



# Pneumatický umelý sval

## – perspektívny prvok mechatroniky (5)

V prvých dvoch častiach seriálu sme sa venovali histórii, vývoju a vlastnostiam pneumatického umelého svalu všeobecne a konkrétne Mc Kibbenovmu pneumatickému umelému svalu.

V tretej časti sme opisali statický a dynamický model Mc Kibbenovho pneumatického umelého svalu, závislosti objemu svalu od kontrakcie a závislosti kontrakcie svalu od tlaku.

Vo štvrtej časti sme sa začali venovať aktuátorom na báze pneumatických umelých svalov.

V tejto časti budeme pokračovať popisom riadenia takýchto aktuátorov.

### Riadenie aktuátorov na báze pneumatických umelých svalov

Funkcia súčasných antagonistických aktuátorov na báze pneumatických umelých svalov je zabezpečená zvyšovaním tlaku v jednom svale a súčasným znižovaním tlaku v druhom (antagonistickom) svale. Obidva umelé svaly sú v takom prípade aktívne a vyžadujú súčasné riadenie veľkosti plniaceho tlaku vzduchu do jednotlivých svalov. Je to náročné na riadenie, nakoľko v každom časovom okamžiku je nutné dodržať podmienku rovnosti medzi prírastkom tlaku (objemu) v jednom umelom svale a úbytkom tlaku (objemu) v druhom umelom svale. V opačnom prípade dochádza k nerovnomernosti pohybu ramena kladky aktuátora („trhanie“) a kolísaniu hodnoty tuhosti aktuátora.

Pre zjednodušenie riadenia bola navrhnutá a rozpracovaná koncepcia riadenia aktuátora s odlišným účinkovaním pneumatických umelých svalov. Jeden z umelých svalov v príslušnej polovici dráhy ramena aktuátora plní úlohu pasívnej nelineárnej pneumatickej pružiny a nepotrebuje žiaden riadiaci zásah. Riadený je iba k nemu antagonistický komplementárny (aktívny) umelý sval, ktorého pohyb je riadený a poloha nastavovaná množstvom (tlakom) vzduchu vo svale. V druhej polovici dráhy ramena je funkcia aktuátora rovnaká, medzi funkciami umelých svalov dochádza k zámene.

Kontrakcia pneumatických umelých svalov je vzhľadom na ich princíp a konštrukciu ovládaná prostredníctvom dvojpolohových dvojcestných elektromagnetických ventilov. Stlačený vzduch je do umelého svalu dodávaný ventilom vo forme tlakových impulzov, pričom podobným spôsobom sa vykonáva aj jeho vyprázdňovanie. Pri navrhovaní riadenia polohy (kontrakcie) umelého svalu (resp. pootočenia ramena aktuátora) je preto potrebné uvažovať s nasledujúcimi skutočnosťami:

- Pneumatický umelý sval, resp. aktuátor obsahujúci umelé svaly, je sústavou nelineárnou, obsahujúcou pásmo necitlivosti, s nelineárnou statickou charakteristikou typu nasýtenia.
- Dynamické vlastnosti pneumatického umelého svalu majú charakter porovnateľný s lineárnym kmitavým členom. Tlmenie, časová konštanta a zosilnenie sú závislé od materiálových vlastností, rozmerov a záťaže umelého svalu.
- Objem umelého svalu je nastavovaný tlakovými impulzmi z ovládacích elektromagnetických ventilov. Ich charakteristiky sú taktiež nelinearity reléového typu. Ovládacie vstupné signály ventilov sú dvojhodnotové, meniace sa formou nespojitých skokov.
- Akčná veličina systému, ktorú predstavuje tlak alebo objem stlačeného vzduchu, má hmotný charakter a pohybuje sa v prírodnom potrubí konkrétnou rýchlosťou. Takýto signál je do umelého svalu prenášaný s určitým dopravným oneskorením.

Uvedené skutočnosti je nutné rešpektovať pri návrhu riadenia takejto sústavy. Konečnou požiadavkou na funkciu takéhoto pneumatického servosystému je plynulé a proporcionálne nastavovanie polohy aktuátora (výstupného člena) v súlade so spojite sa meniacou vstupnou ria-

diacou veličinou, pričom niektoré veličiny medzi jednotlivými členmi servosystému budú mať nespojitý alebo impulzný charakter.

Pri návrhu regulačnej štruktúry riadenia polohy aktuátora na báze pneumatických umelých svalov bola na základe analýzy doterajších riešení a skúsenosti s prevádzkou servosystémov stanovená nasledujúca koncepcia [25]:

1. Hlavnou (a niekedy jedinou) riadenou veličinou bude poloha (pootočenie ramena aktuátora).
2. Tuhosť polohy ramena v každej pozícii (pootočení) má byť maximálne dosiahnuteľná a samo nastaviteľná pri daných podmienkach (polohe).
3. Zabezpečenie predchádzajúcej podmienky predpokladá použitie čo najvyššieho (maximálneho) tlaku vzduchu povoleného pre daný typ umelého svalu.
4. Po naplnení oboch svalov bude rameno aktuátora v tzv. referenčnom (nulovom) bode. V tomto bode bude tuhosť aktuátora najvyššia a obojstranne symetrická. Pohyb ramena v kladnom alebo v zápornom smere od tohto bodu sa bude uskutočňovať vyprázdňovaním príslušného umelého svalu. Tuhosť aktuátora bude klesať v súlade s charakteristikami umelých svalov. Bude však vyššia alebo rovná tuhosti pri súčasnom riešení riadenia aktuátorov (riadená tuhosť).
5. Pri práci aktuátora podľa predchádzajúceho bodu bude vždy jeden umelý sval (pasívny) naplnený na maximálny tlak a bude plniť voči (aktívnemu) vyprázdňovanému umelému svalu funkciu nelineárnej vratnej pružiny.
6. Výsledná tuhosť aktuátora nebude konštantná. V smere namáhania pasívneho umelého svalu (pneumatickej nelineárnej pružiny) bude vyššia. Tak isto bude rôzna pri rôznych polohách. Týmto vlastnosťami sa zhoduje so súčasným riešením. Jej hodnoty však budú pre každý stav (polohu) maximálne, samočinne sa nastavujúce, bez nutnosti uplatnenia špeciálnej regulačnej slučky tuhosti.
7. Riadiace veličiny budú na vstupe regulátora spojité, na jeho výstupe musia mať formu nespojitých impulzných signálov vstupujúcich do ovládacích cievok elektromagnetických ventilov. Riadiaci člen preto musí obsahovať tvarovacie obvody meniace spojité signál na dvojpolohový a logický dekodér ventilových výstupov. Jeho výkonová spínacia časť spolu s elektromagnetickými ventilmi tvoria akčný člen regulátora.
8. Regulátor v základnom zapojení, t.j. s jednou polohovou slučkou, musí mať preto vlastnosti trojstavového (reléového) člena s nastaviteľným pásmom necitlivosti.
9. V záujme dosiahnutia optimálnych dynamických vlastností, invariančnosti, robustnosti, potlačenia vplyvu dopravných oneskorení a pod. môže regulátor obsahovať obvody regulačnej slučky rýchlosti, zrýchlenia, korekčných filtrov a pod.

Uvedený návrh koncepcie riadenia rešpektuje požiadavky na predpokladanú oblasť použitia aktuátora na pohon manipulačných zariadení



a sústreďuje sa na zabezpečenie jednoduchého, ale účinného riadenia tohto servomechanizmu. Navrhnuté riešenie zjednodušuje riadenie takejto sústavy nasledujúcim spôsobom:

- poloha ramena aktuátora je súčasne nastavovaná vždy iba jedným elektromagnetickým ventilom (plniacim alebo vypúšťacím ventilom, vstupom alebo výstupom média) jedného (aktívneho) pneumatického umelého svalu,
- tuhosť mechanizmu sa nastavuje samočinne na maximálnu hodnotu zodpovedajúcu príslušnej polohe ramena aktuátora.

### Principiálna schéma riadenia aktuátora

Principiálna schéma riadenia aktuátora s pneumatickými umelými svalmi v antagonistickej zapojení spĺňajúca požiadavky uvedené v predchádzajúcom je na obr. 25.

Význam jednotlivých označení na obr. 25:

**Aktuátor:** PAM1, PAM2 – pneumatické umelé svaly,  
F1, F2 – ťahové sily umelých svalov,  
 $\varphi$  – poloha ramena aktuátora,  
 $p_0$  – tlak stlačeného vzduchu,  
A, C – napúšťacie ventily,  
B, D – vypúšťacie ventily.

**Snímač polohy:**  $K_\varphi$  – zosilnenie snímača polohy.

**Riadiaci člen:**  $R_\varphi$  – regulátor polohy ramena aktuátora,  
 $R_{\omega}$  – regulátor rýchlosti otáčania ramena aktuátora,  
TS – tvarovač signálu,  
D – dekodér,  
 $\varphi_z$  – žiadaná poloha ramena aktuátora,  
 $\varphi$  – skutočná poloha ramena aktuátora,  
 $e_\varphi$  – regulačná odchýlka polohy ramena aktuátora,  
s – Laplaceov operátor,  
 $K_\omega$  – zosilnenie snímania rýchlosti,  
 $\omega_z$  – žiadaná rýchlosť otáčania ramena aktuátora,

$\omega_s$  – skutočná rýchlosť otáčania ramena aktuátora,  
 $e_\omega$  – regulačná odchýlka rýchlosti otáčania ramena aktuátora,

u – výstup regulátora,

$f_{mod}$  – modulačná frekvencia,

PWM – šírkovy modulovaný signál,

R/L – smer otáčania ramena aktuátora,

P/N – polarita polohy ramena aktuátora,

SET – nastavenie počiatočnej polohy ramena aktuátora,

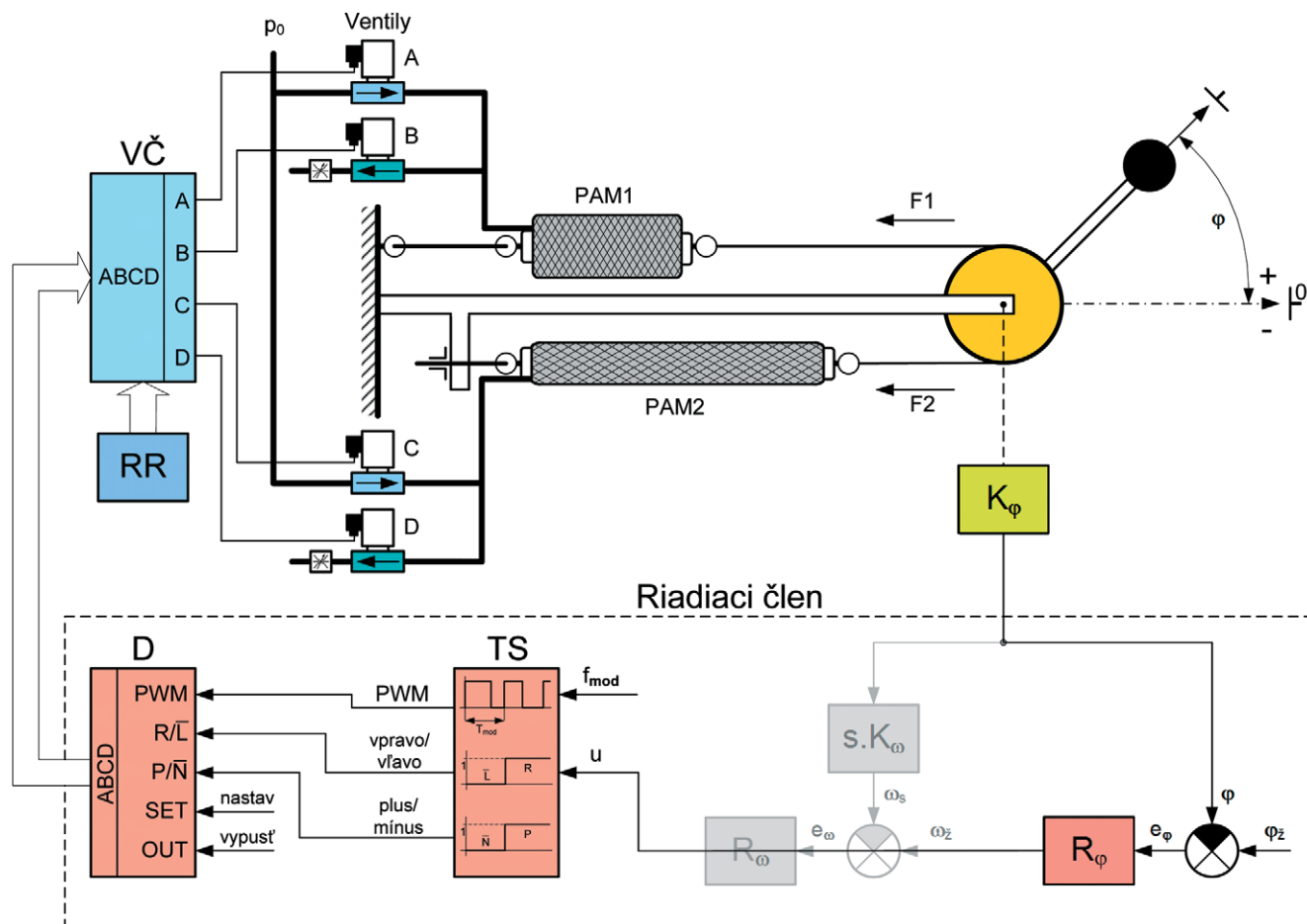
OUT – uvoľnenie mechanizmu aktuátora,

ABCD – riadiace signály ventilov.

Výkonový člen – VČ.

Ručné riadenie – RR.

Informácia o skutočnej polohe ramena aktuátora ( $\varphi$ ) zo snímača polohy je privádzaná do riadiaceho člena, kde sa porovnáva so signálom, ktorý nesie informáciu o žiadanej polohe ( $\varphi_z$ ). Následne zistená regulačná odchýlka polohy ( $e_\varphi$ ) je privádzaná do regulátora, ktorý vykoná riadiaci zásah. Na reguláciu polohy je možné použiť proporcionálny (P) regulátor. V riadiacom člene môže byť zakomponovaná aj podriadená regulačná slučka rýchlosti otáčania ramena aktuátora, pričom rýchlosť otáčania je odvodená z polohy jej deriváciou. Tvarovač signálu (TS) mení výstupný signál z regulátora (u) na dvojpohový šírkovy modulovaný signál (PWM), pričom na základe polarity signálu z regulátora je generovaná požiadavka na otáčanie aktuátora vpravo alebo vľavo (R/L). Signál +/- (P/N) určuje polaritu polohy ramena aktuátora voči referenčnej polohe (oblasť v ktorej sa nachádza rameno aktuátora). Dekodér (D) rozhoduje o tom, ktorý ventil aktuátora bude v činnosti. Signálom „Nastav“ (SET) sa rameno aktuátora nastavuje do počiatočnej polohy (PAM1 a PAM2 sú naplnené na plnú hodnotu napájacieho tlaku vzduchu). Signálom „Vypust“ (OUT) sa svaly odpájajú od prívodu stlačeného vzduchu a mechanizmus aktuátora sa uvoľňuje vypustením vzduchu z umelých svalov. Riadiace signály ventilov (ABCD) sa privádzajú do výkonového člena (VČ), ktorý obsahuje tranzistorové výkonové



Obr.25 Principiálna schéma riadenia aktuátora



spínače pre ovládanie ventilov. Pohyb aktuátora je možné riadiť aj ručne (RR) [26].

### Algoritmus riadenia aktuátora

Algoritmus riadenia vychádza z navrhutej koncepcie riadenia a je daný princípom činnosti aktuátora. Pri rovnakých plniacich tlakoch v obidvoch svaloch nastáva rovnosť ťahových síl. Aktuátor sa ustáli v počiatočnej polohe „0“. V tomto bode je tuhosť aktuátora za predpokladu maximálneho tlaku vzduchu vo svaloch najvyššia a obojstranne symetrická. Pohyb ramena v kladnom alebo zápornom smere od tohto bodu sa uskutočňuje vyprázdňovaním iba jedného príslušného umelého svalu. Pri nerovnakých plniacich tlakoch vzduchu sa rameno aktuátora ustáli v polohe ( $\varphi$ ) zodpovedajúcej rovnosti ťahových síl obidvoch svalov. Jeden z umelých svalov v príslušnej polovici dráhy ramena aktuátora plní úlohu pasívnej nelineárnej pneumatickej pružiny a nepotrebuje žiaden riadiaci zásah (napr. PAM1 pri polohe ramena v oblasti „+“). Riadený je iba k nemu antagonistický komplementárny (aktívny) umelý sval (napr. PAM2 pri polohe ramena v oblasti „+“), ktorého poloha je nastavovaná reguláciou tlaku vzduchu cez príslušné ventily (C – zvyšovanie tlaku, D – znižovanie tlaku), ktoré sú ovládané impulzmi so šírkovou moduláciou (PWM). Plniaci tlak sa v tomto prípade v svalu PAM1 nemení, mení sa iba jeho dĺžka v súlade s meniacou sa ťahovou silou umelého svalu PAM2. V druhej polovici dráhy ramena (v oblasti „-“) je funkcia aktuátora rovnaká, medzi funkciami umelých svalov dochádza k zámene.

Úlohou riadiaceho člena aktuátora je zabezpečenie žiadanej polohy aktuátora (prestavenie ramena aktuátora na žiadanú polohu a udržanie tejto polohy eliminovaním účinku porúch). Túto úlohu zabezpečí riadiaci člen generovaním impulzov pre otváranie ventilov napúšťania a vypúšťania vzduchu do a zo svalov na základe regulačnej odchýlky medzi žiadanou a skutočnou polohou ramena aktuátora. Z tohto dôvodu musí riadiaci člen zabezpečiť aj konverziu výstupu regulátora

na šírko modulované signály. Ďalšou požiadavkou na riadiaci člen je možnosť zmeny riadiaceho algoritmu počas experimentov s aktuátorom.

Riadiaci člen môže byť realizovaný na báze mikropočítača alebo na báze PC a I/O karty. Výhodou riadenia na báze PC je ľahšia tvorba riadiaceho algoritmu s možnosťou využitia napr. Real Time Toolbox-u Matlab Simulink-u a flexibilita umožňujúca možnosť zmien v čase experimentovania. Výhodou riadenia na báze mikropočítača je možnosť väčšej rýchlosti uzatvárania regulačnej slučky, vyžaduje to však väčšiu prácnosť tvorby algoritmu riadenia v nižšom programovacom jazyku.

### Literatúra

[25] BALARA, M., PITEĽ, J.: Koncepcia riadenia aktuátora s pneumatickými umelými svalmi. In: Sborník príspevků konference kateder automatizace a kybernetiky vysokých škol České a Slovenské republiky PRINCIPIA CYBERNETICA 2006, Zlín, 6.-8. září 2006. [CD-ROM]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2006. s. P1-1 - P1-4. ISBN 80-7138-460-5

[26] PITEĽ, J., BALARA, M., BORŽÍKOVÁ, J.: Control of the Actuator with Pneumatic Artificial Muscles in Antagonistic Connection. TRANSACTIONS of the VŠB – Technical University of Ostrava. Vol. LIII, No. 2/2007 (2007). pp. 101 – 106. ISSN 1210-047

**doc. Ing. Ján Piteľ, PhD.**

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

**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

71