

Simulácia fuzzy adaptívnej regulácie polohového servosystému na báze pneumatických umelých svalov

Mária Tóthová*, Alena Vagaská*, Stella Hrehová*, Michal Moučka**

*Technická univerzita v Košiciach, Fakulta výrobných technológií so sídlom v Prešove,
Katedra matematiky, informatiky a kybernetiky, Prešov, Slovenská republika
maria.tothova@tuke.sk, alena.vagaska@tuke.sk, stella.hrehova@tuke.sk

** Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojná, Katedra aplikované kybernetiky,
Liberec, Česká republika
michal.moucka@tul.cz

Abstrakt

Využitie pneumatických umelých svalov ako pohonov manipulačných zariadení je vzhľadom na ich značne nelineárne charakteristiky podmienené využívaním aj nelineárnych riadiacich algoritmov. Fuzzy adaptívne riadenie v tomto príspevku pozostáva z PD regulátora v priamej vetve a fuzzy regulátora v adaptačnej vetve, pričom akčný signál ovládajúci polohovací systém antagonisticky zapojených umelých svalov vznikne násobením signálu z výstupu PD regulátora a adaptačného zosilnenia z výstupu fuzzy regulátora. V príspevku je popísaný fuzzy regulátor typu Mamdani použitý v adaptačnom podsysteme, na ktorého natréňovanie boli využité znalosti vyplývajúce zo skúmania reálnej sústavy pneumatických umelých svalov.

Kľúčové slová: fuzzy adaptívna regulácia, pneumatický umelý sval.

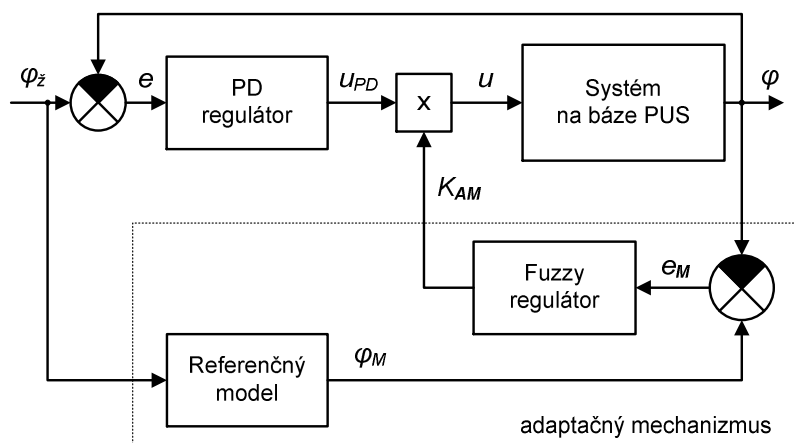
1 Úvod

Pri použití servosystémov na báze pneumatických umelých svalov (PUS), ako napr. pohonov manipulačných zariadení, je potrebné brať do úvahy nelineárny charakter tohto pohonu, ktorý má zásadný vplyv na riaditeľnosť celej sústavy. Na základe dosiahnutých výsledkov riadenia antagonistického aktuátora s PUS v [1] a [2] je možné konštatovať,

že pomocou konvenčného lineárneho PID regulátora nie je možné dosiahnuť požadovanú kvalitu regulácie v celom pracovnom rozsahu a pri predpokladaných zmenách parametrov sústavy. Kým pri menovitom momente zotrvačnosti bola kvalita regulácie uspokojivá [3], [4], pri vyšších momentoch zotrvačnosti nebolo kvôli vzniknutým osciláciám možné v mnohých prípadoch realizovať plynulý chod ramena resp. zabezpečiť stabilný regulačný pochod pri rýchlych zmenách žiadanej hodnôt výchylky ramena aktuátora [5]. Východiská pre návrh pokročilého riadenia polohového servosystému na báze PUS aj využitím techník výpočtovej inteligencie možno zhrnúť nasledovne [6]:

- 1) konvenčný lineárny PID regulátor nie je schopný zabezpečiť kvalitu regulácie v celom pracovnom rozsahu a pri zmenách momentu zotrvačnosti,
- 2) odozva systému na skokovú zmenu žiadanej výchylky ramena sa predpokladá bez preregulovania, pričom dynamiku odozvy bude určovať referenčný model,
- 3) navrhované riadenie by malo zabezpečiť priebeh blízky priebehu referenčného modelu aj pri zmenách momentu zotrvačnosti,
- 4) vzhľadom k predpokladaným rýchlym zmenám hodnôt žiadanej výchylky ramena je žiaduce, aby navrhnuté riadenie umožňovalo rýchle odozvy systému,
- 5) pre zlepšenie výslednej kvality regulácie sa predpokladá využitie modelov svalov pre optimalizáciu riadenia v simulačnom prostredí.

Podľa bodu 3 sa predpokladá použitie adaptívneho systému, ktorého vlastnosti by zabezpečovali prispôsobovanie zásahov regulátora pri zmenách momentu zotrvačnosti. Jednou z možností je využitie MRAC (Model Reference Adaptive Control) systému, ktorý využíva referenčný model pre určovanie žiadanej dynamiky regulačného obvodu (bod 2) [4], [7]. Princiálna schéma adaptívneho riadenia s referenčným modelom je naznačená na Obrázku 1, ktorého princíp je popísaný v [8], [9].

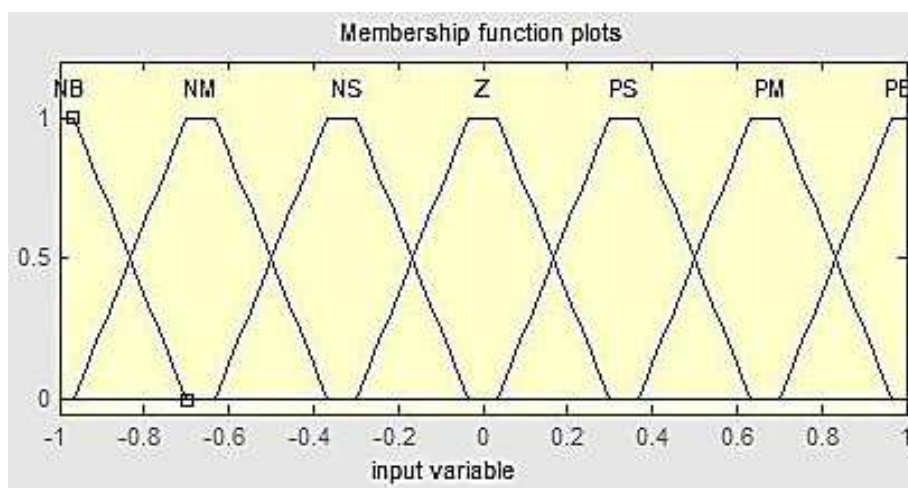


Obrázok 1: Adaptívne riadenie s referenčným modelom a fuzzy regulátorom

Podľa bodu 5 bol sval modelovaný tromi rôznymi spôsobmi [10], [11] a pre simulačné účely v danom adaptívnom riadení bol použitý pokročilý geometrický model svalu, ktorý je popísaný v prácach autorov [12] a [13].

2 Fuzzy regulátor typu Mamdani

Fuzzy regulátor typu Mamdani bol zvolený nultého rádu (z dôvodu nízkej výpočtovej náročnosti, čo je vhodné pre aplikácie riadenia v reálnom čase) a typu DISO (dva vstupy, jeden výstup). Pri tomto type regulátora boli testované lichobežníkové funkcie príslušnosti (*trapmf*) znázornené na Obrázku 2, pretože experimentálne bolo zistené, že vykazujú pri zmene veľkosti závažia pripevnenom na konci ramena aktuátora dobré výsledky. Jadro fuzzy regulátora tvorilo sedem funkcií príslušnosti (NB - Negative Big, NM - Negative Medium, NS - Negative Small, Z - Zero, PS - Positive Small, PM - Positive Medium, PB - Positive Big.), ktoré sa prekrývali cez príslušné univerzum (pracovný interval) [14]. Tieto funkcie príslušnosti sú rovnaké pre oba vstupujúce signály do fuzzy regulátora, a to pre dynamickú chybu e_M a diskretnú deriváciu dynamickej chyby Δe_M a taktiež pre výstup z regulátora vo forme signálu adaptačného zosilnenia K_{AM} . Vstupné a výstupné premenné sú normalizované na pracovnom intervale v rozsahu $\langle -1; 1 \rangle$ [15].



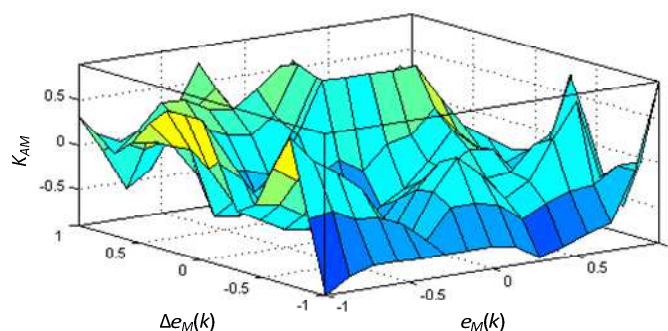
Obrázok 2: Rozloženie funkcií príslušnosti *trapmf*

Výsledky uvedené v Tabuľke 1 boli získané pre všetky násobky menovitého momentu zotrvačnosti [6] a boli optimalizované na základe znalostí získaných z reálnej sústavy antagonisticky zapojených PUS. V podmienkovej časti pravidla bola použitá *min* T-norma, pri agregácii kombinácií výsledkov pravidiel bola zvolená funkcia *max* a pri defuzzifikácii bola využitá metóda ťažiska (*centroid*).

Z grafického znázornenia výslednej fuzzy plochy na Obrázku 3 je zrejماً výrazná nelinearita vzťahu kompenzácií zásahov PD regulátora prostredníctvom zosilnenia K_{AM} na normalizovaných hodnotách regulačnej odchýlky e_M v dynamike a jej derivácii Δe_M . Na osi x sa nachádza dynamická chyba systému, na osi y sú vynesené hodnoty diskretné derivácie dynamickej chyby a os z znázorňuje výstup z fuzzy regulátora vo forme signálu adaptačného zosilnenia K_{AM} .

Tabuľka 1: Výsledná fuzzy tabuľka s hodnotami konzekvencií fuzzy pravidiel po evolúcii adaptívneho regulátora typu Mamdani s funkciami príslušnosti *trapmf*

e_M							
Δe_M	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	-0,83	-0,67	-0,67	-0,76	-0,81	-0,77	0,78
NM	0,90	0,29	-0,67	0,24	-0,22	0,86	-0,74
NS	-0,38	-0,50	-0,97	-0,24	0,39	-0,79	0,80
Z	0,72	-0,21	0,94	0,95	0,85	-0,11	-0,34
PS	0,89	-0,81	-0,79	0,61	0,25	-0,67	-0,64
PM	0,20	0,73	0,21	0,84	-0,24	0,75	-0,64
PB	0,35	-0,73	0,90	-0,40	0,66	-0,63	-0,16

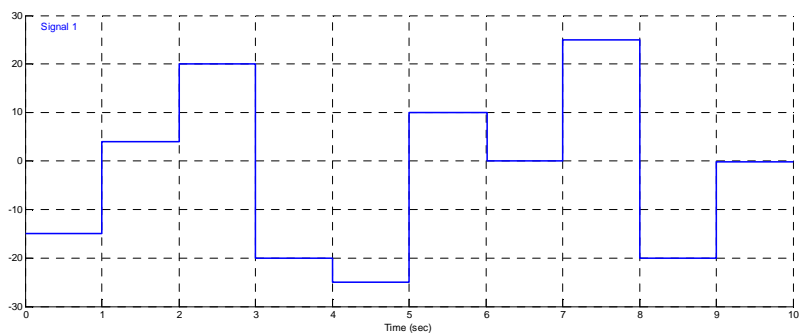


Obrázok 3: Výsledná fuzzy plocha typu Mamdani s funkciami príslušnosti *trapmf*

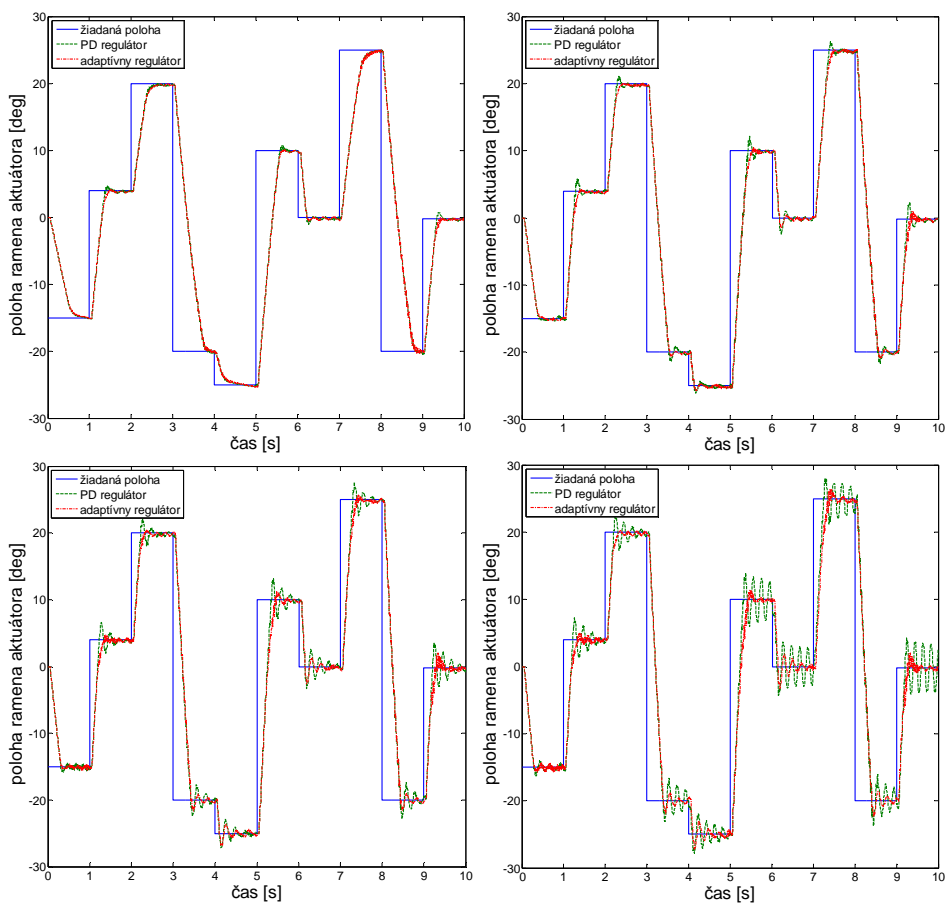
3 Výsledky simulácie fuzzy adaptívnej regulácie

Riadiaca schéma fuzzy adaptívnej regulácie aktuátora s PUS bola navrhnutá a vytvorená v prostredí Matlab/Simulink a je podrobnejšie popísaná v prácach autorov [9], [16], [17]. Riešenie vychádza z doterajších poznatkov nadobudnutých v priebehu výskumu so špecifikami predpokladanej aplikácie a použitých komponentov, dostupnej teórie o procesoch prebiehajúcich v skúmanom systéme a dostupných informácií z experimentálneho výskumu.

Pre testovanie adaptívnej regulácie s Mamdani fuzzy regulátorom bol v riadiacej schéme v [14] do bloku s názvom "*Fuzzy Logic*" importovaný navrhnutý fuzzy regulátor typu Mamdani popísaný vyššie. Hodnota zosilnenia dynamickej chyby K_e bola 0,0065 a pre zosilnenie diskkrétnej derivácie dynamickej chyby $K_{\Delta e}$ bola 0,0004. Zosilnenia pre PD regulátor boli nastavené na hodnoty $K_P = 0,25$ a $K_D = 0,0025$. Žiadaná hodnota polohy sa menila v intervale $\langle -25^\circ; +25^\circ \rangle$ a dĺžka simulácie bola 10 s, počas ktorej muselo rameno aktuátora dosiahnuť 10 žiadaných polôh (Obrázok 4).



Obrázok 4: Budiaci signál regulátora pre simuláciu fuzzy adaptívnej regulácie (postupnosť náhodných skokov žiadanej polohy)



Obrázok 5: Simulované priebehy polohy ramena aktuátora s rôznou záťažou (bez záťaže ramena - vľavo hore, záťaž 1,2 kg - vpravo hore, záťaž 2,14 kg - vľavo dole, záťaž 3,34 kg - vpravo dole)

Boli vykonané štyri série testovania s rôznou záťažou aktuátora, a to bez záťaže, so záťažou 1,2 kg, 2,14 kg a 3,34 kg upevnenou na konci ramena aktuátora a získané simulované priebehy, ktoré sú zobrazené na Obrázku 5. Z priebehov je možné vidieť, že fuzzy regulátor typu Mamdani pozitívne koriguje zásahy PD regulátora, čo je najlepšie vidieť na Obrázku 5 vpravo dole, kde samotný PD regulátor výrazne osciloval okolo žiadanej polohy ramena, pričom adaptívny regulátor sledoval žiadanú polohu s lepšou presnosťou. Mierna odchýlka nastala pri vyšších skokových zmenách pri posledných dvoch zaťaženiach ramena aktuátora, čo môže byť zapríčinené chybou v dynamike modelu.

Z grafických výstupov môžeme taktiež sledovať pri fuzzy adaptívnej regulácii polohového servosystému na báze PUS v určitých úsekoch malé skokovité zmeny polohy ramena. Tieto zmeny môžeme pripísať diskontinuálnej povahe PWM regulácie, ale aj ešte stále nedostatočnému vplyvu fuzzy regulátora na výsledný akčný signál.

4 Záver

V príspevku sú popísané výsledky simulácie fuzzy adaptívnej regulácie polohového servosystému na báze PUS bez zaťaženia a so záťažou upevnenou na konci ramena aktuátora použitím fuzzy adaptívneho regulátora typu Mamdani a iba PD regulátora. Je možné konštatovať, že pri riadení iba PD regulátorom sa so zvýšenou záťažou na konci ramena objavujú oscilácie okolo žiadanej polohy, čo je neprijateľné z hľadiska praktického využitia manipulačného zariadenia poháňaného takýmto aktuátorom. Použitie adaptívneho riadenia s relatívne jednoduchým fuzzy regulátorom typu Mamdani nultého rádu s lichobežníkovými funkciami príslušnosti tieto nežiaduce oscilácie v značnej miere potlačuje.

Príspevok preukázal vhodnosť využitia techník výpočtovej inteligencie pri riadení systému s výraznými nelinearitami. Aj napriek dosiahnutým pozitívnym výsledkom môžeme v niektorých prípadoch sledovať odchýlky od žiadanej polohy ramena. To môže byť spôsobené nepresným návrhom fuzzy regulátora, resp. sa na tomto môžu výrazne podieľať symetricky rozložené funkcie príslušnosti. Vhodným pokračovaním výskumu v danej oblasti môže byť optimalizácia vytvoreného algoritmu riadenia, resp. jeho adaptačného podsystému, využitím optimalizačných metód umelej inteligencie (genetické algoritmy, simulované žihanie...).

PodĎakovanie. *Príspevok bol spracovaný s podporou projektu APVV, názov projektu: „Modelovanie a simulácia elektropneumatických mechatronických sústav na báze umelých svalov“, evidenčné číslo projektu SK-CZ-2013-0138.*

Literatúra

- [1] J. Piteľ, PWM Control of the PAM Based Antagonistic Actuator, *Proceedings of XXXIV. Seminar ASR'2009 "Instruments and Control"*, 2009.
- [2] J. Piteľ, *Automatizácia výrobných technológií využitím manipulačných zariadení poháňaných umelými svalmi*. Habilitačná práca, 2008.

- [3] A. Hošovský, J. Novák-Marcinčin, J. Piteľ, J. Boržíková, K. Židek, Model-based Evolution of a Fast Hybrid Fuzzy Adaptive Controller for a Pneumatic Muscle Actuator, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 9 (56), 2012.
- [4] A. Hošovský, P. Michal, M. Tóthová, O. Biroš, Fuzzy Adaptive Control for Pneumatic Muscle Actuator with Simulated Annealing Tuning, *Proceedings of 12th IEEE International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI 2014)*, 2014.
- [5] J. Piteľ, M. Balara, J. Boržíková, Control of the Actuator with Pneumatic Artificial Muscles in Antagonistic Connection, *TRANSACTIONS of the VŠB – Technical University of Ostrava*, 2/2007.
- [6] A. Hošovský, *Metódy výpočtovej inteligencie v modelovaní a riadení manipulačných zariadení poháňaných umelými svalmi*. Habilitačná práca, Prešov: FVT TU v Košiciach, 2014.
- [7] A. Hošovský, Fuzzy Adaptive Controller for one-DOF PAM-Based Actuator with Reference Model, *Applied Science in Thermodynamics and Fluid Mechanics*, Vol. 3, No. 2, 2009.
- [8] M. Tóthová, J. Piteľ, Reference Model for Hybrid Adaptive Control of Pneumatic Muscle Actuator, *Proceedings of 9th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI 2014)*, 2014.
- [9] A. Hošovský, J. Mižáková, J. Piteľ, Improved Modeling of Pneumatic Muscle Actuator Using Recurrent Neural Network, *International Joint Conference of Neural Networks (IJCNN 2014)*, 2014.
- [10] J. Piteľ, M. Tóthová, Operating Characteristics of Antagonistic Actuator with Pneumatic Artificial Muscles, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 616, 2014.
- [11] M. Tóthová, J. Piteľ, Dynamic Simulation of Pneumatic Muscle Actuator in Matlab/Simulink Environment, *Proceedings of IEEE 12th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY 2014)*, 2014.
- [12] J. Piteľ, M. Tóthová, Mathematical Description of the Advanced Geometric Muscle Model, *Extended Abstract Book of 18th International Summer School on Global Analysis and Applications*, 2013.
- [13] M. Tóthová, J. Piteľ, Simulation of Actuator Dynamics Based on Geometric Model of Pneumatic Artificial Muscle, *Proceedings of IEEE 11th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY 2013)*, 2013.
- [14] M. Tóthová, A. Vagaská, K. Židek, M. Moučka, Simulácia fuzzy adaptívneho riadenia pneumatického aktuátora s umelými svalmi, *Proceedings of 39. Seminar ASR'2015 "Instruments and Control"*, 2015.
- [15] M. Havran, *Počítačová podpora riadenia nekonvenčného pohonu manipulačného zariadenia*. Dizertačná práca, Prešov: FVT TU v Košiciach, 2012.
- [16] J. Piteľ, A. Hošovský, M. Tóthová, Dynamic Simulation Model of PMA Fuzzy Adaptive Control, *Proceedings of 6th International Multi-Conference on Complexity, Informatics and Cybernetics (IMCIC 2015)*, 2015.
- [17] J. Piteľ, M. Tóthová, Design of Hybrid Adaptive Control of Antagonistic Pneumatic Muscle Actuator, *Proceedings of 34th IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control (MIC 2015)*, 2015.