

# Koncepcia návrhu univerzálneho abstraktného modelu pneumatického umelého svalu

TEXT: prof. Rudolf Neydorf, DrSc., Fakulta informatiky a výpočtovej techniky, Donská štátna technická univerzita, doc. Ing. Ján Piteľ, PhD., Fakulta výrobných technológií Technickej univerzity v Košiciach so sídlom v Prešove

Využitím pneumatických umelých svalov je možné navrhovať a konštruovať progresívne pohony manipulačných zariadení s vynikajúcim pomerom výkonu k ich hmotnosti. Pre modelovanie a simuláciu dynamických vlastností týchto pohonov je potrebný adekvátny matematický model umelého svalu. Koncepcia riešenia úlohy návrhu univerzálneho abstraktného modelu pneumatického umelého svalu je rozpracovaná v tomto článku.

**P**neumatický umelý sval (Pneumatic Artificial Muscle – PAM) je pružný akčný člen meniaci vstupnú tlakovú energiu na výstupnú mechanickú energiu reprezentovanú ťahovou silou a mechanickým priamočiarym pohybom. Pneumatické umelé svaly majú v porovnaní s inými druhmi výkonových členov niektoré prednosti. Predovšetkým je to veľmi nízka hmotnosť vo vzťahu ku ťahovej sile, ktorú vyvinú. Pomerne nízka je aj ich nadobúdacía cena. Ďalšie významné charakteristické vlastnosti pneumatických umelých svalov [1], [6]:

- Pneumatické umelé svaly sa vyznačujú mimoriadne vysokým pomerom sily a výkonu k hmotnosti a objemu.
- Pneumatické umelé svaly môžu byť vyrobené v rôznych veľkostiach, a tým aj v rôznych silových a prestavovacích rozsahoch. V súčasnosti dĺžka svalu môže byť v rozsahu 100 až 4000 mm, priemer svalu v rozsahu 10 až 70 mm.
- Dosiagnuteľné maximálne skrátenie (kontrakcia) závisí na konštrukcii svalu. V súčasnosti je typicky 30 až 35% menovitej dĺžky svalu, čo je porovnateľné s biologickými svalmi.
- Ťahová sila umelého svalu na jednotku plochy prierezu môže dosiahnuť až  $300 \text{ N/cm}^2$  v porovnaní s  $30 - 40 \text{ N/cm}^2$  pre biologický sval.

- Pneumatické umelé svaly sú bezpečné pre použitie vo vodnom alebo inom kvapalinovom prostredí a v prostredí s nebezpečenstvom výbuchu plynov a pár.
  - Veľmi zaujímavou vlastnosťou pneumatických umelých svalov (podobne ako u biologických) je ich schopnosť činnosti v antagonistickom zapojení, čo umožňuje regulovať ich vlastnú tuhosť/poddajnosť. Táto schopnosť, ktorá nie je bežná u klasických typov pohonov, prináša množstvo výhod v jednotlivých aplikáciách pohonov na báze pneumatických umelých svalov.
  - Pneumatické umelé svaly sú vysoko flexibilné, pružné pri kontakte a majú vynikajúci bezpečnostný potenciál. To umožňuje konštruovať pružné a na dotyk citlivé (soft) aktuátory porovnateľné s biologickými svalmi.
  - U pneumatických umelých svalov sa nevyskytuje tzv. "stick-slip" efekt vznikajúci pri pohybe piesta v pneumatickom (resp. hydraulickom) valci.
- Pre modelovanie a simuláciu dynamických vlastností mechatronických systémov s pohonmi na báze pneumatických umelých svalov je potrebný adekvátny matematický model umelého svalu. Tento model je dôležitý aj pre návrh a simuláciu algoritmov automatického riadenia týchto zariadení [7].

## Formulácia úlohy

Majme systém pneumatického umelého svalu s týmito základnými vlastnosťami a charakteristikami:

- premenlivý objem  $V$  svalu, ktorý vo všeobecnosti závisí na dĺžke (kontrakcii) svalu  $L$  a tlaku  $p$  vzduchu vo vnútri svalu;
- v ustálenom stave je objem svalu daný nelineárnou funkciou:

$$V = f_v(L, p); \quad (1)$$

- ťahová sila svalu vo všeobecnosti závisí od tlaku  $p$  vo svale a aktuálnej pracovnej dĺžky (kontrakcii)  $L$  svalu a je daná nelineárnou funkciou:

$$F_T = f_T(L, p); \quad (2)$$

- na umelý sval pôsobí záťaž  $F_Z$ , ktorá vo všeobecnosti závisí od aktuálnej pracovnej dĺžky (kontrakcii)  $L$  svalu, jej derivácii  $\dot{L} = \frac{dL}{dt}$  a vonkajšej sile

$F_V$  danej technológiou resp. technickým zariadením, v ktorom je umelý inštalovaný:

$$F_Z = f_z(L, \dot{L}, F_V); \quad (3)$$

- umelý sval má vlastnú zotrvačnú hmotu, ktorá so zreteľom na jej rozloženie môže byť nahradená ekvivalentnou sústredenou premennou a staticky aproximovaná nelineárnou závislosťou na pracovnej dĺžke (kontrakcii)  $L$  svalu a tlaku  $p$  vo svale:



$$M_{ekv} = f_M(L, \rho); \quad (4)$$

- v prípade tuhého spojenia umelého svalu s vonkajšími zotrvačnými hmotami pôsobí na sval zotrvačná sila úmerná zmene rýchlosti pohybu a hmotnosti  $M$ :

$$M = M_{ekv} + M_V, \quad (5)$$

kde  $M_V$  sú vonkajšie zotrvačné hmoty.

Úlohou je navrhnúť adekvátny matematický model zmeny v čase jeho stavových premenných  $x(t)$ :

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)), \quad (6)$$

riešenie ktorej pri začiatčnom ( $t = t_0$ ) stave  $x(t_0)$  a vonkajších pôsobeniach  $u(t)$  koliduje  $\forall t \geq t_0$  podľa niektorého zadaného kritéria presnosti s reálnou časovou zmenou stavových premenných pneumického umelého svalu.

Táto úloha sa delí na dve čiastkové úlohy [4]:

1. Určenie štruktúry a teoretických hodnôt parametrov pravej strany matematického modelu  $f(x(t), u(t))$  zahrňujúce stanovenie fyzikálnych veličín, ktoré sú premennými stavu  $x(t)$ , ako aj rad diferenciálnej rovnice (6).
2. Posúdenie adekvátnosti teoretického modelu voči reálnemu zariadeniu a identifikácia – spresnenie parametrov matematického modelu umelého svalu.

Posúdenie adekvátnosti a identifikácia sú experimentálnou zložkou realizácie matematického modelu vyžadujúcou existenciu príslušného zariadenia a vykonanie experimentálnych meraní. V tomto príspevku je riešená prvá z úloh, a to návrh koncepcie analytického modelu na základe konštrukčných a fyzikálnych údajov o skúmanom objekte.

### Metodológia riešenia úlohy

Všetky procesy prebiehajúce v prírodných alebo technickom objektoch sú dané základnými zákonmi prírody, a to zákonmi zachovania energie, hmotnosti, hybnosti a pod. Preto tieto zákony zachovania sú základom matematických modelov ľubovoľných objektov alebo javov, čiže aj pneumického umelého svalu [4]. Z tohto dôvodu pri

návrhu matematického modelu konkrétneho technického zariadenia sa musí začať s návrhom alebo použitím už známeho matematického modelu toho základného zákona zachovania, ktorému sa podriaďujú procesy skúmaného objektu.

Zvláštnosťou návrhu matematických modelov dynamických objektov je to, že pri priebehu prechodových procesov v reálnych systémoch, v ktorých je akumulovaná hmotnosť, energia a pod. [2, 3], v každom ľubovoľnom časovom okamžiku klasická podmienka zákona zachovania ustálených procesov, „prívod = odvod“, nie je dodržaná. Je to dané tým, že v prechodových procesoch nastáva zmena stavu systému, ktorý je spojený so zmenou hmotnosti, energie a ďalších fyzikálnych príznakov alebo charakteristík. Na priebeh týchto procesov je potrebný čas, pričom počas celého prechodového procesu v systéme pôsobí všeobecnejšia univerzálna forma zákona zachovania platná pre každý časový interval, počas ktorého sa vykonáva sledovanie príznaku:

„akumulácia = prívod - odvod“.

Ak celkové množstvo akumulovanej substancie v ľubovoľný časový okamžik  $t$  označíme ako  $Q(t)$ , množstvo privádzanej substancie  $Q_p(t)$  a množstvo odvádzanej  $Q_o(t)$ , tak integrálna forma zákona zachovania pre dynamický objekt riadenia je daná rovnicou:

$$Q(t) - Q(t_0) = Q_p(t) - Q_p(t_0) - (Q_o(t) - Q_o(t_0)). \quad (8)$$

Derivovaním (8) dostaneme diferenciálnu formu matematického modelu zákona zachovania neustáleného procesu zmeny akumulácie substancie v objekte riadenia:

$$\frac{dQ(t)}{dt} = \frac{dQ_p(t)}{dt} - \frac{dQ_o(t)}{dt} = q_p(t) - q_o(t), \quad (9)$$

kde  $q_p(t)$  a  $q_o(t)$  sú veličiny odpovedajúcich tokov prívodu a odvodu substancie.

Týmto je možné zákon zachovania dynamického procesu v diferenciálnej forme vyjadriť aj takto: rýchlosť zmeny akumulácie príznaku je rovná rozdielu tokov prívodu a odvodu substancie udržiavajúcej tento príznak [5].

### Možnosti riešenia úlohy

Na základe vyššie uvedeného je možné konštatovať, že dynamické vlastnosti ľubovoľného objektu riadenia závisia od stavu akumulácie niektorých príznakov určujúcich stav daného objektu, t. j. od stavových premenných. A teda aj v modelovanom pneumickom umelom svalu je nutné definovať príznaky akumulácie. Na základe analýzy skúmaného objektu pneumického umelého svalu je možné konštatovať, že v ňom existujú tri príznaky akumulácie: hmoty, pohybu a energie.

1. Zachovanie množstva pracovnej hmoty

Je zrejme, že v pneumickom umelom svalu sa akumuluje plynová substancie – vzduch, ktorý je jeho pracovným médiom. Mierou tejto akumulácie je objem  $V(t)$  a charakteristickou premennou parameter umožňujúci vyjadriť akumulované množstvo plynu v pneumickom umelom svalu – jeho hustota  $\rho(t)$ . Potom rovnica (9) nadobudne tvar:

$$\frac{d(V(t) \cdot \rho(t))}{dt} = q_p(t) \cdot \rho_p(t) - q_o(t) \cdot \rho_o(t). \quad (10)$$

2. Zachovanie pohybu (pracovného chodu)

Najjednoduchším a najvhodnejším variantom jeho vyjadrenia v diferenciálnom tvare je jednoduchá rovnica pre rýchlosť pohybu:

$$\frac{dL(t)}{dt} = v(t), \quad (11)$$

kde  $v(t)$  je rýchlosť pohybu pneumického umelého svalu pri jeho pôsobení na pracovný mechanizmus.

3. Zachovanie množstva mechanickej energie

Pneumatický umelý sval je akčným mechanizmom, pričom jeho úlohou je vyvíjať požadovanú silu a vykonávať požadované pohyby. Preto musí mať „zásobu“ pohybu a mechanickej energie. Touto „zásobou“ je zotrvačná hmota pohybujúcich sa častí samotného pneumického umelého svalu a ním poháňaného pracovného mechanizmu.

Tak, ako je to definované vo formulácii úlohy, umelý sval ma vlastnú zotrvačnú hmotu  $M_{ekv} = f_M(L, \rho)$  a celková premiestňovaná hmotnosť môže byť definovaná



súčtom vlastnej hmotnosti svalu a vonkajšej hmotnosti  $M_V$  pevne spojenej so svalom:

$$M(t) = f_M(L, p) + M_V(t). \quad (12)$$

Priamym vyjadrením zákona zachovania pri mechanickom pohybe je zákon zachovania hybnosti, ktorý so zreteľom na skúmaný pneumatiký umelý sval a v súlade s (12) nadobúda tvar diferenciálnej rovnice spájajúcej zmenu rýchlosti pohybu objektu so zmenou hmotnosti a na neho pôsobiacich síl  $F_i(t)$ .

$$\frac{d(M(t) \cdot v(t))}{dt} = \sum F_i(t). \quad (13)$$

*Popísaná koncepcia návrhu univerzálneho abstraktného modelu pneumatického umelého svalu umožňuje riešiť úlohu realizácie tzv. pracovného modelu [4] svalu ďalším skúmaním konkrétnych mechatronických systémov s pohonmi na báze umelých svalov. Jednotlivé časti modelu sú dané rovnicami (1-5) popisujúcimi statiku svalu ako aj jeho väzbou s pracovným mechanizmom. Táto koncepcia taktiež umožňuje aj návrh matematického modelu univerzálneho akčného člena na báze pneumatického umelého svalu za účelom sledovania jeho dynamických vlastností.*

#### Literatúra

1. BALARA, M. – BORŽÍKOVÁ, J.: The mathematical Description of Characteristics of Pneumatic Artificial Muscles. In: DAAM International Scientific Book. Vienna: TU, 2005, pp. 025-032. ISSN 1726-9687.
2. NEYDORF, R. A.: Charakternyje ne-linejnyje invarianty i matematiceskije modeli objektov upravlenija chimičeskich proizvodstv. In: Sovremennaja prikladnaja teorija upravlenija: Novyje klasy reguljatorov techničeskich system. Taganrog: TRTU, 2000, s. 257-270.
3. NEYDORF, R. A.: Invarjanty objektov sinergetičskovo upravlenija v chimičeskoj tehnologij. In: Sovremennaja prikladnaja teorija upravlenija: Novyje klasy reguljatorov techničeskich system. Taganrog: TRTU, 2000, s. 238-256.
4. NEYDORF, R. A. – SITNIKOV, A. V.: Modelirovanije chimiko-technologičeskich processov na mikro-EVM: Novočerkask: NPI, 1986, 88 s.
5. NEYDORF, R. A. – SOLOVEJ, N. S.: Teorija avtomatičeskovo upravlenija v tehnologičeskich sistemach. Učta: Institut upravlenija informacij i biznesa, 2005, 212 s.

6. PITEĽ, J. – BALARA, M.: Pneumatiký umelý sval – perspektívny prvok mechatroniky (2). AT&P Journal, 2009. roč. XVI., č. 1, str. 50 - 51. ISSN 1335-2237
7. ŽIDEK, K. - MAXIM, V.: Návrh riadenia systému na testovanie životnosti otočných častí motorových vozidiel na báze pneumatiky. Acta Mechanica Slovaca. roč. 12, č. 1-a/2008 (2008), s. 253-258. ISSN 1335-2393.

Poznámka: Príspevok bol spracovaný s príspevom grantovej agentúry VEGA Ministerstva školstva SR, projekt č. 1/0345/08.

*On the base of pneumatic artificial muscles there is possibility to design and realize progressive actuators with excellent power-to-weight ratio. For modeling and simulation of dynamic behavior of these actuators it is necessary to have adequate mathematical model of the artificial muscle as main component of such system. There is described in paper an approach to finding an abstract universal model of the pneumatic artificial muscle.*

RESUME