



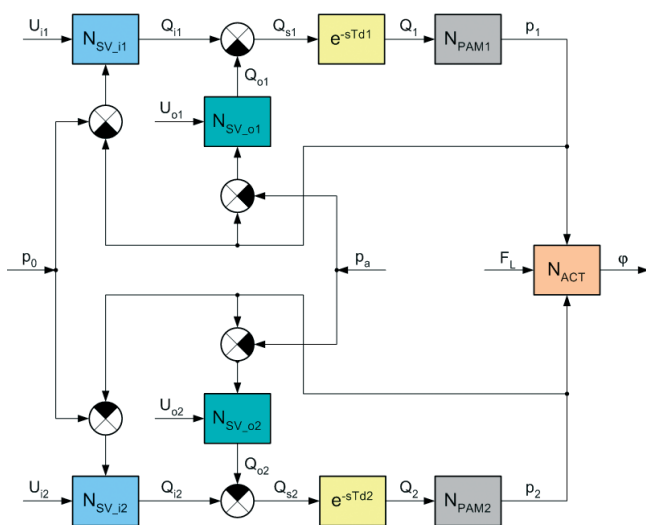
# Pneumatický umelý sval

## – perspektívny prvok mechatroniky (6)

V prvých dvoch častiach seriálu sme sa venovali histórii, vývoju a vlastnostiam pneumatického umelého svalu, konkrétne Mc Kibbenovmu pneumatickému umelému svalu. V tretej časti sme opísali statický a dynamický model Mc Kibbenovho pneumatického umelého svalu, závislosti objemu svalu od kontrakcie a závislosti kontrakcie svalu od tlaku. V ďalších častiach sme sa venovali aktuátorom na báze pneumatických umelých svalov. V záverečnej časti uvedieme blokujú schému aktuátora s umelými svalmi a niektoré závery z overovania navrhutej koncepcie riadenia pneumatického aktuátora s umelými svalmi.

### Blokujú schéma aktuátora s umelými svalmi v antagonistickom zapojení

Na základe teoretického rozboru činnosti a experimentálnych meraní na funkčnom vzore aktuátora pozostávajúceho z dvojpohových elektromagnetických ventilov a pneumatických umelých svalov v antagonistickom usporiadaní bola navrhnutá blokujú schéma tohto systému (obr. 26) [29].



Obr. 26 Blokujú schéma aktuátora

Význam jednotlivých veličín a konštánt v blokujú schéme na obr. 26 (pričom index 1 v schéme platí pre prvý umelý sval – PAM1, index 2 pre druhý umelý sval – PAM2, index  $i$  pre napúšťanie svalu – inlet a index  $o$  pre vyprázdňovanie svalu – outlet):

- $U_i$  – ovládacie napätie napúšťacieho elektromagnetického ventilu,
- $U_o$  – ovládacie napätie vypúšťacieho elektromagnetického ventilu,
- $p_0$  – plniaci tlak stlačeného vzduchu,
- $p$  – tlak v umelom svalе (spätný tlak),
- $p_a$  – tlak okolitého vzduchu,
- $Q_i$  – objemový prietok stlačeného vzduchu cez napúšťací elektromagnetický ventil,
- $Q_o$  – objemový prietok stlačeného vzduchu cez vypúšťací elektromagnetický ventil,
- $Q_s$  – objemový prietok stlačeného vzduchu v prívodnom potrubí k svalu,

- $Q$  – objemový prietok stlačeného vzduchu do umelého svalu za prívodným potrubím,
- $T_d$  – dopravné oneskorenie pretekajúceho stlačeného vzduchu cez prívodné potrubie k umelému svalu,
- $F_L$  – zaťažovacia sila aktuátora,
- $\varphi$  – uhol natočenia ramena (poloha) aktuátora.

Význam jednotlivých nelinearít v blokujú schéme na obr. 26:

- $N_{PAM}$  – nelinearita charakterizujúca závislosť medzi tlakom vzduchu v umelom svalе (spätný tlak) a objemovým prietokom vzduchu do/zo svalu,
- $N_{ACT}$  – nelinearita statickej charakteristiky aktuátora s antagonistickým usporiadaním umelých svalov (závislosť uhla natočenia ramena aktuátora od tlaku vzduchu v umelých svaloch a od zaťažujúcej sily),
- $N_{SV_i}$  – nelinearita charakterizujúca závislosť objemového prietoku stlačeného vzduchu cez napúšťací elektromagnetický ventil od vstupného tlaku a ovládacieho napätia ventilu,
- $N_{SV_o}$  – nelinearita charakterizujúca závislosť objemového prietoku vzduchu cez vypúšťací elektromagnetický ventil od vstupného tlaku a ovládacieho napätia ventilu.

V začiatočnom stave sústavy na obr. 26 sú všetky veličiny nulové, okrem zaťažovacej sily aktuátora  $F_L$  a napájacieho tlaku stlačeného vzduchu  $p_0$ . Otvorením príslušného napúšťacieho ventilu ovládacím napätím  $U_i$  bude na výstupe tohto ventilu prietok stlačeného vzduchu  $Q_i$ , ktorým sa po oneskorení  $T_d$  v prívodnom potrubí k umelému svalu plní pneumatický umelý sval. Vo svalе narastá v zmysle nelinearity  $N_{PAM}$  tlak  $p$ , ktorý sa spätne prejavuje v napúšťacom ventilе ako tlaková diferencia medzi jeho vstupom a výstupom. Veľkosť kontrakcie príslušného svalu závisí od času otvorenia napúšťacieho ventilu (po prepnutí ovládacieho napätia  $U_i$  na nulovú hodnotu ostane umelý sval zmrštený na poslednej získanej hodnote kontrakcie až dovtedy, kým nedôjde k ďalšiemu otvoreniu napúšťacieho ventilu). Pri súčasnom plnení cez oba napúšťacie ventily sa aktuátor ustáli v začiatočnej polohe „0“. Otvorením príslušného vypúšťacieho ventilu ovládacím napätím  $U_o$  bude stlačený vzduch z umelého svalu cez tento ventil unikať s prietokom  $Q_o$  do úplného alebo čiastočného vyprázdnenia umelého svalu (v závislosti od času otvorenia tohto ventilu daného prepnutím ovládacieho napätia  $U_o$  na nulovú hodnotu) a tým dôjde k zníženiu tlaku  $p$  v umelom svalе. Rameno aktuátora sa ustáli v polohe  $\varphi$  v závislosti od tlaku  $p_1, p_2$  v umelých svaloch a zaťažovacej sily  $F_L$  v zmysle nelinearity  $N_{ACT}$ .



Nelinearita  $N_{PAM}$  charakterizujúca závislosť medzi tlakom vzduchu v pneumatickom umelom svale a objemovým prietokom vzduchu do, resp. zo svalu, je daná viacerými nelinearitami (závislosť tlaku vo svale od objemu, závislosť objemu svalu od kontrakcie, závislosť kontrakcie od tlaku vo svale) matematicky opísanými v treťom pokračovaní seriálu v čísle 2/2009.

Nelinearita aktuátora  $N_{ACT}$  je daná statickou charakteristikou aktuátora, ktorej nameraný priebeh pre konkrétne použité svaly je na obr. 19 vo štvrtom pokračovaní seriálu v čísle 4/2009. Matematický opis tejto charakteristiky bol vykonaný jej numerickou aproximáciou využitím služby Curve Fitting Tool integrovanej v Matlab-e. Východiskovým tvarom funkcie pre aproximáciu vzhľadom na tvar nameranej charakteristiky bola exponenciálna funkcia [27]:

$$y = a_0 - a_1 \cdot e^{-x} + a_2 \cdot x \cdot e^{-x} \quad (36)$$

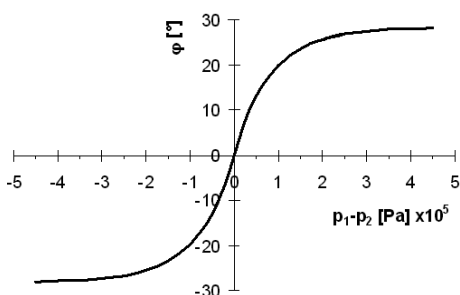
Aproximáciu boli zistené koeficienty:

$$a_0 = 28,1225 \quad a_1 = -27,1489 \quad a_2 = 4,6581 \quad (37)$$

Vzhľadom na symetriu statickej charakteristiky aktuátora okolo osi  $y$  je potom jej priebeh daný vzťahom:

$$\varphi = \left[ 28,1225 - 27,1489e^{-(p_1-p_2)} + 4,6581(p_1-p_2) \cdot e^{-(p_1-p_2)} \right] \cdot \text{sign}(p_1-p_2) \quad (38)$$

Priebeh aproximovanej statickej charakteristiky aktuátora podľa vzťahu (38) je na obr. 27.



Obr.27 Aproximovaná statická charakteristika aktuátora

Nelinearity  $N_{SV_i}$  a  $N_{SV_o}$  charakterizujú závislosť objemového prietoku vzduchu cez elektromagnetické ventily. Ako vyplýva z princípu činnosti aktuátora (opísanom vo štvrtom pokračovaní seriálu v čísle 4/2009) aj z navrhnutéj koncepcie jeho riadenia (opísanej v piatom pokračovaní seriálu v čísle 5/2009), pre daný aktuátor stačia dvojpolohové ventily, ktoré majú dva pracovné stavy, a to úplne otvorený alebo úplne zatvorený. Takýto ventil možno matematicky opísať ako dýzu, ktorej objemový prietok závisí od rozdielu tlakov pred ventilom a za ním:

$$Q_v = C_a \cdot A_v \cdot \sqrt{p_{in} - p_{out}} \quad (39)$$

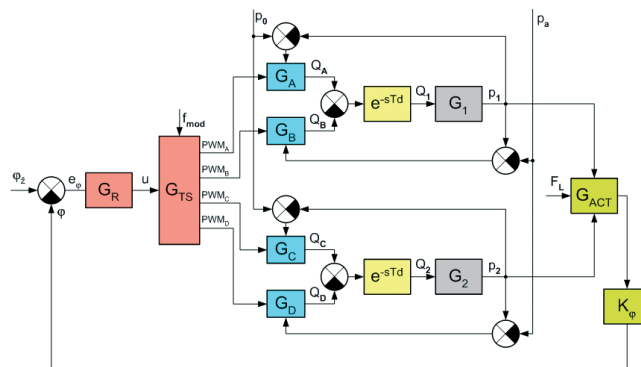
kde  $Q_v$  – objemový prietok vzduchu cez ventil,  
 $C_a$  – aerodynamický korekčný koeficient,  
 pre ktorý platí vzťah (28) uvedený  
 v treťom pokračovaní seriálu v čísle 2/2009,  
 $A_v$  – prierez ventilu v otvorenom stave,  
 $p_{in} - p_{out}$  je rozdiel tlakov pred a za ventilom (pre napúšťací ventil je to rozdiel tlaku napájacieho stlačeného vzduchu a tlaku vo svale, pre vypúšťací ventil je to rozdiel tlaku vo svale a tlaku okolitého vzduchu).

Z rozboru blokovej schémy vyplýva, že aktuátor s dvoma pneumatickými umelými svalmi v antagonistickom zapojení predstavuje z hľadiska automatického riadenia pomerne zložitý nelineárny systém s niekoľkými nelinearitami a dopravným oneskorením.

Navrhnutá blokovaná schéma aktuátora bude slúžiť v ďalších výskumných prácach na návrh a tvorbu simulačného modelu na simuláciu dynamických stavov aktuátora s cieľom optimalizácie algoritmov riadenia servomechanizmov manipulačných zariadení poháňaných umelými svalmi aj s využitím techník umelej inteligencie [28].

## Overenie navrhnutéj koncepcie riadenia pneumatického aktuátora s umelými svalmi

Navrhnutá koncepcia riadenia bola overená na funkčnom vzore experimentálneho aktuátora, pričom na riadenie aktuátora bol použitý voľne programovateľný priemyselný riadiaci systém doplnený o potrebné prevodníky a výkonové členy. Na základe navrhnutéj blokovej schémy riadenia aktuátora (obr. 28) bol na overovanie vytvorený aplikačný program riadiaceho systému.



Obr.28 Blokovaná schéma riadenia aktuátora

Blokovaná schéma riadenia pneumatického aktuátora s umelými svalmi v antagonistickom zapojení bola navrhnutá z principiálnej schémy riadenia aktuátora (obr. 25 v piatom pokračovaní seriálu v čísle 5/2009) a blokovej schémy aktuátora (obr. 26). Význam jednotlivých veličín a prenosov v blokovej schéme riadenia aktuátora na obr. 28:

- $\varphi_z$  – žiadaná poloha ramena aktuátora,
- $\varphi$  – skutočná poloha ramena aktuátora,
- $e_\varphi$  – regulačná odchýlka polohy ramena aktuátora,
- $G_R$  – prenos regulátora polohy,
- $u$  – akčná veličina z regulátora polohy,
- $K_\varphi$  – prenos snímača polohy vrátane prevodníka,
- $f_{mod}$  – modulačná frekvencia,
- $G_{TS}$  – prenos tvarovača signálu,
- $T_d$  – dopravné oneskorenie v prívodnom potrubí k svalu,
- $p_0$  – tlak napájacieho stlačeného vzduchu,
- $p_a$  – tlak okolitého vzduchu,
- $p_1, p_2$  – tlak vzduchu vo svaloch,
- $F_L$  – záťaž aktuátora,
- $PWM_A, PWM_B, PWM_C, PWM_D$  – šírkovovo modulovaný signál na ovládanie elektromagnetických ventilov,
- $Q_A, Q_B, Q_C, Q_D$  – prietok vzduchu cez elektromagnetické ventily,
- $Q_1, Q_2$  – prietok vzduchu do svalov,
- $G_A, G_B, G_C, G_D$  – prenosy elektromagnetických ventilov,
- $G_1, G_2$  – prenosy svalov,
- $G_{ACT}$  – prenos aktuátora.

Na reguláciu polohy aktuátora sa použil proporcionálny (P) regulátor, ktorý je vo všeobecnosti vhodný pre polohové regulačné slučky. Zosilnenie regulátora bolo určené Zieglerovou-Nicholsonovou metódou z nameranej prechodovej charakteristiky aktuátora. Na základe vykonaných experimentov overovania možno konštatovať [30]:

- Naprogramovaný regulačný algoritmus na základe navrhnutého princípu riadenia pneumatického aktuátora s dvoma umelými svalmi v antagonistickom zapojení súčasnou zmenou tlaku iba v jednom zo svalov pomocou dvoch dvojpolohových ventilov zabezpečil polohovanie ramena aktuátora s požadovanou presnosťou pre predpokladanú oblasť použitia aktuátora na pohon manipulačných zariadení pre automatizáciu výrobných technológií.
- Navrhnutý a naprogramovaný algoritmus riadenia zabezpečuje maximálnu tuhosť mechanizmu (za predpokladu použitia čo najvyššieho - maximálneho tlaku vzduchu povoleného pre daný typ umelého svalu) a plynulosť pohybu ramena aktuátora.
- Vzhľadom na nelineárnu statickú charakteristiku aktuátora sa potvrdilo, že reakcia ramena aktuátora na akčný zásah regulátora je rôzna v jednotlivých polohách ramena aktuátora, čo vyžaduje v ďal-



ších výskumoch venovať pozornosť možnosti automatickej korekcie zosilnenia regulátora v závislosti od polohy ramena aktuátora.

## Literatúra

[27] HOŠOVSKÝ, A.: Numerical Approximation of Static Characteristic of PAM-based Antagonistic Actuator. Journal of applied science in the thermodynamics and fluid mechanics. Vol. 1, No. 1 (2007), pp. 1 – 4. ISSN 1802-9388.

[28] PITEĽ, J.: Simulácia polohy ramena aktuátora s pneumatickými umelými svalmi. Acta Mechanica Slovaca. Roč. 11, č. 1 – A/2007 (2007), s. 205 – 210. ISSN 1335-2393.

[29] PITEĽ, J., BALARA, M.: Model aktuátora s pneumatickými umelými svalmi. In: Proceedings of the 7th International Scientific – Technical Conference PROCESS CONTROL 2006, Kouty nad Desnou, June 13 – 16, 2006. [CD-ROM]. Pardubice: University of Pardubice, 2006. pp. R140b-1-4.

[30] PITEĽ, J.: Overenie koncepcie riadenia aktuátora s pneumatickými umelými svalmi v antagonistickom zapojení. In: Zborník príspevkov ARTEP 2009, Stará Lesná, 4. 3. – 6. 3. 2009. [CD-ROM]. Košice: SJF TU v Košiciach, 2009. s. 52 – 1 – 7.

**doc. Ing. Ján Piteľ, PhD.**

**doc. Ing. Milan Balara, PhD.**

44

Technická univerzita v Košiciach  
Fakulta výrobných technológií so sídlom v Prešove  
Katedra matematiky, informatiky a kybernetiky  
e-mail: jan.pitel@tuke.sk  
milan.balara@tuke.sk