



# Pneumatický umelý sval

## – perspektívny prvok mechatroniky (4)

### Aktuátory na báze pneumatikých umelých svalov

Na báze pneumatikých umelých svalov možno konštruovať pohony, ktoré majú v porovnaní s tradičnými pneumatikými pohonmi niekoľko výhod, a to napr. menšiu hmotnosť, menšiu spotrebu energie pri rovnakej sile, resp. momente, vysoký pomer výkonu vzhľadom na hmotnosť, nižšiu cenu, tesnosť proti nečistotám, prachu a pod. V porovnaní s elektrickými pohonmi je ich výhodou najmä výrazne nižšia hmotnosť pri rovnakom výkone. Vynikajúci pomer výkonu a hmotnosti však nie je jedinou pôsobivou charakteristikou pneumatikých umelých svalov. Ich prirodzená poddajnosť ich predurčuje na využitie v systémoch, ktoré sú v kontakte s ľuďmi alebo pri uchopovaní jemných predmetov.

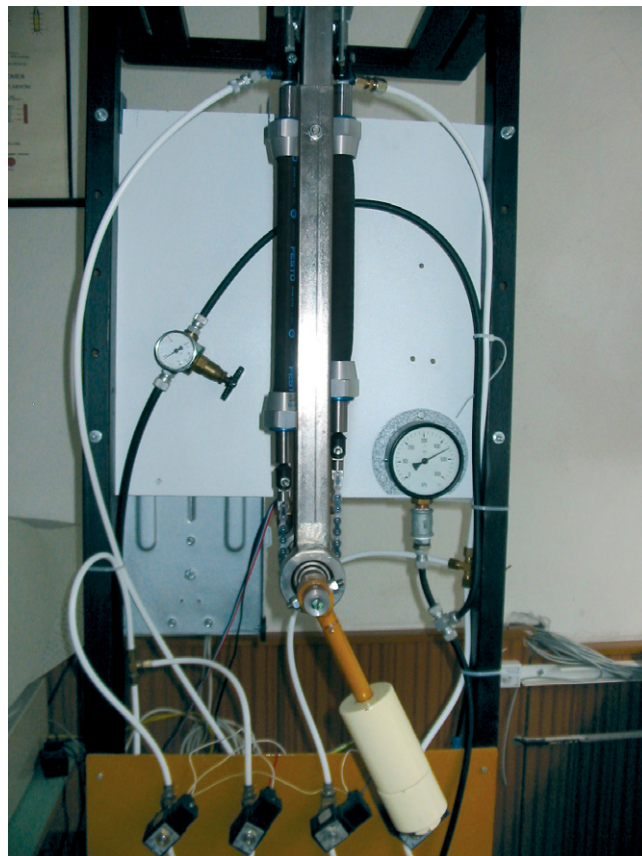
Sila vyvinutá pneumatikými umelými svalmi pôsobí iba v jednom smere, a preto podobne ako v ľudskom tele nemožno na pohyb kĺbov využívať iba jeden sval, ale spolupôsobenie dvoch (skupín) svalov. Najjednoduchším príkladom je spolupôsobenie dvojhľavého (bicepsu) a trojhľavého svalu ramena (tricepsu). Sval, ktorý vystiera končatinu (triceps), pôsobí antagonisticky vzhľadom na sval, ktorý ju ohýba alebo sťahuje (biceps). Ak sa umelé svaly využívajú na pohyb kĺbov podľa biologického modelu ľudských svalov, vyžaduje ich zapojenie podobné usporiadanie. Umelé svaly sa na pohon kĺbu zapájajú do antagonistického páru, ktorého pohyb môže byť priamočiary alebo rotačný. Využíva sa predovšetkým kĺb s rotačným pohybom. Zložitejšie manipulačné systémy vyžadujú celé série podobných zapojení v závislosti od počtu stupňov voľnosti, ktoré určujú počet použitých kĺbov na pohon zariadenia.

Samotné umelé svaly a mechanický spôsob ich prepojenia určujú statické charakteristiky kĺbu. Svaly sú obvykle spojené predpínacím prvkom, ktorý môže byť pevný alebo ohybný (tyč, lanko, reťaz atď.) cez pákový alebo kladkový mechanizmus. Použitie konkrétneho typu mechanizmu prepojenia závisí od požiadaviek kladených na manipulačný systém a od oblasti jeho použitia. Extrémne zaťažované manipulačné systémy vyžadujú použitie predpínacích prvkov s väčším priemerom, ktoré v prípade kladkového mechanizmu bývajú spojené reťazou. Tu sa však môže objaviť riziko vzniku nežiaducej vôle alebo preklzavania.

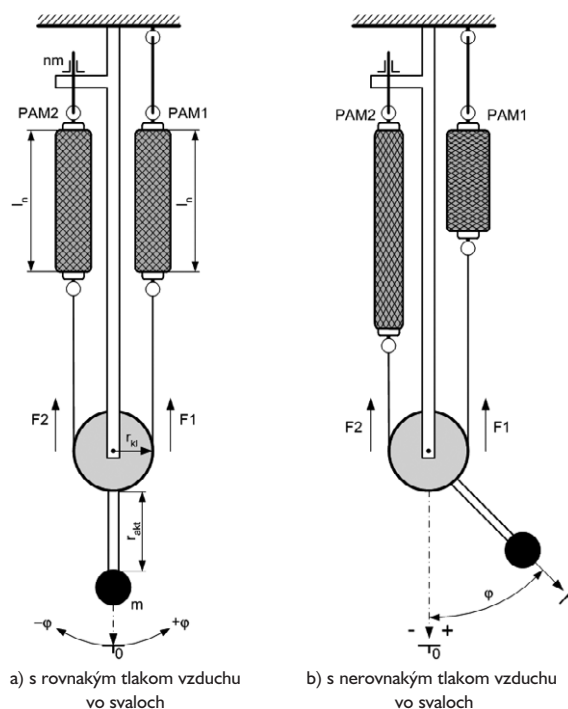
### Pneumatický aktuátor s umelými svalmi v antagonistickom zapojení

Príklad pneumatikého aktuátora s umelými svalmi v antagonistickom zapojení navrhnutom a zrealizovanom na experimentálne účely v oblasti výskumu a vývoja nekonvenčných pohonov manipulačných zariadení je na obr. 16. Dva pneumatiké umelé svaly svojimi ťahovými silami pôsobia proti sebe. Akčnou veličinou prichádzajúcou do každého umelého svalu je tlak stlačeného vzduchu, ktorý prúdi cez príslušný elektromagnetický ventil do svalu. Výsledná poloha aktuátora je určená rovnováhou ťahových síl svalov v závislosti od tlaku vzduchu v jednotlivých svaloch [21].

Princíp činnosti pneumatikého aktuátora s umelými svalmi v antagonistickom zapojení možno vysvetliť pomocou obr. 17 a 18. Na obr. 17 sú dva rovnaké pneumatiké umelé svaly PAM1 a PAM2 (Pneumatic Artificial Muscle – PAM) s maximálnou dĺžkou  $l_{max}$ , ktoré sa po naplnení stlačeným vzduchom na svoj pracovný tlak skrátkajú na dĺžku  $l_n = l_{max} - \Delta l_{max}/2$ . Ťahová sila  $F_1$  svalu PAM1 sa prenáša cez kladku na sval PAM2, ktorý pôsobí svojou ťahovou silou  $F_2$ .



Obr.16 Experimentálny pneumatiký aktuátor na báze umelých svalov



Obr.17 Pneumatiké umelé svaly v antagonistickom zapojení

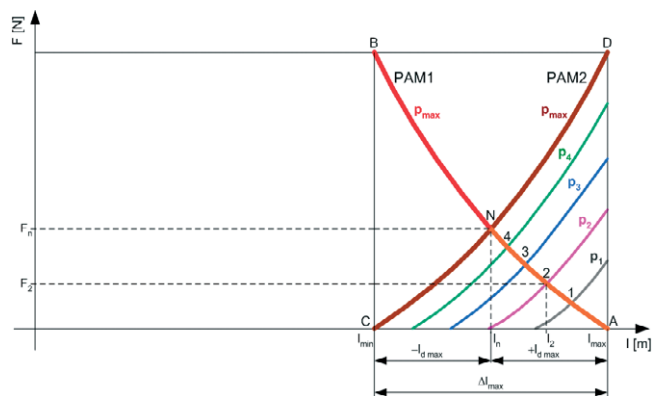


Pri rovnakých plniacich tlakoch v obidvoch svaloch (obr. 17a) nastáva rovnosť ťahových síl svalov pri rovnakých hodnotách ich kontrakcií a systém sa ustáli v polohe, ktorá bude ďalej považovaná za začiatočný stav aktuátora. Táto pozícia sa dodatočne presne nastavuje napínaním mechanizmom *nm*. Pri nerovnakých plniacich tlakoch vo svaloch (obr. 17b) sa systém ustáli v polohe zodpovedajúcej rovnosti ťahových síl oboch svalov, pričom bola navrhnutá koncepcia činnosti aktuátora so súčasťou zmenou tlaku iba v jednom svalе.

Pri zmene (poklese) tlaku vzduchu, napr. v umelom svalе PAM2, mení sa (zmenšuje sa) aj jeho kontrakcia (aktívny umelý sval). Následkom toho nastane rotačný pohyb hmoty záťaže na ramene pripevnenom k osi kladky. Tento smer pohybu vo vzťahu k začiatočnému bodu považujeme za kladný (+). Vzťah medzi ťahovou silou, tlakom a dĺžkou (kontrakciou) tohto umelého svalu vyjadrujú charakteristiky na obr. 18 (napr. bod 2). V umelom svalе PAM1 sa tlak nemení, mení sa iba jeho dĺžka v súlade s meniacou sa ťahovou silou umelého svalu PAM2. Umelý sval PAM1 pôsobí ako pneumatická pružina s nelineárnou charakteristikou (pasívny umelý sval), a preto je na obr. 18 znázornená iba jedna charakteristika tohto svalu zodpovedajúca začiatočnému plniacemu tlaku  $p_{max}$ . Táto charakteristika je zakreslená tak, aby vystihovala protichodné silové pôsobenie PAM1 vzhľadom na PAM2. Body na priesečníkoch charakteristík v úseku *N-A* zodpovedajú priebehu narastania kontrakcie pasívneho svalu PAM1 pri postupnom poklese tlaku v aktívnom svalе PAM2 ( $p_{max} > p_4 > p_3 > p_2 > p_1$ ). Takto možno dosiahnuť ľubovoľnú kladnú hodnotu  $l_d$  (až po  $l_{d,max}$ ). Bod *C* na charakteristike PAM2 na obr. 18 je bod maximálnej kontrakcie svalu (minimálnej dĺžky svalu), v ktorom je jeho ťahová sila už nulová. Pre sval PAM1 je to bod *A*.

Záporné hodnoty polohy (-) dosahuje aktuátor tým istým spôsobom, ako je uvedené v predchádzajúcom odseku. Vymenené sú iba úlohy svalov. PAM1 má tlak vzduchu variabilný, PAM2 plní úlohu nelineárnej pneumatickej pružiny.

Aktívnym svalom je vždy sval s variabilným tlakom vzduchu. Pasívny sval plní úlohu nelineárnej pružiny pri konštantnom tlaku vzduchu a tým zabezpečuje tuhosť mechanizmu aktuátora a rovnosť síl pre každú polohu aktuátora.



Obr.18 Statické charakteristiky pneumatických umelých svalov v antagonistickej zapojení

### Statická charakteristika aktuátora s umelými svalmi v antagonistickej zapojení

Predpokladáme, že pre aktuátor v antagonistickej zapojení budú pri použití identických pneumatických umelých svalov rovnaké aj ich nelineárne charakteristiky a tým aj rovnaké ťahové sily, dĺžky a tlaky v referenčnej nulovej polohe (bod *N* na obr. 18). Posuv  $l_d$  oproti referenčnému bodu *N* bude zodpovedať priesečníkom príslušných charakteristík umelých svalov. Na obr. 18 sú to napr. body 4 až 2 pri zmene tlaku svalu PAM2 z hodnoty  $p_{max}$  na hodnotu  $p_4$  až  $p_2$  pri konštantnom maximálnom tlaku vo svalе PAM1. Polohu danú bodom *A* (t. j. maximálnu kladnú výchylku od referenčného bodu *N*) dosiahne rameno aktuátora pri nulovom tlaku vo svalе PAM2 a maximálnom tlaku vo svalе PAM1. Maximálnu zápornú výchylku od referenčného bodu *N* (poloha daná bodom *C*) dosiahne aktuátor rovnakým spôsobom, ale

pri opačnom rozložení tlakov vzduchu v umelých svaloch. Takto sa pri zmenách tlaku v jednotlivých svaloch bude pracovný bod polohy aktuátora pohybovať od začiatočného referenčného bodu *N* po príslušnej charakteristike s tlakom  $p_{max}$  do bodu *A* alebo *C*.

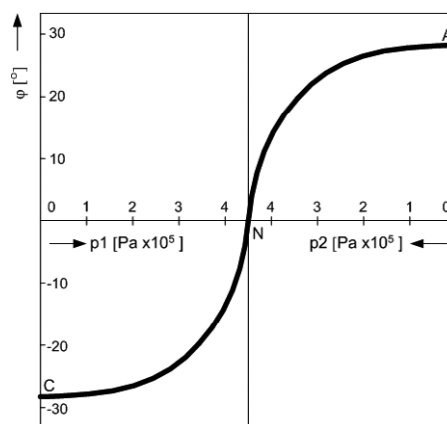
Ľubovoľnému posuvu  $l_d$  na obr. 18 bude zodpovedať uhol natočenia  $\varphi$  ramena aktuátora:

$$\varphi = \arctg \frac{\pm l_d}{r_{kl}} \quad (30)$$

kde  $r_{kl}$  je polomer kladky.

Statická nelineárna charakteristika aktuátora je znázornená na obr. 19 [20]. Je výsledkom merania funkčného vzoru aktuátora. Ten bol realizovaný aplikáciou dvoch pretlakových pneumatických umelých svalov typu MAS 20 250N firmy Festo so svetlosťou 20 mm, dĺžkou 250 mm, maximálnou kontrakciou 25 % a maximálnym dovoleným tlakom 600 kPa. Polomer kladky aktuátora bol 30 mm, pracovný tlak stlačeného vzduchu 450 kPa. Záťaž aktuátora bola realizovaná závažím s hmotnosťou 3 kg.

Na zvislej osi statickej charakteristiky je poloha aktuátora (uhol natočenia  $\varphi$  ramena aktuátora), na vodorovnej osi tlak vo svaloch PAM1 a PAM2. V pravej polovici charakteristiky (medzi bodmi *A* a *N*) sa poloha aktuátora nastavuje zmenou tlaku  $p_2$  vo svalе PAM2 v rozsahu 0 až 450 kPa, pričom tlak  $p_1$  vo svalе PAM1 je konštantný a maximálny (450 kPa). V ľavej polovici (medzi bodmi *C* a *N*) je to opačne (mení sa tlak  $p_1$  vo svalе PAM1 a tlak  $p_2$  vo svalе PAM2 je konštantný). Body *A*, *C* a *N* zodpovedajú bodom na obr. 18.



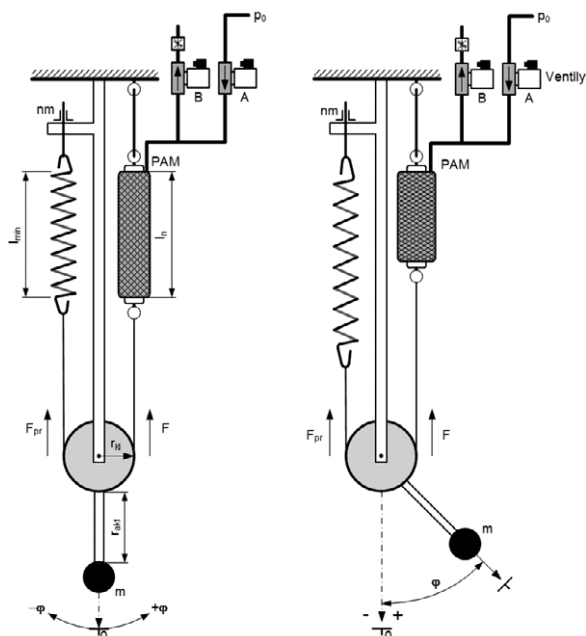
Obr.19 Statická charakteristika aktuátora

### Pružinový pneumatický aktuátor s umelým svalom v antagonistickej zapojení

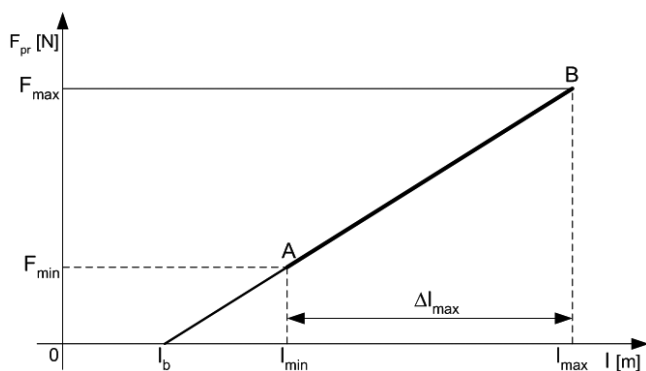
Pri menších nárokoch na presnosť, tuhosť a dynamiku pohonu manipulačného zariadenia sa môže uplatniť aj antagonistickej aktuátor s jedným pneumatickým umelým svalom a pružinou, ktorá pôsobí proti ťahovej sile umelého svalu (obr. 20) [22]. Takéto riešenie potrebuje iba dva elektromagnetické ventily (*A* na napúšťanie vzduchu do svalu, *B* na vypúšťanie vzduchu zo svalu). Adekvátne tomu sú nižšie aj nároky na algoritmy a technické prostriedky riadenia. Uvedené zjednodušenia prispievajú k zníženiu nákladov na takéto zariadenie.

Na obr. 20 je pneumatický umelý sval natlakovaný na začiatočnú hodnotu tlaku  $p_n$ , pri ktorom bude jeho dĺžka  $l_n$ . Ťahová sila umelého svalu  $F$  je prenášaná cez kladku na pružinu, ktorá pôsobí proti umelému svalu silou  $F_{pr}$ . Táto sila závisí od veľkosti kontrakcie a jej začiatočná hodnota  $F_{min}$  a tým aj začiatočná poloha aktuátora sa nastavuje napínaním mechanizmom *nm*. Pri zmene tlaku vzduchu v umelom svalе mení sa aj jeho kontrakcia a následkom toho sa uskutočňuje rotačný pohyb hmoty záťaže  $m$  na ramene  $r_{akt}$  pripevnenom k osi kladky.

Úlohou pružiny v pružinovom pneumatickom aktuátore s umelým svalom je pôsobiť silou  $F_{pr}$  proti sile umelého svalu  $F$ . Pokiaľ je  $F_{pr}$  menšia ako sila umelého svalu  $F$ , kontrakcia svalu narastá. Tento rast sa zastaví až v pozícii, v ktorej dochádza k rovnosti síl. Sila pružiny sa mení



Obr.20 Pneumatický umelý sval a pružina v antagonisticom zapojení



Obr.21 Statická charakteristika lineárnej pružiny

v závislosti od jej dĺžky. Za predpokladu, že pružina má túto závislosť lineárnu, bude jej charakteristika tiež lineárna (obr. 21). Nenamáhaná pružina má začiatočnú dĺžku  $l_b$  a s rastúcou ťahovou silou jej dĺžka narastá. Jej praktické využitie sa predpokladá v rozsahu dĺžky  $l_{min}$  až  $l_{max}$ . To zodpovedá rozsahu ťahovej sily  $F_{min}$  až  $F_{max}$ . Bude sa teda využívať časť charakteristiky vymedzenej úsečkou AB. Do začiatočného bodu A je pružina nastavená napnutím na dĺžku  $l_{min}$  [23].

Pružina s lineárnou charakteristikou má sklon charakteristiky daný jej silovými pomermi vo vzťahu k dĺžke napnutia:

$$K_{pr} = \frac{(F_{max} - F_{min})}{\Delta l_{max}} \quad (31)$$

kde

$$\Delta l_{max} = l_{max} - l_{min} \quad (32)$$

Potom pre ťahovú silu pružiny s charakteristikou podľa obr. 21 platí:

$$F_{pr} = K_{pr} \cdot (l - l_b) \quad (33)$$

pričom  $l$  sa mení v pracovnom rozsahu ( $l_{min}; l_{max}$ ).

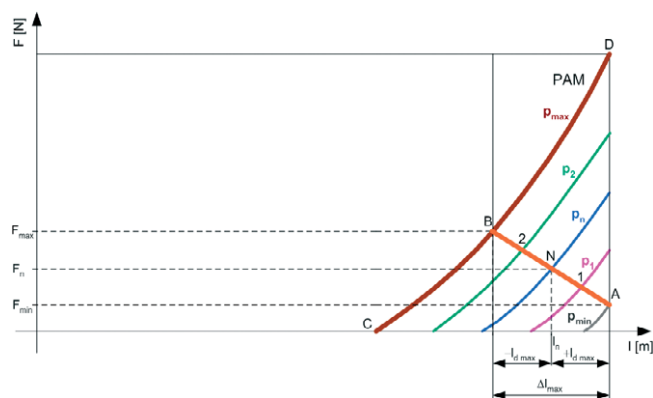
Predpätie pružiny:

$$F_{min} = K_{pr} \cdot (l_{min} - l_b) \quad (34)$$

Maximálna ťahová sila pružiny:

$$F_{max} = K_{pr} \cdot (l_{max} - l_b) \quad (35)$$

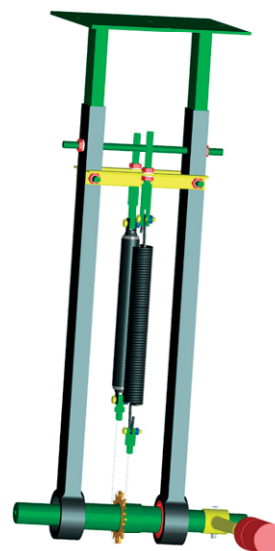
Na obr. 22 sú znázornené nelineárne charakteristiky pneumatického umelého svaly pri rôznych hodnotách tlaku vzduchu  $p_{min}$  až  $p_{max}$  a charakteristika pružiny, ktorá je zakreslená tak, aby vystihovala protichodné silové pôsobenie pružiny vzhľadom na sval. V priesečníkoch



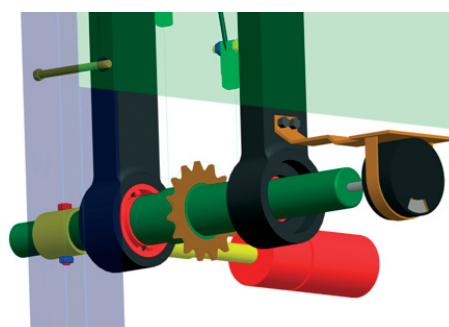
Obr.22 Statické charakteristiky pneumatického umelého svaly v antagonisticom zapojení s pružinou

charakteristik svaly s charakteristikou pružiny dochádza k rovnováhe medzi ťahovou silou umelého svaly a pružiny. Každý takýto bod v spomenutom rozsahu je rovnovážnym bodom, v ktorom sa pri určitej tlaku vzduchu v pneumatickom umelom svaly tento sval skrúti na určitú dĺžku zodpovedajúcu sile ťahu pružiny. Je zrejmé, že pri nekonečnom množstve hodnôt tlaku vzduchu v umelom svaly sa dosiahne nekonečné množstvo polôh, pričom ťahové sily umelého svaly a pružiny sa budú pohybovať v rozsahu  $F_{min}$  až  $F_{max}$ , čím je aj určený rozsah kolísania sily a tuhosti mechanizmu aktuátora. Tuhosť tohto aktuátora, na rozdiel od aktuátora s antagonisticým zapojením dvoch svalov, je asymetrická (rôzna pri kladných a záporných polohách ramena aktuátora).

Na základe uvedených princípov bol vykonaný konštrukčný návrh experimentálneho pružinového aktuátora s umelým svalom, ktorého zostava je na obr. 23. Táto zostava bude na experimentálne účely prichytená na samostatný kovový stojan aktuátora. Snímač polohy na snímanie uhla natočenia ramena aktuátora bude umiestnený na hriadelí aktuátora (obr. 24) [24].



Obr.23 Zostava pružinového pneumatického aktuátora



Obr.24 Detail umiestnenia snímača polohy na prevodovom hriadelí



Navrhnutý pružinový pneumatický aktuátor bude po jeho realizácii slúžiť na experimentálne účely na ďalší výskum v oblasti „low cost“ pohonov manipulačných zariadení.

### Literatúra

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

[21] PETÍK, A., BALARA, M.: Pneumatický aktuátor s McKibbenovými umelými svalmi. In: Automa, roč. 10, č. 1 (2004), s. 6 – 8.

[22] PETÍK, A., BALARA, M.: Statické vlastnosti pružinového aktuátora s pneumatickým umelým svalom. In: Inženýrská mechanika, roč. 11, č. 4 (2004), s. 241 – 246.

[23] PITEĽ, J., BALARA, M.: Pneumatic Spring Actuator with McKibben Artificial Muscle. Annual Scientific Journal of Ovidius University – Mechanical Engineering Series. Vol. IX, No. 1 (2007), pp. 43 – 48.

[24] SLIVKA, M.: Návrh pružinového aktuátora s pneumatickým umelým svalom. Diplomová práca. Košice: SJF TU, 2006. 54 s.

**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](mailto:jan.pitel@tuke.sk)  
[milan.balara@tuke.sk](mailto:milan.balara@tuke.sk)