih parametara regulatora
φ	– vektor koji se sastoji od filtriranog ulaza, izlaza i ulaznog signala u sistem
ω_n	– prirodna učestanost [rad/s]

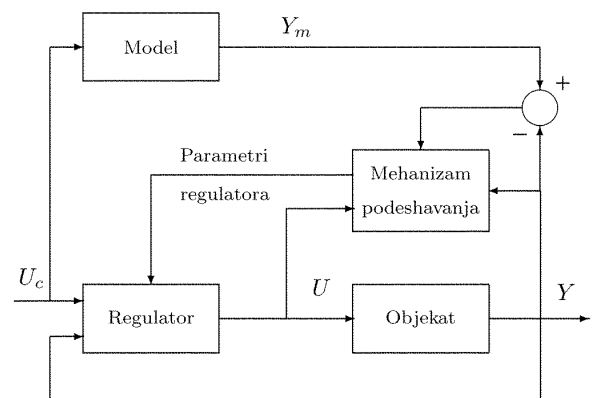
Uvod

ELEKTROHIDRAULIČKI servosistemi se veoma široko primenjuju u tehničkoj praksi u svojstvu veoma kvalitetnih izvršnih organa mnogih upravljačkih sistema.

Ovakvi sistemi nalaze široku primenu na mašinama alatkama za ostvarivanje glavnih i pomoćnih kretanja, na mašinama za proizvodnju plastičnih masa, na robotskim i manipulatorskim sistemima velike snage itd. Takođe se koriste i za upravljanje avionskim, brodskim i tenkovskim postrojenjima, vođenim projektilima i mnogim uređajima koji se koriste u vojne svrhe [1].

Veoma strogi zahtevi, koji se postavljaju pred elektrohidrauličke servosisteme, dovode do toga da primena klasičnih upravljačkih algoritama ne daje zadovoljavajuće rezultate u pogledu kvaliteta njihovog dinamičkog ponašanja i nameću potrebu za uvođenjem nekonvencionalnih algoritama upravljanja. Jedan od načina da se unapred propisani zahtevi ostvare omogućava tehnika adaptivnog upravljanja. U ovom radu se predlaže pristup adaptivnom upravljanju sa referentnim modelom.

Adaptivni sistemi sa referentnim modelom (MRAS-Model Reference Adaptive System) je jedna od najčešće korišćenih tehnika adaptivnog upravljanja. Strukturni dijagram, prikazan na sl.1, ilustruje rad sistema koji je u literaturi poznat kao paralelni MRAS [2,3].



Slika 1. Blok dijagram adaptivnog sistema sa referentnim modelom (MRAS)

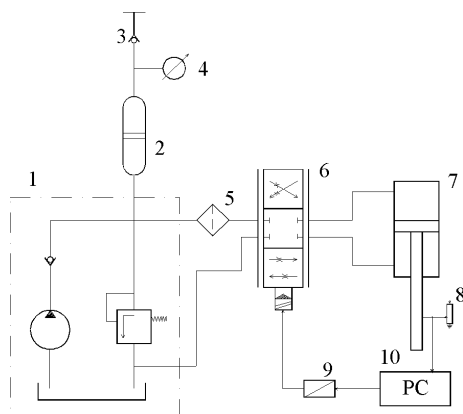
¹⁾ Mašinski fakultet, 11000 Beograd, 27. marta 80

Izlaz iz referentnog modela pokazuje kako bi izlaz iz objekta trebalo idealno da se ponaša u odnosu na željeni signal. Ceo sistem može da se posmatra kao sistem sastavljen iz dve sprege. Unutrašnja sprega se sastoji od obične povratne sprege koju čine objekat i regulator. Parametri regulatora se podešavaju u spoljašnjoj sprezi na taj način da se greška E između izlaza iz modela Y_m i izlaza iz procesa Y učini što manjom. Problem MRAS-a je kako pronaći mehanizam podešavanja parametara regulatora da se dobije stabilan sistem, koji svodi grešku na nulu. U slučaju vremenski promenljivih parametara objekta, ovaj problem ne može da se reši korišćenjem obične linearne povratne sprege koja se sastoji od regulatora sa konstantnim parametrima i objekta. Parametri mogu da variraju zbog nelinearnosti u posmatranom elektrohidrauličkom servosistemu, promena radnih uslova procesa i nestacionarnim poremećajima koji deluju na proces.

U ovom radu se ilustruje primena direktnog MRAS-SPR (Strictly Positive Real – striktno pozitivno realan) kontrolera za sistem drugog reda sa jednim ulazom i jednim izlazom (SISO-Single Input Single Output).

Opis sistema

Elektrohidraulički servosistem je prikazan na sl.2.



Slika 2. Elektrohidraulički servosistem

1- hidraulički agregat; 2- akumulator 747-0200; 3- nalivni ventil JUR-743-0000; 4- pokazivač pritiska 1070; 5- filter 748-8300; 6- elektrohidraulički servovalv D.210.040.0500.K2; 7- hidraulički cilindar 12-9830; 8- potencijometar; 9- naponsko-strujni pretvarač; 10- personalni računar (PC).

Karakteristike hidrauličkog cilindra su:

- prečnik klipa 50 mm,
- prečnik klipnjače 32 mm,
- hod klipa 200 mm,

Elektrohidraulički servorazvodnik je dvostepeni sa povratnom spregom po sili. Njegove karakteristike su:

- napojni pritisak 210 bar,
- protok (za pad pritiska od 70 bar) 40 l/min,
- otpora namotaja 500 Ω .

Hidropumpa ima sledeće karakteristike:

- specifični protok 2.65 m³/rad,
- maksimalni protok 21.29 l/min.

Hidropumpu pokreće elektromotor, čije su karakteristike:

- snaga elektromotora 3 kW,
- nominalni broj obrtaja 1420 min⁻¹.

Sve komponente elektrohidrauličkog servosistema, osim potencijometra, naponsko-strujnog pretvarača i personalnog računara (PC) je proizvela *Prva petoletka*, Trstenik, Jugoslavija.

Stvarni izlaz elektrohidrauličkog servosistema (pozicija klipa), koji se meri potencijometrom – 8, vodi se do personalnog računara – 10 preko analogno-digitalnog (A-D) konvertora. A-D konvertor je 12-bitni i podešen je na unipolarnu oblast (0-5 V). Izlaz iz modela Y_m se, na osnovu referentnog modela, izračunava i poredi sa stvarnim izlazom Y . Parametri upravljačkog sistema se menjaju na osnovu mehanizma podešavanja. Upravljački naponski signal generisan u PC se prosleđuje preko digitalno-analognog (D-A) konvertora do naponsko-strujnog pretvarača –9. Takav strujni signal napaja servorazvodnik – 6. Personalni računar je opremljen 12-bitnim D-A konvertorom koji je podešen na bipolarnu oblast ± 5 V.

Prikaz problema

Elektrohidraulički servorazvodnik zajedno sa hidrauličkim cilindrom može da se predstavi sledećom prenosnom funkcijom datom u apsolutnim koordinatama, [4]:

$$G(p) = \frac{B}{A} = \frac{K_r}{p(p+1/T_r)} \quad (1)$$

gde je $p = d(\cdot)/dt$ a K_r/A je promenljivo usled različite površine klipa A u levoj i desnoj komori hidrauličkog cilindra. Postoje brojni uticaji na promenu parametara objekta. Na promenu parametara objekta utiču temperatura i viskozna karakteristika ulja, habanje zaptivača, protočna karakteristika razvodnika i dr. Prenosna funkcija (1) dobro odražava dinamiku objekta u području niskih učestanosti.

Zahtevi za ponašanjem stvarnog izlaza Y iz sistema (1) se izražavaju dinamičkim ponašanjem izlaza iz referentnog modela Y_m , čija je prenosna funkcija data izrazom:

$$G_m(p) = \frac{B_m}{A_m} = \frac{\omega_n^2}{p^2 + 2\zeta\omega_n p + \omega_n^2} \quad (2)$$

Algoritam

Posmatra se direktni MRAS za linearne SISO sisteme. Za sistem (1) i izabrani referentni model (2) dobija se struktura regulatora koja zadovoljava uslove date u [3],

$$(p + r_1)U(t) = (t_0 p + t_1)U_c(t) + (s_0 p + s_1)Y(t), \quad (3)$$

gde su: $U_c(t)$ – ulazni signal u sistem, $Y(t)$ – stvarni izlaz, $U(t)$ – upravljački signal i r_1, s_0, s_1, t_0, t_1 – podešljivi parametri regulatora.

Za zakon promene parametara regulatora se bira normalizovani I mehanizam adaptacije u sledećem obliku:

$$\frac{d\theta}{dt} = \gamma \frac{\varphi \varepsilon}{\alpha + \varphi^T \varphi} \quad (4)$$

gde su:

$$\theta = (r_1 \ s_0 \ s_1 \ t_0 \ t_1)^T,$$

$$\varphi^T = \frac{1}{P(p)} (U \ pY \ Y \ -pU_c \ -U_c),$$

γ – pojačanje adaptacije,

$\alpha > 0$ – parametar koji se uvodi da bi se izbeglo moguće deljenje sa nulom.

Da bi se odredila vrednost upravljačkog signala u trenutku t za MRAS algoritam upravljanja, potrebno je

izračunati sledeće jednačine [3,5-7]:

$$Y_m = \frac{B_m}{A_m} U_c \quad (5)$$

$$E_f = \frac{Q}{P} E = \frac{Q}{P} (Y - Y_m) \quad (6)$$

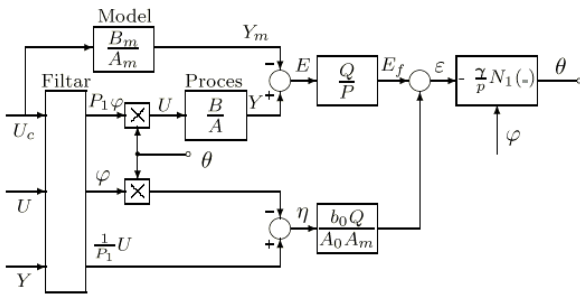
$$\eta = -\left(\frac{1}{P_1} U + \varphi^T \theta \right) \quad (7)$$

$$\varepsilon = E_f + \frac{b_0 Q}{A_0 A_m} \eta \quad (8)$$

$$\dot{\theta} = \gamma N_1(\varphi, \varepsilon) = \gamma \frac{\varphi \varepsilon}{\alpha + \varphi^T \varphi} \quad (9)$$

$$U = -\theta^T (P_1 \varphi) \quad (10)$$

Blok dijagram adaptivnog sistema sa referentnim modelom je prikazan na sl.3.



Slika 3. Blok dijagram MRAS-a za SISO sistem

Rezultati

A. Simulacija

Za snimanje simulacionih rezultata posmatranog elektrohidrauličkog servosistema korišćen je digitalni računar.

Usvojena je nominalna tačka u sledećem obliku $Y_N = 0.09$ m i $\dot{Y}_N = 0$ m/s. Sve simulacije su izračunate za sledeće brojčane vrednosti, [6]:

$$K_r/A = \begin{cases} 0.8446 \frac{\text{m/s}}{\text{V}} & \text{za } \dot{Y} > 0, \\ 0 & \text{za } \dot{Y} = 0, \\ 1.3091 \frac{\text{m/s}}{\text{V}} & \text{za } \dot{Y} < 0, \end{cases} \quad (11)$$

$$T_r = 0.01 \text{ s} \quad (12)$$

gde su: K_r – pojačanje razvodnika, A – površina klipa, T_r –vremenska konstanta razvodnika.

Opservacioni polinom je usvojen u sledećem obliku: $A_0(p) = p + a_0$. Prema [3], za algoritam (5-10) biraju se preporučeni polinomi:

$$Q(p) = A_0(p)A_m(p),$$

$$P_1(p) = A_m(p),$$

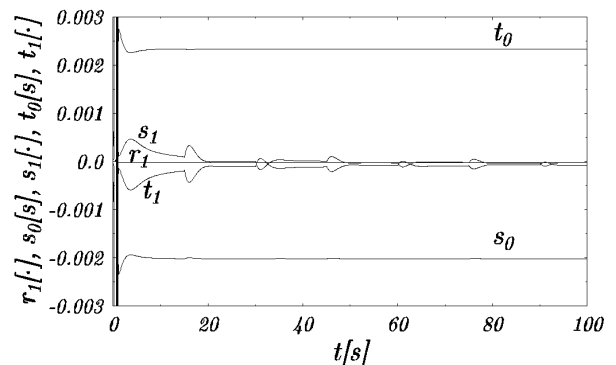
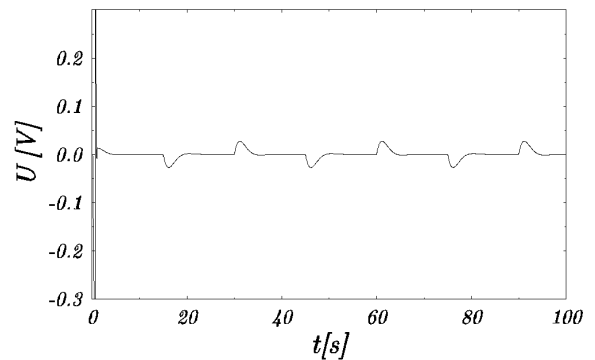
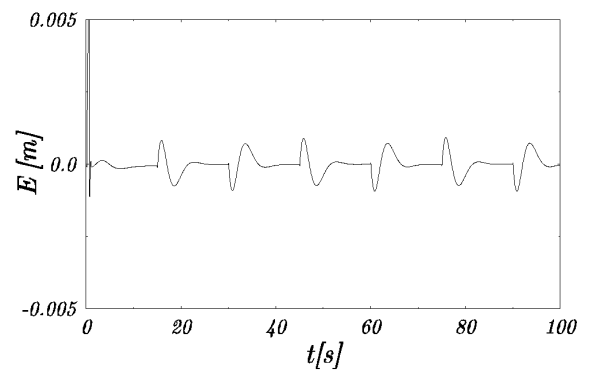
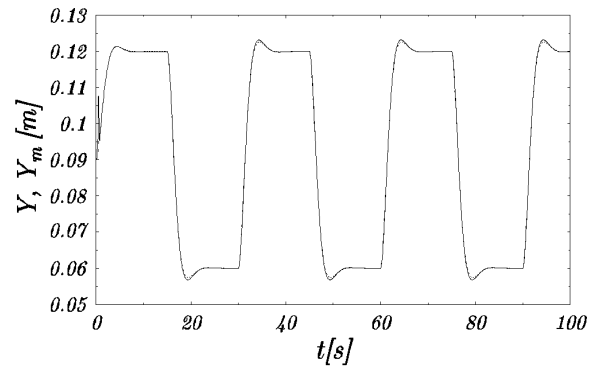
$$P_2(p) = A_0(p),$$

$$P(p) = P_1(p)P_2(p).$$

Ulazni signal u sistem U_c je usvojen u obliku povorke

pulseva sa ofsetom 0.09 m, amplitudom 0.03 m i učestanošću 1/30 Hz.

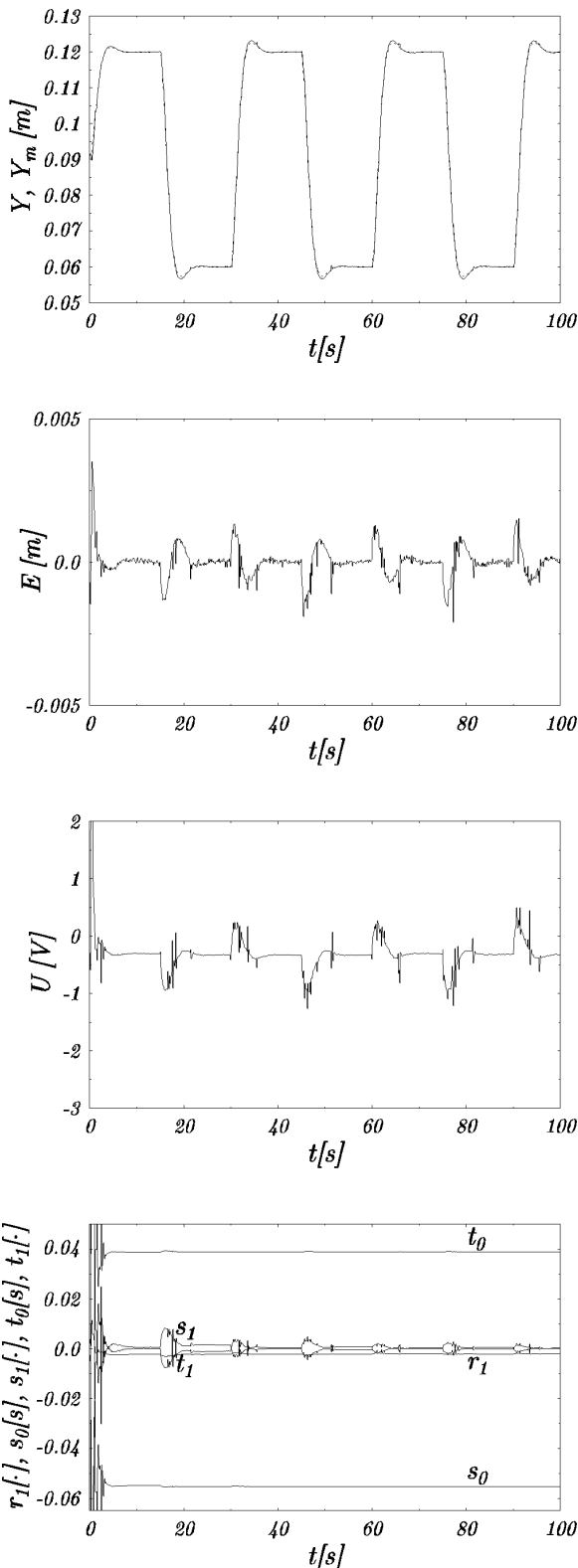
Simulacioni rezultati elektrohidrauličkog servosistema su dobijeni za prirodnu učestanost $\omega_N = 1$ rad/s i koeficijent prigušenja $\zeta = 0.707$ u referentnom modelu (2) i prikazani su na sl.4. Slično, na sl.6 mogu da se vide simulacioni rezultati za $\omega_N = 1$ rad/s i $\zeta = 1$. U oba slučaja, vrednost pojačanja adaptacije γ , pojačanja b_0 i koeficijenta a_0 u opservacionom polinomu su: $\gamma = 100 \text{ V}^2$, $b_0=1.2$ i $a_0=0$.



Slika 4. Simulacioni rezultati elektrohidrauličkog servosistema za direktni MRAS; $\omega_N = 1 \text{ rad/s}$, $\zeta = 0.707$, $b_0 = 1.2$, $\gamma = 100 \text{ V}^{-1}$ i $\alpha = 0.1$

Svaka slika se sastoji iz četiri dijagrama koji predstavljaju stvarnu i željenu vrednost izlaza, promenu greške, upravljački signal i promenu parametara regulatora, respektivno.

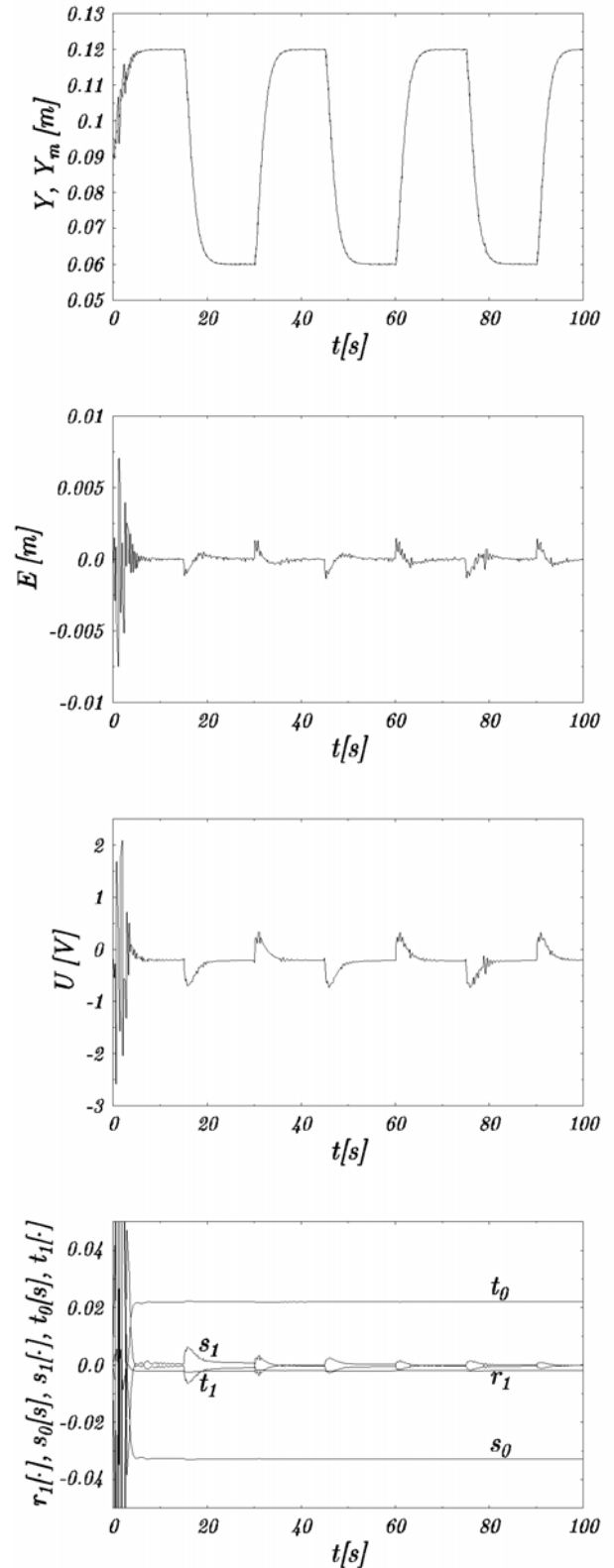
Simulacioni rezultati su dobijeni primenom direktnog MRAS-SPR kontrolera na elektrohidraulički servosistem. Uočeno je da direktni MRAS obezbeđuje zadovoljavajuću konvergenciju stvarnog izlaza Y ka izlazu iz referentnog



Slika 5. Eksperimentalni rezultati elektrohidrauličkog servosistema za direktni MRAS; $\omega_N = 1 \text{ rad/s}$, $\zeta = 0.707$, $b_0 = 1.2$, $\gamma = 100 \text{ V}^{-1}$ i $\alpha = 0.1$

modela Y_m . Posledica nulnih početnih vrednosti parametara regulatora (videti (3)), jeste da je u početnom trenutku upravljački signal takođe jednak nuli.

B. Eksperiment



Slika 7. Eksperimentalni rezultati elektrohidrauličkog servosistema za direktni MRAS; $\omega_N = 1 \text{ rad/s}$, $\zeta = 1$, $b_0 = 1.2$, $\gamma = 100 \text{ V}^{-1}$ i $\alpha = 0.1$

Slika 6. Simulacioni rezultati elektrohidrauličkog servosistema za direktni MRAS; $\omega_N = 1 \text{ rad/s}$, $\zeta = 1$, $b_0 = 1.2$, $\gamma = 100 \text{ V}^{-1}$ i $\alpha = 0.1$

rad/s i koeficijent prigušenja $\zeta = 1$. Tokom eksperimenta perioda odabiranja je bila 0.0005 ms.

Eksperimentalni rezultati prikazuju da je greška E između pozicije klipa Y i izlaza iz modela Y_m zadovoljavajuće mala. Parametri regulatora brzo teže svojim stacionarnim vrednostima i zatvoreni sistem je stabilan.

Postojanje viših učestanosti u signalu greške i upravljačkom signalu je posledica prisustva šuma pri merenju položaja klipa i jevtinog A-D konvertora.

Zaključak

Rezultati dobijeni snimanjem simulacionih i eksperimentalnih rezultata pokazuju da MRAS-SPR kontroler obezbeđuje da se ostvare propisani zahtevi za dinamičkim ponašanjem sistema.

Izabrane vrednosti parametara γ , b_0 i a_0 u upravljačkom sistemu daju brzu konvergenciju stvarnog izlaza Y ka izlazu iz referentnog modela Y_m . Zakon upravljanja, takođe obezbeđuje stabilnost zatvorenog sistema.

Uočena je konvergencija podešljivih parametara regulatora, ali je konstatovano da oni imaju različite vrednosti u slučaju simulacije i eksperimenta. To može da se objasni nepreciznostima pri matematičkom modelovanju elektrohidrauličkog servosistema.

Različiti nivoi upravljačkog signala u simulacionim i eksperimentalnim rezultatima posledica su veće krutosti matematičkog modela u odnosu na stvarni sistem, a što je posledica curenja ulja u servoventilu i cilindru u stvarnim uslovima, kao i stišljivosti ulja.

U toku prelaznog procesa vrednost relativnog odstupanje stvarnog izlaza iz sistema u odnosu na izlaz iz referentnog modela ne prelazi 5%, dok je posle završenog prelaznog

procesu statička greška jednaka nuli.

Uprkos činjenici da zakon upravljanja daje zatvoreni sistem trećeg reda, sistem se ponaša kao da je drugog reda sa polovima koji su u korespondenciji sa željenom prirodnom učestanošću ω_N i koeficijentom prigušenja ζ .

Literatura

- [1] JOVANOVIĆ, M. *Praktično prateće automatsko upravljanje klipno-aksijalnih hidrauličkih motora*, magistarski rad, Mašinski fakultet, Beograd, 1998.
- [2] ÅSTÖM, K.J. Theory and Application of Adaptive Control-A Survey, *Automatica*, 1983, no.19, p.471-486,.
- [3] ÅSTÖM, K.J. WITTENMARK, B. *Adaptive Control*. Addison-Wesley, New York, 1989.
- [4] LANDAU, I.D. A Hyperstability Criterion for Model Reference Adaptive Control Systems. *IEEE Trans. Aut. Control*, 1969, AC-14, p.552-555.
- [5] LANDAU, I.D. A Survey of Model Reference Adaptive Control Techniques - Theory and Applications. *Automatica*, 1974, no.10, p.353-380.
- [6] ČEBAŠEK, N. *Upravljanje pneumatskih i hidrauličkih cilindara primenom nekonvencionalnih upravljačkih algoritama*, magistarski rad, Mašinski fakultet, Beograd, 1996.
- [7] RISTANOVIĆ, M. *Analiza i sinteza nelinearnih upravljačkih algoritama realizovanih elektropneumatskim komponentama*, magistarski rad, Mašinski fakultet, Beograd, 2000.
- [8] SEKULIĆ, D. *Automatsko upravljanje prese za brizganje plastike*, magistarski rad, Mašinski fakultet, Beograd, 2000.
- [9] SEKULIĆ, D., RISTANOVIĆ, M. *The Model Reference Adaptive Control of an Electrohydraulic Servosystem*. XLIII konferencija ETRAN Zlatibor, Jugoslavija, 20.-22. septembar 1999, p.248-251.

Rad primljen: 27.12.2000.god.

