

Adaptivno vodenje pomika hidravličnega servocilindra

Klemen Nagode¹, Igor Škrjanc²

¹Savske elektrarne Ljubljana d.o.o., Gorenjska cesta 46, 1215 Medvode, Slovenija

²Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

E-mail: nagode.klemen@gmail.com

Adaptive control of a hydraulic servo-cylinder displacement

This paper presents adaptive control of a hydraulic servo-cylinder displacement. The proposed dynamic mathematical model includes dynamics of a servo-valve and servo-cylinder with piston. The adaptive control algorithm is realized with a combination of the direct fuzzy model reference adaptive control (DFMRAC) and robust evolving cloud-based controller (RECCo).

The simulation results show advantages of the proposed algorithm: no off-line tuning or predefined fuzzy rules, effective control of the non-linear process and robustness. A displacement of the servo-cylinder's piston indicates tuned response to the step reference in the whole range. The adaptive approach is compared with the proportional-integral (PI) controller, tuned with an integral of time multiplied absolute error (ITAE). The adaptive control shows improved result by using less pressure energy at control of the hydraulic system.

1 Uvod

Hidravlični sistemi kljub prevladujoči prisotnosti električnih pogonov in aktuatorjev, še vedno nosijo pomembno vlogo pri nekaterih naprednih tehničnih rešitvah: robotika, hidroelektrarne, papirna industrija, itd. Zaradi natančnih hidravličnih elementov, prehodu na višje tlake in povečani računalniški moči, je razvoj matematičnih modelov hidravličnih elementov ter naprednih algoritmov vodenja nujen.

V razdelku 2 je predstavljen podroben dinamični model hidravličnega servosistema. Razdelek 3 zajema nov adaptivni algoritem s kombinacijo robustnega samorazvijajočega vodenja na osnovi oblakov ter direktno modelno referenčnega vodenja z mehko logiko. Zaprtizančni odziv adaptivnega vodenja pomika testne robotske roke ter primerjava s PI regulatorjem je predstavljena v razdelku 4.

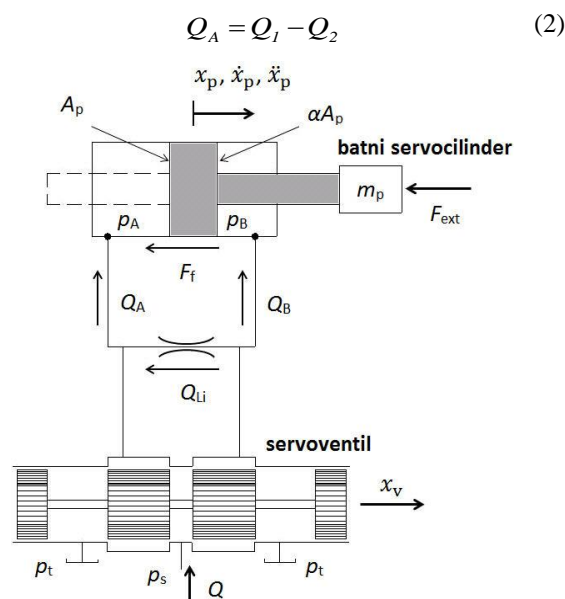
2 Matematični model hidravličnega servosistema

Matematični model hidravličnega servosistema vključuje podsklope: dinamiko krmilnega servoventila (krmiljen z vhodno napetostjo ± 10 V), relacijo pretok - tlak, katera je odvisna od premika servoventila, tlačno dinamiko servocilindra in dinamiko pomika bata

servocilindra. Normirana pozicija pomika x_v , hitrosti \dot{x}_v in pospeška \ddot{x}_v servoventila je izražena z enačbo [1]:

$$\frac{1}{w_v} \ddot{x}_v + \frac{2 \cdot D_v}{\omega_v} \dot{x}_v + x_v + f_{hs} \cdot \text{sign}(\dot{x}_v) = K_v u_v \quad (1)$$

Parametri K_v , w_v , D_v in u_v predstavljajo ojačenje ventila, lastno frekvenco, koeficient dušenja in vhodno napetost. Histereza f_{hs} vpliva na občutljivost odziva servoventila [1]. Pretok olja proti odpiralni strani servocilindra (slika 1) je izražen z enačbo (2):



Slika 1. Hidravlični servosistem.

kjer Q_1 predstavlja pretok olja iz sistema (sistemski tlak p_s) proti odpiralni strani servocilindra, Q_2 pa pretok iz odpiralne smeri proti rezervoarju olja (atmosferski tlak p_T):

$$Q_A = c_{v1} \cdot \text{sg}(x_v) \cdot \text{sign}(p_s - p_A) \cdot \sqrt{|p_s - p_A|} - c_{v2} \cdot \text{sg}(-x_v) \cdot \text{sign}(p_A - p_T) \cdot \sqrt{|p_A - p_T|} \quad (3)$$

Funkcija $\text{sg}(x)$ je definirana z enačbo (4):

$$\text{sg}(x) = \begin{cases} x; & x \geq 0 \\ 0; & x < 0 \end{cases} \quad (4)$$

V enačbi (5) je predstavljen pretok olja proti zapiralni strani servocilindra:

$$Q_B = Q_3 - Q_4 \quad (5)$$

kjer je Q_3 pretok iz sistema (sistemski tlak p_S) proti zapiralni strani, Q_4 pa pretok iz zapiralne smeri proti oljnem rezervoarju (atmosferski tlak p_T):

$$Q_B = c_{v3} \cdot sg(-x_v) \cdot sign(p_S - p_B) \cdot \sqrt{|p_S - p_B|} - c_{v4} \cdot sg(x_v) \cdot sign(p_B - p_T) \cdot \sqrt{|p_B - p_T|} \quad (6)$$

Uporabljen dinamika tlakov opisana v literaturi [1, 2] je predstavljena z enačbama (7) and (8):

$$\dot{p}_A = \frac{1}{C_{hA}} (Q_A - A_p \dot{x}_p + Q_{Li} - Q_{LeA}) \quad (7)$$

$$\dot{p}_B = \frac{1}{C_{hB}} \cdot (Q_B + \alpha A_p \dot{x}_p - Q_{Li} - Q_{LeB}) \quad (8)$$

kjer sta C_{hA} in C_{hB} funkciji hidravličnih kapacitivnosti komor A in B servocilindra [1]. Pri izračunu posamezne hidravlične kapacitivnosti sta upoštevana parametra $V_{pl,A}$ in $V_{pl,B}$, ki predstavljata neučikovito prostornino komor A in B ter stisljivostna modula $E'_A(p_A)$ in $E'_B(p_B)$.

Koeficient α predstavlja razmerje površin bata med zapiralno in odpiralno stranjo servocilindra [3]:

$$\alpha = \frac{A_r}{A_p} \quad (9)$$

pri čemer je A_p površina na odpiralni strani in A_r površina na zapiralni strani servocilindra. Upoštevane so tudi izgube pretoka Q_{Li} med komorama A in B (puščanje pretoka) ter zunanje izgube pretoka Q_{LeA} in Q_{LeB} (puščanje od posamezne komore A in B do rezervoarja olja).

Izračunano dinamiko tlakov iz enačb (7) in (8), uporabimo za zapis diferencialne enačbe gibanja bata servocilindra x_p :

$$m_t \ddot{x}_p + F_f(\dot{x}_p) = (p_A - \alpha \cdot p_B) A_p - F_{ext} \quad (10)$$

pri čemer je m_t skupna masa gibanja, F_{ext} zunanja sila in $F_f(\dot{x}_p)$ funkcija trenja odvisna od hitrosti gibanja. Slednja vsebuje vsoto Stribeckove, Coulombove in viskozne komponente trenja [1] (parametri podani v Tabeli I).

Zaradi integrirnega značaja matematičnega modela, je bil za proučitev statične karakteristike le-ta vzbujan z napetostnimi impulzi različnih širin (0,05 to 0,25 s)

preko servovalva. Pomik bata servocilindra je izrazito nelinearno odvisen od vhodne napetosti na servovalvu.

3 Adaptivno vodenje

3.1 Direktno modelno referenčno vodenje z mehko logiko (DFMRAC)

Direktni modelni referenčni algoritem postopoma minimizira napako med procesom in referenčnim modelom. Za referenčni model je bil uporabljen sistem prvega reda s parametroma $a_m=20$ in $b_m=20$:

$$\dot{y}_m = -a_m y_m + b_m w \quad (11)$$

za proces y_p pa je bil uporabljen pomik bata servocilindra x_p iz enačbe (10).

Regulacijski zakon [4]

$$u = (\beta^T f) w - (\beta^T q) y_p \quad (12)$$

s parametroma f in q minimizira napako sledenja z adaptivnim algoritmom [4]:

$$\dot{f}_i = -\gamma_{fi} b_{sign} \varepsilon w \beta_i - \gamma_{fi} |\varepsilon m| v_0 f_i \beta_i \quad (13)$$

$$\dot{q}_i = -\gamma_{qi} b_{sign} \varepsilon y_p \beta_i - \gamma_{qi} |\varepsilon m| v_0 q_i \beta_i \quad (14)$$

za $i=1,2,\dots,k$; kjer sta γ_{fi} in γ_{qi} skalarja adaptivnih ojačenj, β_i pripadnostna funkcija, w referenčni signal, ε pogrešek sledenja, v_0 parameter puščanja (vpliva na robustnost) in b_{sign} signum funkcija vhodnega vektorja b .

3.2 Robustni samorazvijajoč regulator na osnovi oblakov (RECCo)

Samorazvijajoč algoritem RECCo temelji na sistemu mehkih pravil ANYA in kreira oblake v odvisnosti od relativne gostote podatkov. S tem se definira predhodne podatke, ki predstavljajo porazdelitev in gostoto realnih podatkov. Izračun poteka rekurzivno iz toka podatov, vzporedno z regulacijo procesa [5]. Znotraj samorazvijajočega procesa se formira struktura in parametri oblakov iz prejšnjih vzorcev na osnovi medsebojne razdalje v prostoru.

Normalizirana relativna gostota (15) predstavlja stopnjo pripadnosti vzorca \bar{x}_k oblaku \bar{X}_i :

$$\lambda_k^i = \frac{\gamma_k^i}{\sum_{j=1}^N \gamma_k^i} \quad i = 1, \dots, N \quad (15)$$

kjer je γ_k^i lokalna gostota i -tega oblaka vzorca \bar{x}_k .

Lokalna gostota je definirana z jedrom preko razdalje med \bar{x}_k in vsemi ostalimi vzorci v oblaku [5]:

$$\gamma_k^i = K \left(\sum_{j=1}^{M^i} d_{kj}^i \right) \quad i = 1, \dots, N \quad (16)$$

pri čemer je K jedro ter d_{kj}^i razdalja med vzorcema \bar{x}_k in \bar{x}_j . Podrobnejša procedura kreiranja novih oblakov samorazvijajočega regulatorja je opisana v [5].

Izhod ANYA regulatorja (ostrenje z uteženim povprečenjem) je definirano z enačbo:

$$u_k^i = \sum_{i=1}^N \lambda_k^i u^i = \frac{\sum_{i=1}^N \gamma_k^i u^i}{\sum_{i=1}^N \gamma_k^i} \quad (17)$$

kjer u^i predstavlja i -to posledično pravilo [5].

Kombinacija obeh regulacijskih algoritmov je predstavljena z regulirnim zakonom (18):

$$u_k^i = f_k^i w - q_k^i y_p \quad i = 1, \dots, N \quad (18)$$

Mrtva cona (19) in puščanje (20) sta dodana regulacijskima parametroma f_k^i in q_k^i z namenom povečanja robustnosti [5]:

$$\Delta f_k^i = \begin{cases} \gamma_f G_{sign} \lambda_k^i(\bar{x}) \varepsilon_k & |\varepsilon_k| \geq d_{dead} \\ 0 & |\varepsilon_k| < d_{dead} \end{cases} \quad i = 1, \dots, N \quad (19)$$

$$f_k^i = (1 - \sigma_f) f_{k-1}^i + \Delta f_k^i \quad i = 1, \dots, N \quad (20)$$

in podobno za q_k^i , kjer sta γ_f in γ_q adaptivni ojačeni, $G_{sign} = \pm 1$ (definiran predznak), d_{dead} mrtva cona ter σ_f in σ_q parametra puščanja.

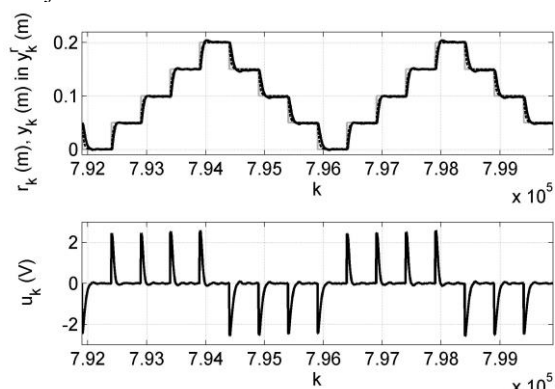
4 Rezultati simulacije

Na sliki 2 je prikazan rezultat adaptivnega vodenja po 200 periodah učenja z referenčnim signalom in časom vzorčenja $T_s = 2$ ms. Adaptivni ojačeni sta znašala $\gamma_f = 20$ in $\gamma_q = 20$, mrtva cona $d_{dead} = 0.001$ in parametra puščanja $\sigma_f = 2 \cdot 10^{-6}$ and $\sigma_g = 2 \cdot 10^{-6}$.

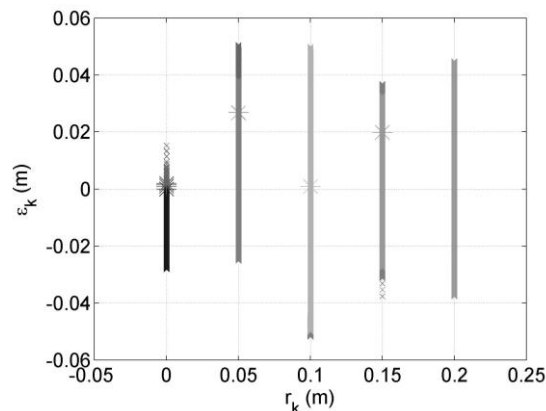
Adaptivni algoritem je brez predhodnih informacij o procesu razvil strukturo regulatorja z 7 oblaki (slika 3) in parametri f_k^i in q_k^i , ki so skonvergirali po 200 periodah adaptacije z referenčnim singalom. Rezultat adaptivnih parametrov je prikazan na sliki 4.

Pozicija servoventila je prikazana na sliki 5 (zgornji graf). Pozitivni pomiki servoventila (za diskretne časovne trenutke $k=7.924 \cdot 10^5$ do $k=7.944 \cdot 10^5$ in $k=7.964 \cdot 10^5$ do $k=7.984 \cdot 10^5$) povzročijo hitro povečanje pretoka olja Q_A proti odpiralni strani servocilindra (komora A), medtem ko ima pretok

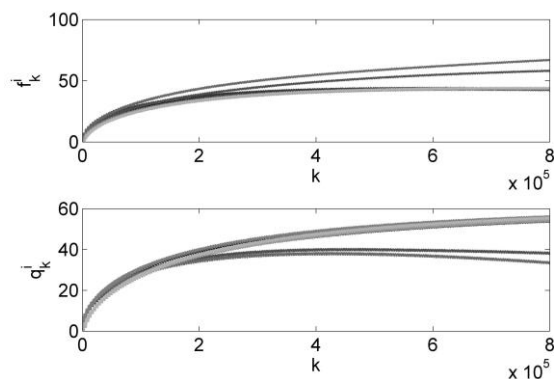
Q_B negativno vrednost – olje iz zapiralne smeri servocilindra (komora B) odteče v oljni rezervoar. Posledično se tlak p_A na odpiralni strani (komora A) poveča, tlak p_B na zapiralni strani (komora B) pa zmanjša.



Slika 2. Referenca pomika, pomik bata servocilindra in odziv referenčnega modela (zgornji graf) ter regulirna napetost na servoventilu (spodnji graf).



Slika 3. Struktura regulatorja – 7 generiranih oblakov med procesom učenja.

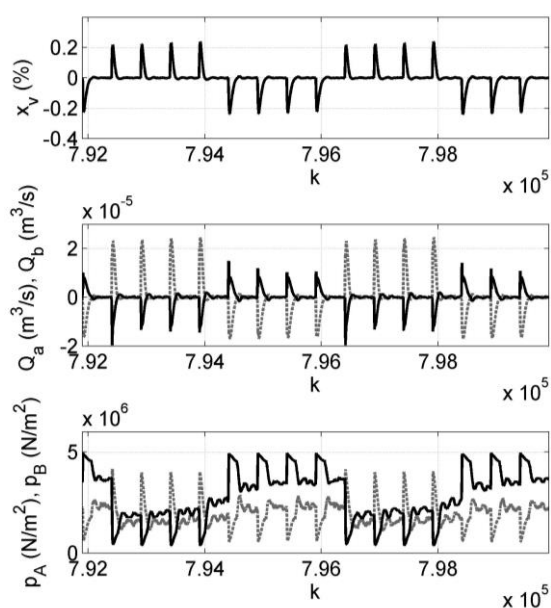


Slika 4. Adaptivni parametri f_k^i in q_k^i .

Slika 6 prikazuje primerjavo med adaptivnim vodenjem (temnejša barva) in PI regulatorjem (svetlejša barva). PI regulator je bil uglašen z minimizacijo ITAE integralske cenilke [6]:

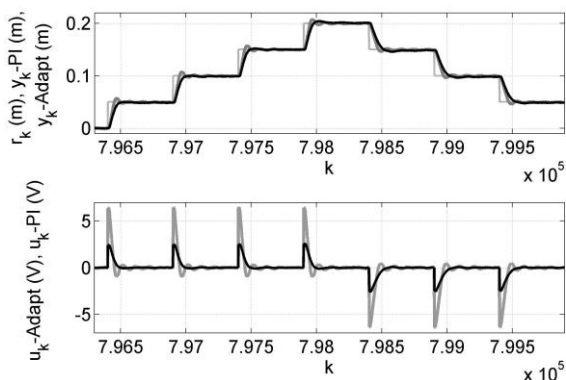
$$\int_0^{\infty} t |e(t)| dt = \min \quad (21)$$

pri čemer je t čas simulacije in $e(t)$ signal pogreška med referenco in pozicijo bata servocilindra.



Slika 5. Pozicija servoventila x_v , pretoka olja Q_a (črtkana svetlejša krivulja) in Q_b (temnejša krivulja) ter tlaka p_A (črtkana svetlejša krivulja) in p_B (temnejša krivulja) v komorah servocilindra.

Adaptivni regulator ima malenkost daljši čas vzpona, a bistveno manjši maksimalni prevzpon in krajši umiritveni čas. Tudi regulirni signal je bistveno manjši v primeru adaptivnega vodenja ($U=2,59$ V) v primerjavi s PI regulatorjem ($U=6,44$ V).



Slika 6. Referenca pomika, odziv s PI regulatorjem (svetlejša barva, zgornji graf) in z adaptivnim regulatorjem (temnejša barva, zgornji graf). Primerjava napetostnih signalov pri PI regulatorju (svetlejša barva, spodnji graf) in adaptivnem regulatorju (temnejša barva, spodnji graf).

Zvezni signali tlakov brez hitrih skočnih sprememb, primeren regulirni napetostni signal in dobro sledenje pozicije bata servocilindra referenčnemu signalu, prikazujejo prednosti predstavljenega adaptivnega algoritma.

Parametri uporabljeni pri simulaciji so prikazani v Tabeli I.

Tabela I. Parametri fleksibilne testne robotske roke - hidravličnega sistema [1] uporabljenega v simulaciji.

Parameter	Vrednost
Skupna masa gibanja	$m_T = 2$ kg
Razmerje površin bata	$\alpha = 1/2.08$
Površina odpiralne strani bata	$A_p = 49,9 \cdot 10^{-6}$ m ²
Maks. pomik servocilindra	$S = 0.2$ m
Zunanja sila	$F_{ext} = 30$ N
Viskozno trenje ($v > 0$)	$\sigma_p = 220$ N s/m
Coulombovo trenje ($v > 0$)	$F_{c0,p} = 50$ N
Statično trenje ($v > 0$)	$F_{s0,p} = 30$ N
Stribeckova hitrost ($v > 0$)	$c_{s0,p} = 0.015$ m/s
Viskozno trenje ($v < 0$)	$\sigma_n = 180$ N s/m
Coulombovo trenje ($v < 0$)	$F_{c0,n} = 50$ N
Statično trenje ($v < 0$)	$F_{s0,n} = 20$ N
Stribeckova hitrost ($v < 0$)	$c_{s0,n} = 0.007$ m/s
Sistemi delovni tlak	$p_s = 50 \cdot 10^5$ N/m ²
Neučinkovit vol. komor A, B	$V_{pl,A,B} = 94.3 \cdot 10^{-6}$ m ³
Koeficient puščanja pretoka	$C_{li} = 14 \cdot 10^{-16}$ m ³ /s
Ojačenje servoventila	$K_v = 1$
Lastna frekvenca servoventila	$\omega_v = 100$ Hz
Koeficient dušenja servovent.	$D_v = 1$
Histereza servoventila	$f_{hs} = 1 \cdot 10^{-5}$
Krmilna napetost servovent.	$u_v = \pm 10$ V

5 Zaključek

V članku je predstavljeno robustno adaptivno vodenje nelinearnega hidravličnega servosistema z vključeno dinamiko servoventila, karakteristiko pretoka in tlaka ter dinamiko gibanja bata servocilindra. Uporabljen regulirni zakon združuje direktni modelno referenčni algoritem z mehko logiko in robustno samorazvijajoče vodenje na osnovi oblakov. Primerjava s PI regulatorjem prikazuje boljši odziv v primeru adaptivnega vodenja. Prehodni pojavi pretokov in tlakov olja so v primeru adaptivnega vodenja zvezni, brez preobremenjujočih hitrih sprememb, kar dokazuje kvalitetno ušlašenja regulacija pomika servocilindra.

Literatura

- [1] M. Jelali, A. Kroll: Hydraulic Servo-systems. Modelling, identification and control, Springer, 2004, London, Great Britain
- [2] A. Kugi: Non-linear Control Based on Physical Models, Springer, 2001, London, Great Britain
- [3] W. Götz, S. Hack, R. Mertlik: Electrohydraulic Proportional and Control Systems, Omegon Fachliteratur, 1999, Ditzingen, Germany
- [4] S. Blažič, I. Škrjanc, D. Matko: Globally stable direct fuzzy model reference adaptive control, Fuzzy sets and systems, 139 (2003), pp 3-33
- [5] P. Angelov, I. Škrjanc, S. Blažič: Robust evolving cloud-based controller for a hydraulic plant, IEEE Conference on Evolving and Adaptive Intelligent Systems, 16. – 19. September 2013, Singapore, Republic of Singapore
- [6] B. Zupančič: Zvezni regulacijski sistemi – I. del, Založba FE in FRI, 1996, Ljubljana, Slovenija